

Auswirkungen der Vorfertigung auf die Arbeitsproduktivität am Beispiel von Stahlbetondecken

Marie-Christin Schrader, TU Braunschweig, Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb (IBB),

Schleinitzstraße 23A, 38106 Braunschweig, m-c.schrader@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

Vor dem Hintergrund der stagnierenden Entwicklung der Arbeitsproduktivität in der Bauwirtschaft wurden bereits diverse Studien mit der Intention durchgeführt, Produktivitätstreiber zu identifizieren. Im Ergebnis geht daraus regelmäßig die Vorfertigung als mögliche Lösung hervor, wobei diese häufig mit anderen Merkmalen des industriellen Bauens (z. B. Standardisierung und Automatisierung) kombiniert wird, ohne Ursache und Wirkung klar voneinander abzugrenzen. In dieser Veröffentlichung soll die Vorfertigung deshalb als reine Verlagerung von Baustellenprozessen in eine stationäre Produktion betrachtet werden. Es ergibt sich die Fragestellung, welche konkreten Aspekte der Vorfertigung tatsächlich Auswirkungen auf die Arbeitsproduktivität haben und ob diese ausschließlich positiv zu bewerten sind. Das Ziel besteht deshalb zum einen in der Identifikation der entscheidenden Einflussfaktoren, die bei einer vergleichenden Betrachtung der in-situ-Fertigung und der Vorfertigung für die Arbeitsproduktivität von Bedeutung sind. Zum anderen soll eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Vorfertigung allein zu einer Steigerung der Arbeitsproduktivität führen kann.

Abstract

Due to the stagnating development of labor productivity in the construction industry, various studies have already been conducted with the intention of identifying productivity drivers. As a result, prefabrication is regularly identified, often in combination with other key features of industrial construction (e. g. standardization and automation) without clearly distinguishing cause and effect. In this publication prefabrication will therefore be considered as a mere shift of construction site processes to a stationary production. The question arises, which aspects in the course of prefabrication can have effects on labor productivity and whether these can be evaluated exclusively positively. The aim is to identify the decisive factors that have an impact on labor productivity when comparing in-situ production and prefabrication. Secondly, a conclusion is to be made as to whether prefabrication alone can lead to an increase in labor productivity.

1 Einleitung und Methodik

Neben innovativen Ansätzen für die Planung und Ausführung von Bauprojekten wie Building-Information-Modelling und Lean Construction wird sowohl national als auch international häufig die Vorfertigung von Bauwerkskomponenten als mögliche Lösung für die Problematik der stagnierenden Produktivitätsentwicklung in der Bauwirtschaft angeführt. Im Vordergrund steht häufig die Einsparung von Bauzeit durch die parallele Fertigung auf der Baustelle und im Werk. [1]

Dabei ist jedoch zu beachten, dass die entsprechenden Veröffentlichungen sowohl unterschiedliche Begriffe (z. B. Off-site Construction, Prefabrication, industrielle Vorfertigung usw.) als auch stark voneinander abweichende Begriffsinhalte thematisieren. Wenn die Vorfertigung als Produktivitätstreiber hervorgehoben wird, so ist es oftmals der Einsatz von Automatisierungstechnologien bzw. die Standardisierung in Planung und Ausführung, die zu einer potentiellen Steigerung der Arbeitsproduktivität führen würden. Die Auswirkungen der alleinigen Verlagerung von Fertigungsprozessen von der Baustelle in eine stationäre Produktion werden dementsprechend mit anderen

Merkmale des industriellen Bauens zusammengeführt, sodass die realen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge nicht deutlich daraus hervorgehen. Daher soll in dieser Veröffentlichung die Frage beantwortet werden, welche Faktoren der Vorfertigung tatsächlich Einfluss auf die Arbeitsproduktivität haben können (positiv oder negativ).

Zu diesem Zweck werden die Auswirkungen im ersten Schritt anhand eines theoretischen Wirk- und Erklärungsmodells für die Arbeitsproduktivität qualitativ analysiert. Im zweiten Schritt erfolgt eine quantitative Gegenüberstellung der Arbeitsproduktivität von Vorfertigungsprozessen und vergleichbaren Baustellenprozessen in Form des konkreten Stundenaufwands, der für die Herstellung eines Stahlbeton-Deckenabschnitts benötigt wird. Dafür sollen Ergebnisse einer am Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb (IBB) der TU Braunschweig durchgeführten Datenerhebung herangezogen werden, welche die Erfassung von Prozessen und Ausführungszeiten innerhalb der Vorfertigung von Deckenelementen beinhaltet.

DOI: 10.17185/dupublico/79161



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell 4.0 Lizenz (CC BY-NC 4.0)

2 Zusammenhang zwischen der Vorfertigung und der Arbeitsproduktivität auf Basis der Literatur

Mit der Kenntnis über die Produktivitätsentwicklung in anderen Wirtschaftsbereichen in den letzten Jahrzehnten und der gleichzeitig vielfach kommunizierten Stagnation in der Bauwirtschaft sind innovative Ansätze zur Generierung einer messbaren Produktivitätssteigerung ein bedeutendes Thema sowohl in der Forschung als auch in der Praxis. Der Fokus liegt dabei überwiegend auf der Arbeitsproduktivität als das Verhältnis von Output und Input in Form von bezahlter Arbeitszeit, da die Bauwerkserrichtung sehr lohnintensiv ist. [2]

Naoum (2016) untersuchte mittels einer Literaturanalyse sowie einer Befragung die Faktoren, die die Arbeitsproduktivität beeinflussen und stellt im Zuge dessen einen positiven Zusammenhang zwischen der Vorfertigung von Bauwerkskomponenten und der Arbeitsproduktivität her. [3] Dabei wird unter anderem auf eine Studie von *Eastman/Sacks (2008)* referenziert, mit deren Ergebnis u. a. die folgenden Hypothesen bestätigt werden konnten:

1. Tätigkeiten, die überwiegend auf der Baustelle ausgeführt werden, weisen ein geringes oder negatives Produktivitätswachstum auf.
2. Tätigkeiten, die teilweise auf der Baustelle und teilweise in der stationären Produktion ausgeführt werden, zeigen ein stärkeres Produktivitätswachstum im Teil der stationären Produktion.
3. Tätigkeiten, die überwiegend in der stationären Produktion ausgeführt werden, haben im Vergleich zur Bauindustrie insgesamt einen höheren Produktivitätszuwachs. [4]

Der Veröffentlichung von *Eastman/Sacks (2008)* ist jedoch ebenfalls die Hypothese zu entnehmen, dass die Vorfertigung überhaupt erst die Anwendung von Technologien der stationären Produktion (wie z. B. Informationstechnologien, Automatisierung, Datenmanagement) ermöglicht. [4]

