

Bericht

des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung

Technikfolgenabschätzung (TA)

Innovative Technologien, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort des Ausschusses	5
Zusammenfassung	9
1 Einleitung	23
2 Rahmenbedingungen für Innovation in der Bauwirtschaft	27
2.1 Struktur und Markt der Bauwirtschaft	27
2.1.1 Definitionen und Begriffe im Kontext Bau.....	28
2.1.2 Konjunkturelle und strukturelle Entwicklungstendenzen der deutschen Bauwirtschaft	29
2.1.3 Die Betriebs- und Beschäftigungsstruktur des Baugewerbes	30
2.2 Die Produktivität der Bauwirtschaft	33
2.2.1 Produktivität – Definition, Messung und Aussagekraft.....	33
2.2.2 Die Arbeitsproduktivität als Maß für Effizienz	34
2.2.3 Die Arbeitsproduktivität des Baugewerbes im europäischen Vergleich.....	37
2.3 Das Innovationssystem Bauwirtschaft	40
2.3.1 Spezifische systemische und strukturelle Rahmenbedingungen	41
2.3.2 Innovationshemmende und -förderliche Faktoren	43
2.3.3 Spezifische Merkmale des Innovationssystems Zement.....	45

	Seite
2.4	Fazit 46
3	Digitales Planen und Bauen mittels BIM 49
3.1	BIM: Grundlagen und Potenziale 49
3.1.1	Was ist BIM? Grundidee und Grundbegriffe..... 49
3.1.2	Potenziale..... 52
3.2	Stand der BIM-Umsetzung in Deutschland 56
3.3	Implikationen und Voraussetzungen des BIM-Einsatzes 60
3.3.1	Investitionsbedarf und KMU 63
3.3.2	Paradigmenwechsel in der Planungs- und Baukultur?..... 65
3.4	Produktivitätssteigerung durch BIM – Stand des Wissens 68
3.5	Fazit und Handlungsfelder..... 74
4	Additive Fertigungsverfahren 77
4.1	Klassifizierung von additiven Verfahren 77
4.2	Additive Fertigung mit Beton 79
4.2.1	Verfahren im 3-D-Betondruck..... 80
4.2.2	Anforderungen an den 3-D-Beton..... 82
4.2.3	3-D-Maschinenkonzept..... 85
4.2.4	Die Bewehrung (Verstärkung) von 3-D-Beton..... 88
4.2.5	Anwendungspotenziale und -perspektiven des 3-D-Betondrucks..... 90
4.3	Additive Fertigung mit anderen Materialien..... 92
4.3.1	Metalle 92
4.3.2	Kunststoffe..... 93
4.3.3	Sonstige Materialien 93
4.4	Fazit und Handlungsfelder..... 94
5	Serielles und modulares Bauen 97
5.1	Grundlagen..... 98
5.2	Baumaterialien im modernen Fertigteilbau..... 100
5.2.1	Betonfertigteilproduktion..... 101
5.2.2	Holzmodulbau..... 103
5.2.3	Stahlmodulbau 106
5.3	Potenziale und Herausforderungen des Fertigteilbaus 107
5.4	Fazit und Handlungsfelder..... 109
6	Automatisierte Baumaschinen 111
6.1	Rahmenbedingungen für Innovationen im Baumaschinensektor 111
6.2	Maschinenteknik im Bauprozess..... 114
6.2.1	Vermessung 115