Das *McKinsey Global Institute* veröffentlichte 2017 einen Report, in welchem der Zusammenhang zwischen der Vorfertigung und der Arbeitsproduktivität durch das folgende **Bild 1** veranschaulicht werden soll. Demzufolge geht die Vorfertigung (hellblau) im Vergleich zur traditionellen Baustellenproduktion (dunkelblau) mit einer deutlich gesteigerten Arbeitsproduktivität einher (x-Achse). Für die Implementierung dieser industriellen Methoden sind jedoch *McKinsey* zufolge ebenfalls hohe Investitionen erforderlich (y-Achse). [5]

Weiterhin wurde im Rahmen einer Veröffentlichung zur Produktivität im Bauhauptgewerbe des *Instituts für Bauwirtschaft und Baubetrieb der TU Braunschweig* eine Metastudie durchgeführt und Literatur hinsichtlich bestehender Produktivitätstreiber ausgewertet, wonach die Vorfertigung neben der Robotik und dem Baumanagement auf ca. 13 % gleichermaßen häufig thematisiert wurde. [6]

Eine aktuelle Veröffentlichung von *EY-Parthenon* gemeinsam mit *BayWa* aus dem Jahr 2023 sieht die industrielle Vorfertigung als einen der größten und wichtigsten Hebel, um eine Produktivitätssteigerung zu erreichen. Durch die Verlagerung von Arbeitsschritten von der Baustelle in die kontrollierte und (teil)automatisierte Umgebung einer Werkshalle könne demnach viel verkürzt, qualitativ verbessert und vereinfacht werden.

Die industrielle Vorfertigung umfasst in diesem Beitrag das produktsystembasierte, elementierte sowie modulare Bauen und es lässt sich erneut schlussfolgern, dass nicht die Vorfertigung allein, sondern auch anderen Aspekte, wie die Standardisierung und die Prozessoptimierung als Produktivitätshebel gesehen werden. [7]

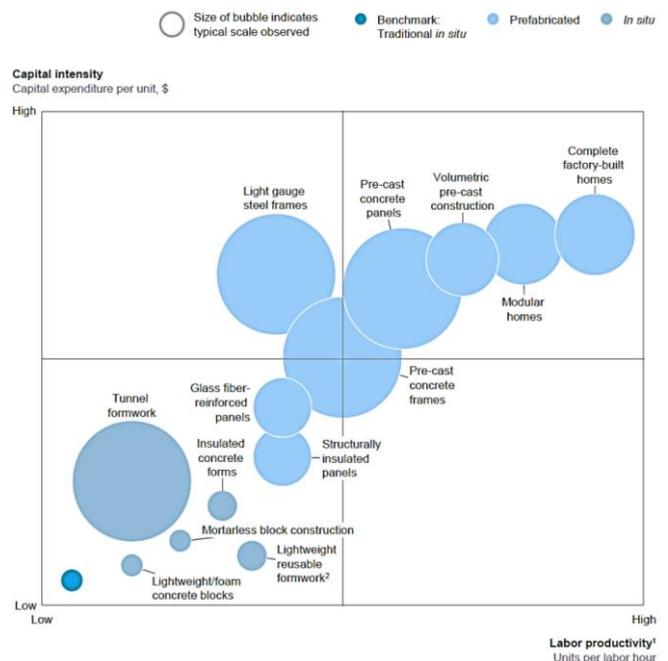


Bild 1 Zusammenhang zwischen der Arbeitsproduktivität und dem Kapitalaufwand bei unterschiedlichen industriellen Bauverfahren [7]

3 Qualitative Ableitung der Auswirkungen von Vorfertigung auf die Arbeitsproduktivität

Im Folgenden soll anhand eines bereits existierenden Wirk- und Erklärungsmodells abgeleitet werden, welche für die Vorfertigung geltenden Faktoren einen potentiell positiven, negativen oder neutralen Einfluss auf die Arbeitsproduktivität haben.

3.1 Modell und Ausgangssituation

Die Produktivität ist im Allgemeinen als das Verhältnis von Output und Input definiert. Beim Output handelt es sich in der Regel um das Produkt (Erfassung z. B. durch die Anzahl der produzierten Stückzahlen oder die monetäre Bewertung der Leistung), während der Input den benötigten

Ressourceneinsatz repräsentiert. Je nachdem, welcher Input betrachtet wird, können mehrere Teilproduktivitäten unterschieden werden. Neben der Arbeitsproduktivität gibt es beispielweise die Kapital- oder die Maschinenproduktivität. [8]

Die hier fokussierte Arbeitsproduktivität basiert auf der bezahlten Arbeitszeit der Mitarbeitenden, die zur Generierung eines bestimmten Outputs aufgewendet wird und hat daher einen entscheidenden Einfluss auf den Anteil der Lohnkosten an der Bauproduktion. Im Gegensatz zur maschinellen Produktion variieren die Tätigkeiten, die Mitarbeitende durchführen sowie die Zustände, die sie einnehmen können stärker. [8] Außerdem trägt ein bedeutender Anteil dieser Tätigkeiten bzw. Zustände nicht primär zur Wertschöpfung bei.

Die Autoren *Glöckner/Grabner des Instituts für Produktionsmanagement und -technik der TU Hamburg* erarbeiteten 2017 im Rahmen eines Forschungsprojekts ein vollständiges Modell der Arbeitsproduktivität. Das Modell umfasst eine Zielgröße – die Arbeitsproduktivität – sowie vier Regelgrößen, die die bezahlte Arbeitszeit wie folgt abbilden:

1. Durchführung der Arbeitsaufgabe
2. Auslastungsverluste
3. Ungeplante Abwesenheit
4. Geplante Abwesenheit [8]

Das Modell wird durch verschiedene Stellgrößen und zugehörige Gestaltungsaufgaben ergänzt, die die Regelgrößen beeinflussen. Die Stellgrößen konkretisieren Tätigkeiten und Mitarbeiterzustände, die im Folgenden noch genauer erläutert werden und im **Bild 4** dargestellt sind. [8]

Die folgende modellbasierte Ableitung soll auf der Grundlage des bestehenden Modells von *Glöckner/Grabner (2017)* erfolgen. Das Ziel besteht darin, jeweils eine Aussage darüber zu treffen, ob die Vorfertigung einen potentiell positiven, negativen oder neutralen Einfluss auf die Stell- und Regelgrößen hat, was sich anhand des Modells wiederum auf die Arbeitsproduktivität auswirken würde. Die Prognose der Auswirkungen basiert dabei auf Erfahrungen, die im Rahmen eines Forschungsprojekts am *Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb der TU Braunschweig* in den Jahren 2020/21 gesammelt werden konnten. Gegenstand des Forschungsprojekts waren die Aufnahme und Darstellung sämtlicher Fertigungsprozesse sowie die Erfassung von konkreten Ausführungsdauern bei der Vorfertigung von Deckenelementen aus Stahlbeton.

Im Rahmen des aus dem Forschungsprojekt abgeleiteten Modellbeispiels werden Deckenelemente in der stationären Produktionshalle vorgefertigt, anschließend verpackt, gelagert und zur Baustelle transportiert. Sämtliche Materialien liegen in einem Materiallager vor. Der Beton wird in Form von Transportbeton arbeitstäglich zur Produktionshalle bestellt und dort eingebaut. Die fertigen Deckenelemente werden nach dem Ausschalen, der Nachbearbeitung und Verpackung mindestens 21 Kalendertage auf dem Gelände der Produktion gelagert und dann per LKW zur

entsprechenden Baustelle gebracht. Die Mitarbeitenden sind fest angestellt und kontinuierlich in der Vorfertigung der Deckenelemente tätig (siehe **Bild 2**).

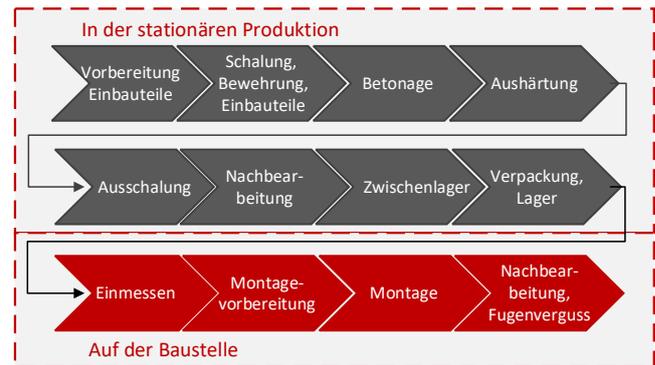


Bild 2 Visualisierung der Prozessschritte im Rahmen der Vorfertigung und Montage von Deckenelementen

Die Vorfertigung wird in der folgenden Modellbetrachtung als reine Verlagerung von Baustellenprozessen in eine stationäre Produktion betrachtet. Im Gegensatz zur traditionellen Ort betonproduktion, die das Einschalen, Bewehren, Betonieren, Ausschalen und Nachbearbeiten einer Stahlbetondecke auf der Baustelle umfasst, finden diese Prozesse bei der Vorfertigung in einem Werk statt, sodass die Stahlbetondeckenelemente auf der Baustelle lediglich montiert und vergossen werden müssen (siehe **Bild 2**). Dies bedeutet für die Ausführung der Fertigungsschritte insbesondere eine Vermeidung wechselnder Produktionsstandorte sowie die weitgehende Unabhängigkeit von ungünstigen Witterungsbedingungen. [9, 10]

Da der Fokus in dieser Veröffentlichung ausschließlich auf der Vorfertigung liegt, werden die Einflussfaktoren nachfolgend möglichst frei von anderen Merkmalen des industriellen Bauens analysiert, welche mit der Vorfertigung häufig einhergehen (z. B. Standardisierung, Mechanisierung oder Automatisierung). Falls Einflüsse vermehrt aus diesen Bereichen erkannt werden, wird gesondert darauf hingewiesen.

3.2 Modellbasierte Ableitung der potentiellen Auswirkungen

Im Rahmen der folgenden Untersuchung werden die Auswirkungen der Vorfertigung auf den Stundenaufwand anhand von Erfahrungswerten aus der durchgeführten Prozessanalyse prognostiziert. Dies beinhaltet jeweils das Treffen einer Aussage darüber, ob sich der Stundenaufwand je Stellgröße des beschriebenen Modells von *Glöckner/Grabner* im Gegensatz zur traditionellen Baustellenproduktion tendenziell verringert (positiver Einfluss – grün markiert) oder erhöht (negativer Einfluss – rot markiert) bzw. ob er konstant bleibt (kein Einfluss – grau markiert). Die Aussagen sowie die entsprechenden Begründungen sind dem folgenden **Bild 3** zu entnehmen, während das Ergebnis der Prognose zusammenfassend im Modell für die Arbeitsproduktivität in **Bild 4** veranschaulicht wird.