	Seite
6.2.2	Tiefbau..... 117
6.2.3	Straßenbau 120
6.2.4	Hochbau..... 122
6.3	Wichtige Grundlagentechnologien für die Automatisierung von Baumaschinen: Stand und Perspektiven 126
6.3.1	Navigation und Positionsbestimmung 126
6.3.2	Personen- und Objekterkennung..... 127
6.3.3	Digitale Datenübertragung: Flottenmanagement und -orchestrierung 128
6.3.4	Antriebstechnik..... 129
6.3.5	Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS)..... 131
6.4	Fazit und Handlungsfelder..... 132
7	Innovative Technologien, Prozesse und Produkte im Baugewerbe aus Umweltsicht 135
7.1	Nachhaltiges Bauen – ökologische Dimension..... 136
7.2	BIM..... 137
7.2.1	Die Ökobilanz als Basis für BIM..... 138
7.2.2	Herausforderungen und Grenzen der Ökobilanzierung 139
7.3	Additive Fertigung..... 140
7.3.1	Konventioneller Beton..... 140
7.3.2	3-D-Beton 144
7.4	Modulares und serielles Bauen 147
7.5	Automatisierte Baumaschinen 151
7.6	Fazit und Handlungsfelder..... 154
8	Bauen 4.0 – übergreifende Aspekte und Handlungsfelder..... 157
8.1	Forschung und Entwicklung sowie Normung..... 158
8.2	Infrastrukturelle Rahmenbedingungen..... 159
8.3	Fachkräftesicherung und Ausbildungsbedarfe..... 160
8.4	Schlussbemerkung 162
9	Literatur 165
9.1	In Auftrag gegebene Gutachten 165
9.2	Weitere Literatur..... 165
10	Anhang..... 189
10.1	Abbildungen..... 189
10.2	Tabellen 190
10.3	Kästen 190
10.4	Abkürzungen..... 191

Vorwort des Ausschusses

Der große Bedarf an bezahlbarem Wohnraum und der vielfach als nicht ausreichend eingeschätzte Wohnungsbestand stellen eine große nationale Herausforderung dar, zu deren Lösung eine leistungsfähige Bauwirtschaft unabdingbar ist. Grundsätzlich zählt die Bauwirtschaft zu den sehr großen Wirtschaftssektoren – Baumaßnahmen haben rund zehn Prozent Anteil am deutschen Bruttoinlandsprodukt, und das Baugewerbe trägt mit seinen ca. 2 Millionen Beschäftigten rund 5 Prozent zur gesamtwirtschaftlichen Bruttowertschöpfung bei. Doch obwohl die Baubranche wegen der stark gestiegenen Nachfrage nach Wohnraum einen konjunkturellen Aufschwung verzeichnet, ist es trotz vielfältiger politischer Maßnahmen bislang nicht gelungen, die Wohnungsbautätigkeit in ausreichendem Maße anzukurbeln. Neben den massiven Kapazitätsengpässen durch Fachkräftemangel ist auch die vergleichsweise niedrige Produktivität der Baubranche hierfür verantwortlich.

Es besteht daher weitgehender Konsens, dass die Innovationstätigkeit und -bereitschaft im deutschen Bauwesen deutlich steigen muss, um die gesellschaftlichen Erwartungen in den Bereichen Wohnungs- bzw. Infrastrukturbau – Bereitstellung von ausreichendem Wohnraum zu vertretbaren Kosten sowie Erhaltung und Ausbau der Infrastruktur als Voraussetzung für Mobilität und Wohlstand – mit den begrenzt verfügbaren Ressourcen erfüllen zu können. Vor diesem Hintergrund hat der Deutsche Bundestag das TAB mit der Durchführung des TA-Projekts »Innovative Technologien, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft« beauftragt.

Der vorliegende Bericht bietet – neben einem Überblick über die sektorspezifischen Rahmenbedingungen – eine vertiefte Analyse relevanter Trends in Bezug auf Technologie-, Produkt- und Prozessinnovationen in der Baubranche, insbesondere im Hinblick auf die Bereiche Digitalisierung, additive Fertigung, serielles und modulares Bauen sowie automatisierte Baumaschinen und Robotik. Die Bandbreite reicht von digitalem Planen und Bauen mit Building Information Modeling (BIM), dem Einsatz hochspezialisierter Baumaschinen und unterstützender Robotik bei der Bauausführung bis hin zu innovativen Fertigungsverfahren für Bauteile u. a. mittels 3-D-Druck und Hightechwerkstoffen. Beschrieben werden besonders ambitionierte Initiativen für die zunehmende Vernetzung von Maschinen und Assistenzsystemen oder zur Generierung virtueller Bauwerkmodelle, um sämtliche Prozessabläufe eines Bauvorhabens über übergeordnete Managementsysteme zu realisieren (Bauen 4.0). Auf das wichtige Thema Nachhaltigkeit wird in einem eigenen Kapitel eingegangen und übergreifende Handlungsoptionen werden gesondert diskutiert.

Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem TAB-Arbeitsbericht eine umfangreiche und fundierte Informationsbasis für die parlamentarische Befassung mit diesem hochaktuellen forschungs-, technologie- und wirtschaftspolitischen Zukunftsthema.

Berlin, den 6. April 2022

Kai Gehring
Vorsitzender

Dr. Holger Becker
Berichterstatter

Lars Rohwer
Berichterstatter

Laura Kraft
Berichterstatterin

Prof. Dr. Stephan Seiter
Berichterstatter

**Prof. Dr.-Ing. habil.
Michael Kaufmann**
Berichterstatter

Ralph Lenkert
Berichterstatter

Christoph Kehl
Matthias Achternbosch
Christoph Revermann

**Innovative Technologien,
Prozesse und Produkte
in der Bauwirtschaft**

Endbericht zum TA-Projekt

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Zusammenfassung

Die Bauindustrie zeichnet sich im Vergleich zu anderen Branchen durch eine verhältnismäßig niedrige Produktivitätsentwicklung und eine geringe Innovationstätigkeit aus. Die Art und Weise, wie Bauwerke errichtet werden, ist in den letzten Jahrzehnten im Wesentlichen gleich geblieben. Mauerwerk und Beton bilden nach wie vor die hauptsächlichen Baustoffe. Die Planung findet zwar inzwischen am Computer statt, die elektronischen Planunterlagen werden jedoch meist weiterhin wie Papierdokumente behandelt und zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten separat ausgetauscht. Auch an der auf den Baustellen eingesetzten Maschinenteknik hat sich in den letzten 10 bis 15 Jahren kaum Grundlegendes geändert.

Es besteht daher weitgehender Konsens, dass die Innovationstätigkeit und -bereitschaft im deutschen Bauwesen deutlich steigen müssen, um die gesellschaftlichen Erwartungen in den Bereichen Wohnungs- bzw. Infrastrukturbau – Bereitstellung von ausreichendem Wohnraum zu vertretbaren Kosten sowie Erhaltung und Ausbau der Infrastruktur als Voraussetzung für Mobilität und Wohlstand – mit den begrenzt verfügbaren Ressourcen erfüllen zu können. Von der Digitalisierung und Automatisierung der Bauprozesse werden diesbezüglich wesentliche Impulse erwartet.

Der TAB-Arbeitsbericht gibt vor diesem Hintergrund einen Überblick über relevante Trends bei den Technologie-, Produkt- und Prozessinnovationen in der Baubranche, insbesondere in den Bereichen digitales Planen und Bauen mit Building Information Modeling (BIM), additive Fertigung, serielles und modulares Bauen sowie automatisierte Baumaschinen und Robotik.

Rahmenbedingungen für Innovation in der Bauwirtschaft

Die Bauwirtschaft zählt zu den sehr großen Wirtschaftssektoren. 2018 hatten Baumaßnahmen rund 10% Anteil am deutschen Bruttoinlandsprodukt und das Baugewerbe trug mit seinen knapp 2 Mio. Beschäftigten rund 5% zur gesamtwirtschaftlichen Bruttowertschöpfung bei. Aufgrund einer in den letzten Jahren stark gestiegenen Nachfrage nach Wohnraum konnte die Baubranche zwar einen konjunkturellen Aufschwung verzeichnen, dennoch ist es trotz vielfältiger politischer Maßnahmen in der jüngeren Vergangenheit bislang nicht gelungen, die Wohnungsbautätigkeit in tatsächlich ausreichendem Maße anzukurbeln. Neben Kapazitätsengpässen durch Fachkräftemangel wird dafür auch die anhaltend niedrige Produktivität der Baubranche verantwortlich gemacht:

- › Die *Fachkräftesituation* in der Baubranche wird von vielen Expert/innen als schwierig eingeschätzt. Seit 2011 ist die Zahl der Erwerbslosen in der Branche um 40% gesunken; 2018 waren rund 70.000 offene Stellen nicht besetzt. Aufgrund der demografischen Entwicklung gehen zudem in den nächsten Jahren mehr Arbeitnehmer/innen aus dem Baubereich in Rente, als Nachwuchs nachrückt. Die Branche versucht seit einigen Jahren, dem Bedarf durch eine verstärkte Rekrutierung von Arbeitskräften aus dem Ausland zu begegnen. Bei einer weiter steigenden Baunachfrage ist dennoch damit zu rechnen, dass sich der Fachkräftemangel verschärft und zu Kapazitätsengpässen führen wird, wenn nicht rechtzeitig gegengesteuert wird.
- › In mehreren Studien wird der deutschen Bauwirtschaft eine vergleichsweise niedrige *Produktivitätsentwicklung* in den letzten Jahrzehnten bescheinigt. Demzufolge verharrte hier die Bruttowertschöpfung je Erwerbstätigenstunde von 2000 bis 2017 auf einem relativ niedrigen Niveau von ca. 25 Euro, während die Arbeitseffizienz der Gesamtindustrie jährlich um durchschnittlich 1% stieg und 2017 mit 42,50 Euro einen Wert erreichte, der um 65% über dem der Baubranche lag. Im Unterschied etwa zum Fahrzeug- und Maschinenbau, bei denen ein Großteil der Wertschöpfung über den Einsatz des Faktors Kapital generiert wird, ist es der deutschen Bauwirtschaft offenbar nicht gelungen, ihre Bruttowertschöpfung von der Arbeitsintensität zu entkoppeln und die Wertschöpfung je Arbeitsstunde zu steigern.

Das Baugewerbe gehört in Bezug auf seine Betriebsstruktur zu den außergewöhnlich fragmentierten Wirtschaftsbereichen. Ähnlich dem Gastgewerbe zählt es zu den Branchen, die von kleineren und mittleren Unternehmen (KMU) dominiert werden. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes erzielten KMU im Baugewerbe 2017 rund 83% des Umsatzes und beschäftigten rund 91% der tätigen Personen. An Bauprojekten sind zudem sehr unterschiedliche Akteure beteiligt. In erster Hinsicht sind dies neben den bauausführenden Industrie- und Handwerksbetrieben die Planer/innen, die Zulieferer von Maschinen, Werkzeugen und Baumaterialien sowie die Baustoffhersteller. Dies führt zu Segmentierungen in der Wertschöpfungskette, sektoral und regional

nach Sparten und Märkten sowie temporal bezogen auf das Management der Planung und Bauausführung, was sich wiederum ungünstig auf die Diffusion von neuem Wissen und technologischen Innovationen in die Betriebe auswirkt. Hinzu kommen weitere strukturelle Merkmale der Bauwirtschaft, die sich eher hemmend auf die Innovationstätigkeit auswirken:

- › Im Gegensatz zu anderen Industriebranchen, wie z.B. der Stahl- oder der Automobilindustrie, stellt die Bauwirtschaft kein relativ gleichbleibendes Portfolio an Produkten her. Praktisch jedes errichtete Bauwerk ist im Prinzip ein Unikat, das seine ganz spezifische Planung und Ausführung erfährt. Folglich kann das bauausführende Gewerbe durch sein fertiges Produkt selbst kaum Nachfrage erzeugen, diese hängt vielmehr von äußeren, nicht beeinflussbaren Faktoren ab (z. B. dem Wohnraumbedarf).
- › Auch produziert die Bauwirtschaft nicht an festen Standorten. Die Baustellenfertigung ist mit Ausnahme der Vorfertigung von Komponenten stets von den spezifischen örtlichen Verhältnissen abhängig. Dadurch werden die Möglichkeiten einer standardisierten Fertigung bzw. Rationalisierung stark reduziert.
- › Zudem kann im Bauhauptgewerbe kaum auf Lager produziert werden (Ausnahme Fertigbauteilherstellung), sodass bei Anziehen der Konjunktur die Produktion nicht über den Abbau des Lagerbestands, sondern über den Einsatz zusätzlicher Arbeitskräfte erfolgen muss, was im Falle eines Fachkräftemangels zu Kapazitätsengpässen führen kann.
- › Schließlich ist die Herstellung eines Bauwerks in besonderem Maße durch unzählige gesetzliche Vorschriften und Regelwerke bestimmt. Die Unterschiede zur Industrieproduktion sind markant: Es werden nicht bestimmte Typen von Produkten zugelassen, sondern jeder Bau muss separat abgenommen werden.