Regelgröße	Stellgröße	Potentielle Auswirkung der Vorfertigung auf den Stundenaufwand	
Durchführung der Arbeitsaufgabe	Material handhabung	positiv	Material sowie Werkzeug befinden sich i. d. R. an gleichbleibenden, geschützten Orten und sind eher in einem guten Zustand sowie in ausreichender Menge vorhanden, da sie von gleichbleibenden Mitarbeitenden verwendet und gepflegt werden. Suchprozesse kommen voraussichtlich seltener vor.
	Informations-handhabung	positiv	Informationen liegen eher in bekannten Formaten an gleichbleibenden Orten (digital/analog) vor bzw. werden bereitgestellt. Abstimmungen mit Vorgesetzten und anderen Mitarbeitenden haben mehr Routine. Informationswege sind i.d.R. bekannt.
	Arbeitsplatzvor- u. Nachbereitung	positiv	Arbeitsplätze sind konstant und vor Witterung geschützt. An einem Arbeitsplatz wurden vermeintlich vorher bereits mehrmals die gleichen Tätigkeiten ausgeführt, was den Aufwand von Vorbereitungs-, Reinigungs- und Räumtätigkeiten verringert. Durch feste Arbeitszeiten und strukturiertere Abläufe gibt es für diese Tätigkeiten zumeist geplante Zeiträume.
	Aufgabenbearbeitung	neutral/ positiv	Die wertschöpfenden Tätigkeiten sind in der stationären Produktion mit hoher Wahrscheinlichkeit im gleichen Umfang durchzuführen, wie auf der Baustelle. Einen potentiell positiven Einfluss auf den Arbeitsaufwand haben jedoch konstante Witterungsbedingungen, Temperaturen und Lichtverhältnisse.
Auslastungsverluste	Kapazitätsbedingte Auslastungsverluste	negativ/ neutral	Dieser Bestandteil ist stark von der Produktionsplanung bzw. der Bauleitung abhängig. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auf der Baustelle eher an alternativen Arbeitsplätzen wertschöpfend weitergearbeitet werden kann, während ein Produktionsstillstand in einem Werk wenig Spielraum bietet. Andererseits geht Vorfertigung häufiger mit längeren Vorlaufzeiten für die Kapazitätsplanung einher, weshalb die Reihenfolge der Auftragsbearbeitung früher bekannt sein sollte. Wechsel zwischen
	Störungsbehebung	positiv/ neutral	Aufgrund der Witterungsunabhängigkeit in einer stationären Produktion kommt es potentiell zu weniger Störungen an Geräten, weshalb der Aufwand zur Behebung bzw. die Wartezeit auf zuständige Personen geringer ausfällt. Außerdem sind Mitarbeitende zur Störungsbehebung potentiell häufiger vor Ort und daher schneller fertig. Im Gegensatz dazu ist die Flexibilität der Baustellenproduktion i.d.R. höher, sodass alternative Geräte leichter zum Einsatz kommen können.
	Zusätzliche Tätigkeiten	negativ	Tätigkeiten, wie Verpacken, Verladen, Verorten und Vergießen, die auf den separaten Transport zur Baustelle zurückzuführen sind, erzeugen einen zusätzlichen Aufwand.
	Nacharbeit	positiv	Der gleichbleibende Arbeitsplatz, die Unabhängigkeit von Witterungsbedingungen, gleichbleibende Mitarbeitende, bekannte Wege, usw. ermöglichen eine höhere Ausführungsqualität, was den Aufwand für Nacharbeit eher verringert. Durch den Transport kann es jedoch auch zu zusätzlicher Nacharbeit auf der Baustelle kommen.
Ungeplante Abwesenheit	Krankheit	positiv	Krankheitsbedingte Arbeitsausfälle kommen aufgrund der weitestgehend witterungsunabhängigen Ausführung sowie der tendenziell häufigeren Berücksichtigung ergonomischer Gesichtspunkte potentiell seltener vor. Der konstante Standort von Arbeitsplätzen, die bekannten Wege sowie die geringere Anzahl von Schnittstellen mit anderen Gewerken haben positive Auswirkungen auf die Arbeitssicherheit. Die Tätigkeiten finden auf einer Ebene mit gleichbleibenden Arbeitsschutzmaßnahmen statt, weshalb das Absturzrisiko voraussichtlich geringer ist.
	Sonst. Fehlen	neutral	Zeitanteile werden nicht von Produktionsbedingungen beeinflusst, weshalb sie auf der Baustelle und in einer stationären Produktion tendenziell übereinstimmen.
Geplante Abwesenheit	Urlaub und Pausen	neutral	
	Weiterbildung	neutral	

Bild 3 Qualitative Ableitung der Auswirkungen von Vorfertigung auf die Arbeitsproduktivität

Die Regelgröße **Durchführung der Arbeitsaufgabe** des Modells stellt die Kerntätigkeit der gesamten Leistungserbringungen dar. Sie wird untergliedert in die Stellgrößen Materialhandhabung, Informationshandhabung, Arbeitsplatzvor- und Nachbereitung sowie Aufgabenbearbeitung. Die Aufgabenbearbeitung repräsentiert hierbei den Bereich der wertschöpfenden Tätigkeiten, während die anderen drei Gliederungspunkte als unterstützende Tätigkeiten zu betrachten sind. [8]

Auslastungsverluste werden als zweite Regelgröße untersucht. Sie geben insbesondere Warte- und Störzeiten sowie zusätzliche und gleichzeitig nicht-wertschöpfende Prozesse wieder. Sie setzen sich aus den folgenden Stellgrößen zusammen: Kapazitätsbedingte Auslastungsverluste, Störungsbehebung, zusätzliche Tätigkeiten und Nacharbeit. Kapazitätsbedingte Auslastungsverluste sind in erster Linie auf eine unzureichende Kapazitätsplanung seitens der Produktionsplanung- und steuerung zurückzuführen und können auch als Leerlaufzeiten oder Wartezeiten auf Aufträge verstanden werden. Störungen, deren Behebung ebenso die Durchführung der Arbeitsaufgabe unterbrechen, betreffen wiederum technische Anlagen und Geräte. Zusätzliche Tätigkeiten können dagegen sehr unterschiedliche Gründe haben. Zu nennen sind dabei z. B. für die Wert-

schöpfung unnötige Arbeiten, wie vermeidbare Transporte oder ineffiziente Besprechungen. Infolge einer unzureichenden Ausführungsqualität kann schließlich Nacharbeit erforderlich werden, die ebenfalls zu den Auslastungsverlusten zählt. [8] **Ungeplante Abwesenheiten** umfassen die Zeit, in der eine Arbeitskraft eingeplant, aber nicht anwesend ist. Sie setzt sich aus dem krankheitsbedingten und dem sonstigen Fehlen zusammen. Dagegen beschreibt die **geplante Abwesenheit** die Zeit, die eine Arbeitskraft nicht eingeplant ist, weil sie sich bei Weiterbildungsveranstaltungen befindet oder Pause bzw. Urlaub hat. [8]

Im Ergebnis ist davon auszugehen, dass die potentiellen Auswirkungen der Vorfertigung auf die Arbeitsproduktivität überwiegend positiv sind. Das heißt der Stundenaufwand, der innerhalb der in **Bild 4** dargestellten Regelgrößen anfällt, kann durch die Verlagerung von Fertigungsprozessen von der Baustelle in eine stationäre Produktion in den meisten Bereichen verringert werden. Insbesondere im Rahmen der Durchführung der Arbeitsaufgabe als Kerntätigkeit bzw. wertschöpfende Tätigkeit sowie der unterstützenden Tätigkeiten der Material- und Informationshandhabung besteht ein großes Potential zur Verringerung des Stundenaufwand, was unmittelbar eine Erhöhung der Arbeitsproduktivität zur Folge hätte.

Gegebenenfalls negative Auswirkungen wurden lediglich bei den kapazitätsbedingten Auslastungsverlusten und den zusätzlichen Tätigkeiten identifiziert (siehe **Bild 4**). Dies ist einerseits auf den tendenziell besser strukturierten und langfristiger geplanten Produktionsablauf in der Vorfertigung zurückzuführen, der jedoch gleichzeitig weniger Flexibilität bei eintretenden Störungen und Stillständen ermöglicht. Daraus ergeben sich dann eventuell frei verfügbare Personalkapazitäten, die nicht ohne weiteres für alternative wertschöpfende Tätigkeiten eingesetzt werden können. Andererseits resultieren aus der Durchführung von Fertigungsprozessen abseits der Baustelle zusätzliche Tätigkeiten in erheblichem Umfang, die in erster Linie mit der Logistik einhergehen. Dazu gehören Maßnahmen zum Schutz der Bauteile, zur Lagerung, zur Kennzeichnung und Verortung, zum Transport bis zur Baustelle sowie auf der Baustelle. Hinzu kommen die Montage und der Fugenvergruss.

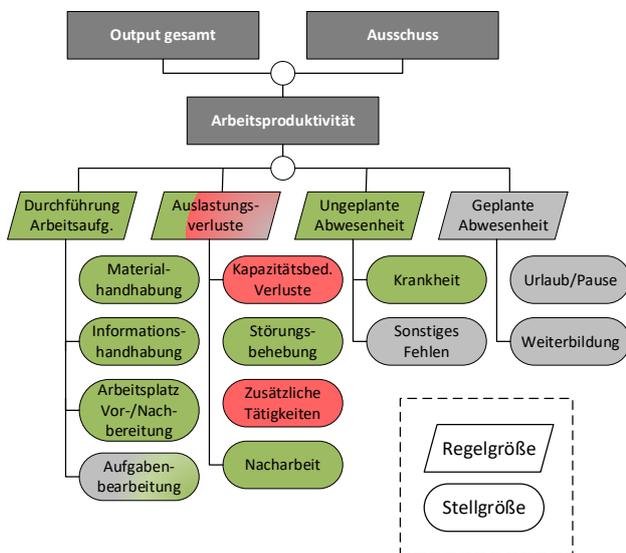


Bild 4 Wirk- und Erklärungsmodell für die Arbeitsproduktivität in Anlehnung an Glöckner/Grabner (2017) [8] mit der Darstellung der potentiellen Auswirkungen von Vorfertigung auf den Stundenaufwand innerhalb der Stell- und Regelgrößen.

Insgesamt ergeben sich aus der Untersuchung zwei zentrale Einflussfaktoren, die mit der Vorfertigung direkt zusammenhängen und die Ableitung der überwiegend positiven Auswirkungen verursachen. Das ist zum einen die Unabhängigkeit von der Witterung durch die Ausführung in einer Produktionshalle. Damit liegen konstante Umgebungsbedingungen, Temperaturen und Lichtverhältnisse vor. Zum anderen finden die Tätigkeiten standortgebunden, an gleichbleibenden Arbeitsplätzen mit mehr Routine bei Detailabläufen und in Abstimmungsprozessen statt, so dass jedem Mitarbeitenden sämtliche Wege für Informationen, Material und Werkzeug eher bekannt sind. Hinsichtlich der Deutung des Untersuchungsergebnisses ist hinzuzufügen, dass es sich bei den qualitativen Aussagen über den Einfluss der Vorfertigung auf den Stundenaufwand um Tendenzen handelt, die aus Erfahrungswerten

ableitet wurden. Der tatsächliche Stundenaufwand, den eine Arbeitskraft für jede der Regel- und Stellgrößen aufbringen muss, ist von zahlreichen weiteren Einflussfaktoren abhängig. Innerhalb einer Vorfertigung von Bauwerkskomponenten existiert ein ebenso breites Spektrum an Möglichkeiten, Tätigkeiten produktiv oder unproduktiv auszuführen (analog zu anderen stationären Produktionen oder der in-situ-Produktion auf Baustellen). Faktoren wie die Produktionsplanung, die baulichen oder technischen Voraussetzungen, die Motivation, die Zusammenarbeit und allgemeine Fähigkeiten der Mitarbeitenden spielen eine entscheidende Rolle für die Arbeitsproduktivität. Ebenso kann eine geeignete Produktionsplanung (z. B. im Rahmen von LEAN-Construction) die Arbeitsproduktivität auf der Baustelle stark verbessern.

4 Quantitative Gegenüberstellung des Stundenaufwands für die Vorfertigung sowie die Baustellenfertigung einer Stahlbetondecke

Im zweiten Teil der Untersuchung werden Stundenaufwandswerte aus der Vorfertigung von Stahlbeton-Deckenelementen, die im Zuge einer Datenerhebung gemessen werden konnten, den entsprechenden Aufwandswerten für die Ortbetonproduktion einer Stahlbetondecke auf der Grundlage von Literatur gegenübergestellt. Zusätzlich zur qualitativen Aussage über den Einfluss der Vorfertigung auf die Arbeitsproduktivität in Kapitel 3 soll auf diese Weise ein quantitativer Vergleich angestellt werden.

Die Datenerhebung entstammt dem bereits geschilderten Forschungsprojekt des *IBB der TU Braunschweig* aus den Jahren 2020/2021 und umfasst den Stundenaufwand für die in der stationären Produktion durchgeführten Teilprozesse zur Vorfertigung von Deckenelementen (siehe **Bild 2**). Da die Datenerhebung den Stundenaufwand für die Montage der Elemente auf der Baustelle nicht umfasst, werden für diese Prozesse Annahmen getroffen und ebenfalls Literaturwerte herangezogen.

4.1 Grundlagen der Beispielrechnung

Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, wird die Gegenüberstellung des Stundenaufwands auf der Grundlage eines definierten Deckenabschnitts aus einem Beispielprojekt erstellt. Dabei handelt es sich um einen Abschnitt von 343 m² einer 20 cm starken Stahlbetondecke über dem insgesamt rund 2480 m² großen 1. Obergeschoss eines Bürogebäudes. Der in **Bild 5** dargestellte Deckenabschnitt enthält insgesamt 18 Elemente und 8 Typen.

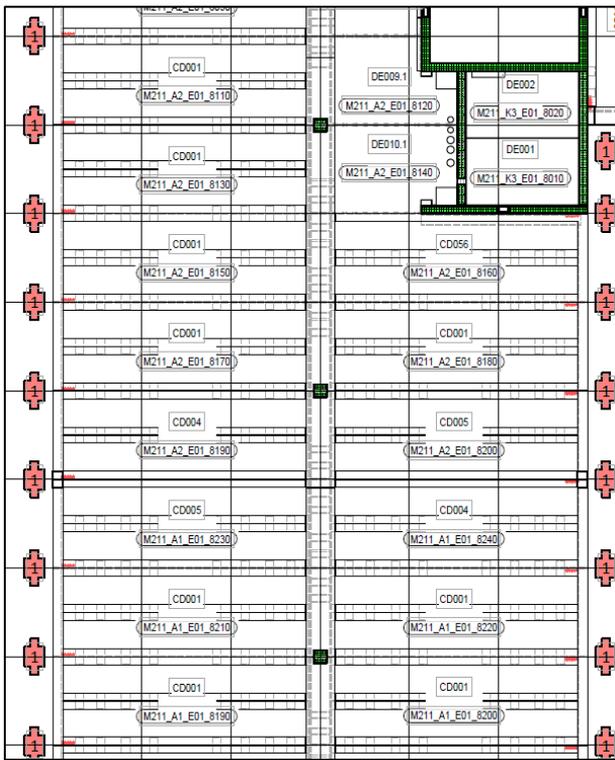


Bild 5 Auszug aus einem Montageübersichtsplan für die Decke über dem 1. OG eines Beispielprojekts