Alle diese Modalitäten führen dazu, dass der Bausektor durch ein vergleichsweise geringes Innovationsniveau gekennzeichnet ist. Symptomatisch sind etwa die geringen Aufwendungen der Branche für Forschung und Entwicklung (2018: 82,2 Mio. Euro). Der Lowtechstatus trifft ebenfalls auf die Baustoffindustrie zu, die im Prinzip seit Jahrzehnten am bestehenden System der Baustoffe (z.B. Portlandzementklinker für Zement) festhält und meist nur inkrementelle Innovationen hervorbringt. All dies macht deutlich, dass hinsichtlich der Umsetzungsfähigkeit von Innovationen die strukturellen und systemischen Besonderheiten der Bauwirtschaft maßgeblich mit zu berücksichtigen sind.

Digitales Planen und Bauen mittels BIM

Beim BIM handelt es sich um eine softwarebasierte Arbeits- und Planungsmethode, die auf Grundlage digitaler Gebäudemodelle durchgeführt wird. Ein digitales Gebäudemodell bündelt idealerweise alle wesentlichen Informationen, die für die Planung, den Bau und die nachträgliche Nutzung eines Bauwerks erforderlich sind. Damit wird das Ziel verfolgt, ein Bauwerk zunächst komplett digital zu planen, anschließend modellbasiert zu optimieren (z.B. mit Blick auf Bauabläufe, Lebenszykluskosten, Nachhaltigkeitsaspekte) und erst dann, wenn der Entwurfs- und Planungsprozess komplett abgeschlossen ist, mit dem Bau zu beginnen. Welche modellbasierten Optimierungsmöglichkeiten jeweils bestehen, hängt davon ab, welche Informationsebenen, auch als *Dimensionen* bezeichnet, in ein digitales Bauwerksmodell integriert werden.

Einer der hauptsächlichen Unterschiede des BIM-Ansatzes zur herkömmlichen Vorgehensweise besteht darin, dass alle relevanten Projektdaten in Echtzeit aktualisiert werden. Planunterlagen werden nicht mehr auf Papier separat vorgehalten und erst bei Bedarf ausgetauscht – mit der Gefahr von Informations- und Reibungsverlusten –, sondern alle Informationen werden kontinuierlich in eine zentrale Datenbank eingegeben. Auf diese Weise lassen sich Planungsfehler durch Kollisionsprüfungen frühzeitig erkennen und insbesondere kosten- und zeitintensive rückwirkende Planungsänderungen vermeiden. Neben reduzierten Planungs- und Ausführungszeiten sowie einer genaueren Kalkulation der Planungs- und Ausführungskosten erhofft man sich davon auch eine verbesserte Planungs- und Ausführungsqualität und somit insgesamt Produktivitätsgewinne, die speziell den Wohnungsbau beschleunigen könnten.

Stand der BIM-Umsetzung in Deutschland

Im »Digitalisierungsindex Mittelstand« (der im Auftrag der Deutschen Telekom erstellt wird) belegen die mittelständischen Unternehmen der Bauwirtschaft im branchenübergreifenden Vergleich regelmäßig einen der hin-

teren Plätze. Passend zu diesem niedrigen Digitalisierungsniveau befindet sich auch die BIM-Nutzung in hiesigen Unternehmen auf einem relativ niedrigen Niveau. Korrespondierend zur noch geringen Verbreitung von BIM in der deutschen Baupraxis setzte hierzulande die staatliche Förderung der BIM-Nutzung erst verhältnismäßig spät ein. Als erste staatliche Maßnahme wurde Ende 2015 vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) der Stufenplan »Digitales Planen und Bauen« vorgelegt. Ziel war die schrittweise Einführung von BIM in allen Infrastrukturprojekten des Bundes bis 2020. Der BMVI-Stufenplan leistete einen wichtigen Beitrag zum digitalen Fortschritt im Infrastrukturbereich. Allerdings besteht im Hochbaubereich aktuell kein analoger Plan zur verpflichtenden Einführung der BIM-Methodik. Im internationalen Vergleich hinkt Deutschland damit anderen Ländern hinterher, die BIM teilweise wesentlich früher und stärker forciert haben.