Eine Herausforderung zur Generierung repräsentativer Vergleichswerte ist die Ermittlung des spezifischen Schaufwands für einen Elementtyp in der Vorfertigung (je nach Einsatzhäufigkeit im Gebäude). Dabei ist zu beachten, dass verschiedene Elementtypen unterschiedlich häufig hergestellt und eingesetzt werden. Ein Standardtyp, der sehr häufig vorkommt, ist beispielsweise „CD001“ (siehe **Bild 5**), während „DE 010.1“ im 1. OG des Beispielgebäudes nur einmal geplant ist. Darüber hinaus variiert der Schaufwand für die unterschiedlichen Typen je nach Komplexität sehr stark. Dies ist jedoch bei der Herstellung der Deckenschalung auf der Baustelle ebenso der Fall, da Eckbereiche mit Aussparungen o. ä. mehr Aufwand verursachen als ebene Flächen ohne Besonderheiten.

In der Tabelle im folgenden **Bild 6** wird allen Elementtypen, die im ausgewählten Deckenabschnitt vorkommen, die entsprechende Fläche zugeordnet. Anschließend wird der Anteil an der Gesamtfläche des jeweiligen Typs im 1. OG des Beispielgebäudes ermittelt. Durch die Übertragung dieses Anteils auf den im Durchschnitt gemessenen Stundenaufwand von 8,00 Std., den eine Arbeitsgruppe von Facharbeitern durchschnittlich benötigt, um die Schalung für ein Element am Schaltisch herzustellen, kann der verhältnismäßige Aufwand je nach Einsatzhäufigkeit annähernd ermittelt werden. Der Stundenaufwand für das Einschalen fällt damit umso geringer aus, je mehr Elemente von einem Typ zum Einsatz kommen.

Elementtyp	Fläche Beispiel [in m ²]	Fläche gesamt [in m ²]	Anteil der Beispielfläche an der Gesamtfläche	Verhältniswert Schalungsaufwand je Typ [in Std]
CD 001	196,83	1137,24	17%	1,38
CD 004	43,74	87,48	50%	4,00
CD 005	43,74	131,22	33%	2,67
CD 056	21,87	65,61	33%	2,67
DE 001	7,26	14,52	50%	4,00
DE 002	7,26	14,52	50%	4,00
DE 009.1	10,48	20,96	50%	4,00
DE 010.1	11,88	11,88	100%	8,00
Summe	343	2479		

Bild 6 Ermittlung des spezifischen Schaufwands in Abhängigkeit des Elementtyps und dessen Einsatzhäufigkeit

In der Beispielrechnung soll explizit der Herstellungsprozess der Stahlbetondecke vom Beginn des Einschalens bis zur fertig ausgeschalteten Decke im Vordergrund stehen. Sämtliche logistischen Prozesse hinsichtlich des Antransports von Materialien (Schalung, Bewehrung, Beton, etc.), Personen oder Geräten werden nicht berücksichtigt, obwohl diese in Kapitel 3 als entscheidender Vorteil der Vorfertigung identifiziert wurden. In dieser quantitativen Gegenüberstellung besteht das Ziel nun jedoch darin, den Stundenaufwand für die konkrete „Aufgabenbearbeitung“ bei beiden Varianten zu ermitteln, welche gemäß **Bild 4** der Durchführung der Arbeitsaufgabe zuzuordnen ist und teilweise grau, teilweise grün dargestellt wurde.

4.2 Beispielrechnung zum Vergleich des Stundenaufwands in der Vorfertigung gegenüber der traditionellen Baustellenproduktion

Die Berechnung des Stundenaufwands für alle Teilprozesse zur Herstellung des beschriebenen Deckenabschnitts durch Vorfertigung und Montage auf der einen und Baustellenproduktion auf der anderen Seite, ist der Tabelle in **Bild 7** zu entnehmen. Zusätzliche Details zu den herangezogenen Werten und ggf. getroffenen Annahmen werden im Folgenden erläutert.

Sämtliche Aufwandswerte basieren auf der Ausführungszeit, die eine Kolonne/Arbeitsgruppe für eine definierte Menge benötigt. Die Kolonnenstärke variiert dabei zwischen den Teilprozessen, da für einzelne Teilprozesse mehr Arbeitskräfte benötigt werden (z. B. Betonage) als für andere (z. B. Nachbearbeitung).

Weiterhin umfasst der beispielhafte Deckenabschnitt 14 große Elemente (rund 22 m²) und 4 kleine Elemente mit maximal der Hälfte der Fläche (siehe **Bild 5**). Dieser Umstand ist für die Berechnung jedoch nicht gesondert zu berücksichtigen, da im Rahmen der Datenerhebung sowohl Stundenaufwandswerte für die Fertigung großer als auch kleiner Elemente erhoben wurden. Insgesamt wurden die Zeitwerte für jeden Teilprozess bei mehreren Durchläufen an unterschiedlichen Elementen gemessen und abschließend gemittelt. Zum Zeitpunkt des Forschungsprojekts kamen sowohl die Verpackung der Elemente mit Folie als auch das einfache Abdecken mit einer Plane gleicher-

maßen häufig vor, weshalb an dieser Stelle ebenfalls ein Mittelwert der beiden gemessenen Stundenaufwandswerte herangezogen wird.

In der Tabelle in **Bild 7** setzt sich der Wert für die Montage aus den folgenden Bestandteilen zusammen:

- 0,25 Std/Element – Element abladen (Wert entspricht dem Aufwand für Zwischenlagerung)

- 0,45 Std/Element – Element verlegen/verschrauben (Wert entstammt Erfahrungswerten der Projektleitung)
- 0,25 Std/Element – Zulage für das Abkleben, das Einlegen weiterer Bewehrung und die PE-Schnur (Wert entstammt Erfahrungswerten der Projektleitung)
- 0,25 Std/Element – Mineralwolle und Kompriband anbringen (in Datenerhebung erfasst)

Vorfertigung				Traditionelle Baustellenproduktion			
Teilprozesse	Dauer für die Beispieldecke in [Std]	Quelle	Bemerkung	Teilprozesse	Dauer für die Beispieldecke in [Std]	Quelle	Bemerkung
Einschalen	30,7	gemessen (8,0 Std/Element)	Verhältniswert in Abh. des jeweiligen Typs (siehe Bild 7)	Einschalen	48,0 ¹	ARH Tabellen "System-schalung Decken" (2015), S. 20 = 0,14 Std/m ²	- Wert enthält Transport, Einschalen und Ausschalen - einfacher Grundriss ohne Innenwände (h = 2,50 - 3,50 m) - Dokadek 30 vom Boden aus = 0,14 Std/m ²
					89,2 ²	ARH Tabellen "System-schalung Decken" (2015), S. 76 = 0,26 Std/m ²	- Wert enthält Transport, Einschalen und Ausschalen - einfacher Grundriss ohne Innenwände (h = 2,50 - 3,50 m) - PERI Skydeck Fallkopf = 0,26 Std/m ²
					2,1	ARH Tabellen "Rahmen-schalung Wände/Stützen" (2013), S. 39 = 0,26 Std/m ²	- einhäufig - h bis 2,70 m - MAXIMO Wandschalung - 8 m ² Randschalung geschätzt
Bewehren	57,5	gemessen (3,2 Std./Element)	-	Bewehren	67,5	ARH Tabellen "Bewehrungsarbeiten" (2001), S. 19 Stabstahl (12 mm) = 18,5 Std/t S. 21 Matte (über 10 kg/m ²) = 6,95 Std/t	- Wert enthält transportieren, verteilen und flechten - Bewehrungsgehalt 0,1 t/m ³ - Annahme: 75 % Matte = 15 kg/m ² - Annahme: 25 % Stab = 5 kg/m ²
Betonage	13,0	gemessen (0,72 Std/Element)	- Wert auf Grundlage einer Kolonne mit 6 AK - rechnerisch angepasst an 3 AK (analog ARH)	Betonage	20,0	ARH Tabellen "Betonarbeiten" (2001), S. 22 = 0,27 Std/m ²	- Wert gilt für Kolonne mit 3 AK und enthält auch Verdichten - bewehrte Decke (d = 10 - 20 cm)
Ausschalen	2,7	gemessen (0,15 Std/Element)	-	Ausschalen	-	-	in Einschalen enthalten
Nachbearbeitung	18,0	gemessen (1,0 Std/Element)	-	Nachbearbeitung	-	-	in Betonage enthalten
Verpackung	5,0	gemessen (0,28 Std/Element)	Mittelwert aus Verschweißen mit Folie 0,38 Std/Element und Abdecken mit Plane 0,17 Std/Element				
Zwischenlagerung	4,5	geschätzt (0,25 Std/Element)	auf Basis von Beobachtungen				
Montage auf der Baustelle	21,6	geschätzt (1,2 Std/Element)	(siehe Text) Aufwand für Teilprozesse zusammengefasst (gemessen/geschätzt)				
Fugenverguss	1,8	ARH Tabellen "Betonarbeiten" (2001), S. 26 (Fugenverguss 0,48 Std/m ³ , Abziehen 0,06 Std/m ³)	- Betonage per 250 l Krankübel - bewehrte Decke (d = bis 20 cm) - Menge mit 0,47 m ³ Beton geschätzt				
Summe	154,7			Summe ¹	137,6		
				Summe ²	178,8		

Bild 7 Quantitative Gegenüberstellung des Stundenaufwands für die Vorfertigung und die traditionelle Baustellenproduktion am Beispiel eines ausgewählten Stahlbeton-Deckenabschnitts [11–15]

Sowohl die beiden letztgenannten Werte als auch sämtliche Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren bei der traditionellen Baustellenproduktion (rechte Seite der Tabelle in **Bild 7**) entstammen den ARH-Tabellen. Dabei ist zu beachten, dass Aufwandswerte von sehr vielen

Einflüssen abhängig sind und Literaturwerte (wie die ARH-Tabellen) eine große Auswahl an Aufwandswerten für spezifische Randbedingungen zur Verfügung stellen. Demzufolge müssen für diesen quantitativen Vergleich zahlreiche Annahmen getroffen werden, die jeweils in der rechten Spalte der Tabelle erläutert werden

Dieses Spektrum der abweichenden Aufwandswerte wird im Ergebnis der Berechnung deutlich. Für die Vorfertigung ergibt sich eine Dauer für die Herstellung des 343 m² großen Deckenabschnitts von 154,7 Stunden, während die Dauer der traditionellen Ort betonproduktion in zwei Ergebnissen angegeben wird. Auf der Basis eines äußerst niedrigen Aufwandswerts für die Schalarbeiten von 0,14 Std/m² ergibt sich eine Dauer von insgesamt 137,6 Stunden, was erkennbar kürzer ist als beim Einsatz von Vorfertigung. Aus dem eher höheren Aufwandswert von 0,26 Std/m² resultiert eine Gesamtdauer von 178,8 Stunden. Damit würde die Baustellenfertigung deutlich länger dauern als die Vorfertigung und Montage der gleichen Deckenfläche. Die Abweichung zwischen den Aufwandswerten ist hierbei auf die Wahl der jeweiligen Systemschalung zurückzuführen.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Dauern sämtlicher Teilprozesse, die gemäß der Beispielrechnung in der Vorfertigung stattfinden kürzer ausfallen, als auf der Baustelle. Wohingegen die zusätzlich erforderlichen Tätigkeiten, wie Verpackung, Lagerung und Montage die Dauer des Gesamtprozesses stark verlängern. Dieser Zusammenhang wurde bereits im Rahmen der qualitativen Ableitung der Auswirkungen von Vorfertigung auf die Arbeitsproduktivität in Kapitel 3 prognostiziert.

Durch das Ergebnis der quantitativen Gegenüberstellung in diesem Kapitel wird die zu Beginn dieser Veröffentlichung geäußerte Kritik an der üblichen und undifferenzierten Herstellung eines automatisch positiven Zusammenhangs zwischen der Vorfertigung und der Arbeitsproduktivität bestätigt.

Aus der isolierten Betrachtung der Vorfertigung als Verlagerung von Fertigungsprozessen in eine stationäre Produktion auf der Grundlage eines direkten Prozessvergleichs geht der vermeintliche Vorteil (noch) nicht eindeutig hervor. Infolge der Ausführung von Teilprozessen in der stationären Produktion können zwar Lohnstunden für die unmittelbare Aufgabenbearbeitung eingespart werden. Dieser Vorteil wird jedoch durch die umfangreichen zusätzlichen Tätigkeiten möglicherweise wieder eliminiert. Weiterhin ermöglicht der effiziente Einsatz von Systemschalung auf der Baustelle eine ebenfalls erkennbare Steigerung der Arbeitsproduktivität.