In den letzten Jahren hat das Thema BIM auch in Deutschland deutlich an Aufmerksamkeit gewonnen und die BIM-Implementierung wird auf verschiedenen Ebenen vorangetrieben. So beschäftigen sich inzwischen zahlreiche Initiativen und Einrichtungen mit der praktischen Umsetzung der BIM-Methode. Hervorzuheben ist etwa die 2015 gegründete planen-bauen 4.0 GmbH, die von allen relevanten Verbänden und Kammerorganisationen getragen wird und sich als Plattformgesellschaft und zentraler Gesprächspartner in den Bereichen Forschung, Regelsetzung und Marktimplementierung von BIM versteht. Um KMU sowie Handwerksbetriebe bei der Digitalisierung und beim Einstieg in BIM zu unterstützen, wurde 2017 (gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – BMWi) das Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Planen und Bauen gegründet. Eine überaus wichtige Rolle spielt zudem der beim Verein Deutscher Ingenieure (VDI) eingerichtete BIM-Koordinierungskreis, der die nationale Richtlinienarbeit vorantreibt, die seit 2013 in Form der Richtlinienreihe VDI 2552 »Building Information Modeling (BIM)« langsam Gestalt annimmt.

Produktivitätssteigerung durch BIM? Stand des Wissens

Sowohl international als auch hierzulande wurde BIM bislang vor allem im Infrastrukturbau erprobt. Eine eindeutige, auch quantitativ fundierte Nutzenbewertung von BIM insbesondere für kleinere Projekte, wie sie gerade für den Wohnungsbau typisch sind, steht hingegen noch aus. Die Vorteile der Methodik wurden bisher hauptsächlich auf qualitativer Ebene begründet.

Da gerade KMU möglichst konkrete Kosten-Nutzen-Abschätzungen benötigen, um die finanziellen Risiken der langwierigen und kostenintensiven Umstellung auf die neue Planungsmethode abwägen zu können, wurde der Stand des Wissens über den Nutzen von BIM ausgewertet und zusammengefasst. Dabei zeigte sich, dass zwar etliche Hinweise vorliegen, dass BIM sich im Einzelnen positiv auf relevante Projektleistungsdaten (Änderungsaufträge und erforderliche Nacharbeiten, Planungs- und Bauzeit etc.) auswirken kann. Jedoch gibt es nur sehr wenige konkrete Forschungsarbeiten, sodass auf Basis der vorliegenden Studien keine eindeutige Bewertung der Kosten-Nutzen-Effekte der BIM-Anwendung möglich ist. Angesichts der Heterogenität der Bauprojekte und der Vielzahl der (teils schwer quantifizierbarer menschlicher) Faktoren, die sich auf den BIM-Erfolg auswirken (vor allem Projektgröße, Kompetenzen der Beteiligten, kommunikative und organisatorische Aspekte), fehlt es bislang an ausreichend differenzierten, aussagekräftigen und verallgemeinerbaren Daten. Der BIM-Erfolg ist nicht zuletzt auch deshalb schlecht bestimmbar, weil die Vergleichsbasis – also die herkömmliche Planungsmethode – in keiner Weise standardisiert ist und deshalb sehr variable Ergebnisse aufweist. Die Forschungsarbeiten weisen zudem darauf hin, dass unterschiedliche Projektbeteiligte (Bauherr/innen, Planer/innen, Bauunternehmen) bezüglich der BIM-Vorteile zu sehr unterschiedlichen Einschätzungen kommen.

Insgesamt lässt sich daraus schließen, dass der Nutzen von BIM differenziert zu betrachten ist und von zahlreichen Faktoren abhängt (Projektgröße und -art, BIM-Reife des Unternehmens, Kompetenzen der Mitarbeiter/innen etc.). Die Größenordnung der in der Praxis erreichbaren Nutzeneffekte ist voraussichtlich nur einzelfallbezogen beurteilbar, sodass zur Wirtschaftlichkeit eines BIM-Einsatzes keine pauschalen Aussagen möglich sind. Zur Klärung der spezifischen Anwendungspotenziale im Wohnungsbau sind somit dringend weitere Forschungen und vor allem eine einheitliche Bewertungsmethodik notwendig.