Letztlich ergibt sich die Arbeitsproduktivität aus einem komplexen Zusammenwirken zahlreicher Einflussfaktoren, die bei der Analyse von potentiellen Produktivitätstreibern zu berücksichtigen sind. Einen tendenziell positiven Einfluss haben grundsätzlich ebenfalls Standardisierungs- und Automatisierungsbestrebungen, die in der Praxis eng mit der Vorfertigung verbunden sind demnach zur Generierung von Produktivitätswachstum beitragen.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Veröffentlichung galt es die Frage zu beantworten, ob die Vorfertigung allein zu einer Steigerung der Arbeitsproduktivität führen kann, wie es in zahlreichen Literaturquellen behauptet wird (siehe Kapitel 2) und welche konkreten Aspekte einen potentiell positiven oder negativ Einfluss haben.

Die qualitative Ableitung möglicher Auswirkungen anhand eines bestehenden Wirk- und Erklärungsmodells in Kapitel 3 ergab diesbezüglich ein überwiegend positives Bild. Ein Großteil des Stundenaufwands kann durch die Verlagerung von Fertigungsprozessen in eine stationäre Produktion tendenziell verringert werden. Lediglich im Bereich der kapazitiven Auslastungsverluste sowie bei zusätzlichen Tätigkeiten wurden potentiell negative Auswirkungen identifiziert. Als zentrale Einflussfaktoren stellten sich die Witterungsunabhängigkeit sowie die Standortgebundenheit der Arbeitsplätze heraus.

Durch das Ergebnis der quantitativen Gegenüberstellung des konkreten Stundenaufwands anhand eines beispielhaften Deckenabschnitts in Kapitel 4 wurde die Kritik am häufig automatisch hergestellten positiven Zusammenhang zwischen der Vorfertigung und der Arbeitsproduktivität bestätigt. Die Berechnung ergab keinen eindeutigen Zeitvorteil durch den Einsatz von Vorfertigung. Je nach Wahl der entsprechenden Aufwandswerte aus der Literatur fiel die Dauer des Gesamtprozesses im Rahmen der Vorfertigung und Montage entweder kürzer oder sogar länger als die Ort betonproduktion auf der Baustelle aus.

Es zeigt sich, dass die generelle Vorstellung der Vorfertigung als Produktivitätstreiber differenziert zu betrachten ist. Die Möglichkeiten zum Einsatz von Vorfertigung in einem Bauprojekt sind so komplex, wie die Einflussfaktoren auf die Produktivität. Nichtsdestotrotz birgt die Verlagerung von Fertigungsprozessen von der Baustelle in eine stationäre Produktion großes Potential.

6 Literatur

- [1] *Bertram, N.; Fuchs, S.; Mischke, J. et al.*: Modular construction – From projects to products. Capital Projects & Infrastructure Ausgabe Juni 2019.
- [2] *Grabner, C.; Glöckner, R.; Barck, N. et al.*: Produktivitätsanalyse 4.0. In: *Matt, D.* (Hrsg.): KMU 4.0 - digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen, Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation. GITO, Berlin, 2018, S. 113-132.
- [3] *Naoum, S.G.*: Factors influencing labor productivity on construction sites. In: *International Journal of Productivity and Performance Management* 65 (2016), Heft 3, S. 401-421.
<https://doi.org/10.1108/IJPPM-03-2015-0045>.

- [4] *Eastman, C.M.; Sacks, R.:* Relative Productivity in the AEC Industries in the United States for On-Site and Off-Site Activities. *In: Journal of Construction Engineering and Management* 134 (2008), Heft 7, S. 517-526. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:7\(517\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:7(517)).
- [5] *Barbosa, F.; Woetzel, J.; Mischke, J. et al.:* Reinventing Construction – A Route to higher Productivity Ausgabe Februar 2017.
- [6] *Behrens, S.; Fricke, A.; Kumlehn, F. et al.:* Produktivität im Bauhauptgewerbe – Potenziale für die Praxis Ausgabe 2022.
- [7] *Reineke, B.; Schäfer, A.; Schott, V. et al.:* Ausbaufähig – Wie die Baubranche ihre Potenziale entfalten kann Ausgabe April 2023.
- [8] *Glöckner, R.; Benter, M.; Grabner, C. et al.:* Modellierung der Arbeitsproduktivität. Working Paper. IPMT der TU Hamburg, Hamburg Ausgabe 2017.
- [9] *Bärthel, J.:* Industrielles Bauen – Leitfaden für KMU-Geschäftsführer. ETH Zürich. Vdf, Hochschulverlag AG an der ETH, Zürich, 2002.
- [10] *Girmscheid, G.:* Context of Industrialisation - Introduction. *In: Girmscheid, G.; Scheublin, F. (Hrsg.):* New Perspective in Industrialisation in Construction: A State-of-the-Art Report. Institut für Bauplanung und Baubetrieb. Eigenverlag des IBB der ETH Zürich, Zürich (Schweiz), 2010, S. 3-13.
- [11] *Institut für Zeitwirtschaft und Betriebsberatung Bau (Hrsg.):* Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau – Bewehrungsarbeiten, Beton- und Stahlbetonarbeiten Heft 2, ztv Zeittechnik-Verlag, Neu-Isenburg, 2001.
- [12] *Institut für Zeitwirtschaft und Betriebsberatung Bau (Hrsg.):* Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau – Betonarbeiten, Beton- und Stahlbetonarbeiten Heft 3, ztv Zeittechnik-Verlag, Neu-Isenburg, 2001.
- [13] *Institut für Zeitwirtschaft und Betriebsberatung Bau (Hrsg.):* Arbeitszeit-Richtwerte Tabelle Hochbau – Betonarbeiten, Beton- und Stahlbetonarbeiten Heft 3, ztv Zeittechnik-Verlag, Neu-Isenburg, 2001.
- [14] *Institut für Zeitwirtschaft und Betriebsberatung Bau (Hrsg.):* Handbuch Arbeitsorganisation Bau – Rahmenschalung Wände/Stützen, Scharbeiten, ztv Zeittechnik-Verlag, Neu-Isenburg, 2013.
- [15] *Institut für Zeitwirtschaft und Betriebsberatung Bau (Hrsg.):* Handbuch Arbeitsorganisation Bau – Systemschalung Decken, Scharbeiten, ztv Zeittechnik-Verlag, Neu-Isenburg, 2015.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

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

DOI: 10.17185/duepublico/79161

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20231017-162756-3

In: Tagungsband zum 32. BBB-Assistent:innentreffen 2023: 04.10.2023 - 06.10.2023,
Universität Duisburg-Essen.



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