Implikationen und Voraussetzungen des BIM-Einsatzes

Die erhofften Vorteile von BIM lassen sich wohl nur dann realisieren, wenn die Methode möglichst durchgängig im gesamten Planungs- und Bauprozess (und ggf. darüber hinaus) von allen Beteiligten eingesetzt wird. Den BIM-Prozess entsprechend zu implementieren, ist eine äußerst herausfordernde Aufgabe, insbesondere bei grö-

ßeren Projekten mit zumeist zahlreichen beteiligten Akteuren. Die Hürden liegen dabei nicht nur im technischen Bereich (Software und Datenaustausch), sondern vor allem bei der Prozessorganisation und dem Informationsmanagement. Denn infolge der kollaborativen Arbeit am digitalen Bauwerksmodell von Projektbeginn an wird die lineare Abfolge einzelner Bauphasen – Planung, Bauausführung, Betrieb – aufgehoben, insofern Know-how aus der Ausführungs- bereits in die Entwurfs- und Planungsphase integriert wird. Dies erfordert nicht nur ein Umdenken und eine z. T. radikale Abkehr von der bisherigen Arbeitsweise bei allen Projektbeteiligten sowie die Bereitschaft, sich auf ein neues integratives Arbeitskonzept einzulassen, sondern es müssen auch Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten neu definiert und zugeordnet werden. Entsprechend groß ist der Standardisierungsbedarf in Bezug auf alle Aspekte von BIM – von technischen Schnittstellen über Grundlagenthemen (z. B. Begriffs- und Prozessdefinitionen) bis hin zu Anwendungsvorgaben (Anforderungen an den Datenaustausch und das Datenmanagement, erforderliche Qualifikationen).

Besondere Herausforderungen bei der Einführung von BIM in der deutschen Bauwirtschaft und speziell im privaten Wohnungsbau ergeben sich zum einen durch die starke Fragmentierung und die hohe Anzahl an KMU sowie zum anderen durch die strikte, auch vergaberechtlich verankerte Trennung von Planungs- und Ausführungsleistungen:

- › Aufseiten der einstiegswilligen Unternehmen ist nicht nur der Aufbau einer digitalen Infrastruktur (Hard- und Software) nötig, sondern vor allem die intensive Schulung des Personals zum Aufbau der erforderlichen BIM-Expertise, was mit erheblichen Investitionskosten einhergehen kann. Dadurch sind besonders kleinere Unternehmen bei der BIM-Implementierung u. a. durch ihre geringeren finanziellen und personellen Kapazitäten mit großen Herausforderungen konfrontiert. KMU benötigen deshalb geeignete Rahmenbedingungen, z. B. in Form von Beratungsmöglichkeiten und Weiterbildungs- und Schulungsangeboten, um den digitalen Umstieg organisatorisch, finanziell und zeitlich bewältigen zu können.
- › In Deutschland verlangt die Vergabeordnung, dass klar definierte Bauleistungen in Fach- und Teillose getrennt vergeben werden. Diese Vorgehensweise bedingt, dass die ausführenden Bauunternehmen in der Regel erst nach Abschluss des Planungsprozesses ins Spiel kommen (mit der Vergabe der Bauleistungen), was zu der eigentlichen BIM-Idee im Widerspruch steht, die einen integralen Planungsprozess unter Einbezug aller Projektbeteiligten vorsieht. Inwiefern BIM mit den Spezifika der deutschen Planungs- und Baukultur vereinbar ist, wird deshalb kontrovers diskutiert. Festzuhalten ist, dass einer BIM-Anwendung hierzulande zwar keine grundsätzlichen rechtlichen Hürden entgegenstehen, sich aber die kooperativen Potenziale der Methode ggf. nicht vollumfänglich nutzen lassen.

Die Umstellung auf BIM ist insgesamt weniger als ein technischer, sondern vielmehr als ein organisatorischer und kultureller Anpassungsprozess zu sehen, der Zeit benötigt und angesichts der begrenzten Ressourcen vieler Unternehmen der Baubranche möglichst stufenweise erfolgen sollte. Ein Stufenplan etwa für die schrittweise BIM-Einführung im Bundeshochbau – analog zum Infrastrukturbau, jedoch mit modifizierten Zielniveaus und Einführungsphasen – erscheint nicht nur wegen der Vorbildfunktion des Bundes sinnvoll, sondern auch, um generell ein strategisches Vorgehen zu ermöglichen und KMU verlässliche Perspektiven zu geben. Angesichts der mittelständischen Struktur der deutschen Bauwirtschaft und der Tatsache, dass viele KMU noch nicht über die erforderlichen BIM-Kompetenzen verfügen, sollte eine BIM-Pflicht im Bundeshochbau allerdings sorgfältig vorbereitet werden. Andernfalls besteht die Gefahr, dass der Großteil der Unternehmen von der öffentlichen Vergabe ausgeschlossen sein wird und sich die digitale Spaltung der Unternehmenslandschaft vertieft. Wichtig ist deshalb, heute schon das Hauptaugenmerk der Unterstützungsaktivitäten auf die KMU zu legen, da diese letztlich der Schlüssel dafür sind, um BIM in Deutschland in die breite Anwendung zu bringen. Wichtige Handlungsfelder hierbei sind die Entwicklung standardisierter Verfahren für die BIM-Praxis, der Aufbau ausreichender Kapazitäten für Wissensvermittlung und Beratung sowie die Forcierung von Pilotprojekten.

Additive Fertigung

Als additive Fertigung wird die Herstellung dreidimensionaler Bauteile mithilfe eines automatisierten Schichtaufbaus bezeichnet (3-D-Druck). Das gewünschte Bauteil wird auf der Grundlage eines digitalen 3-D-Modells durch gezieltes Auftragen des Ausgangsmaterials sukzessive und maßgeschneidert aufgebaut. Da der Baubereich sich durch seine Unikatfertigung auszeichnet, ist er für additive Fertigungsverfahren im Prinzip prädestiniert.

Obwohl auch vermehrt Stahl im Fokus von Forschung und Entwicklung steht, konzentrieren sich die 3-D-Druckaktivitäten im Baubereich vornehmlich auf Beton als etablierten Werkstoff. So ist international eine rapide Zunahme an Demonstrationsprojekten zum 3-D-Betondruck von meist kleinen Gebäuden festzustellen, auch in Deutschland werden erste Pilotprojekte umgesetzt. Entsprechend nehmen die Ausführungen zum 3-D-Betondruck in diesem Bericht den größten Raum ein.

3-D-Betondruck: Stand, Herausforderungen und Anwendungsperspektiven

Beim eigentlichen 3-D-Betondruck gibt es zwei wesentliche Fertigungsansätze zu unterscheiden:

- › die *selektive Betonablage*, die durch Extrudieren oder Spritzen/Sprühen erfolgen kann;
- › die *selektive Bindung* durch gezieltes Einbringen einer reaktiven Flüssigkeit oder Dispersion (Wasser oder Zementleim).

Verbreitet sind in der Praxis vor allem Extrusionsverfahren, bei denen Frischbeton durch eine Düse bzw. einen Druckkopf schichtweise und kontinuierlich abgelegt wird. Bei den meisten Demonstrationsprojekten kommen bislang stationäre Portalroboter zum Einsatz, die über drei translatorische Hauptachsen verfügen, um den Druckkopf zu bewegen. Die Portalbauweise zeichnet sich durch einfache Steuerung der Achsen und durch hohe Präzision aus. Nachteilig ist jedoch, dass das Robotersystem immer den gesamten Druckbereich überspannen muss und damit viel Platz in Anspruch nimmt, was mit einem hohen Aufwand für die Montage und Demontage des Roboters verbunden ist. Eine Alternative wäre möglicherweise der Einsatz gängiger Baumaschinen als Betondruckmaschine. Abhängig von der Größe des Druckobjekts könnten z. B. Turmdreh- oder Mobilkrane, Mobilbagger, Lader oder Autobetonpumpen eingesetzt werden. Da die meisten Baumaschinen nicht über die für den Betondruck erforderliche Präzision verfügen, müssen sie entsprechend modifiziert werden.

Zweifelsohne hat der 3-D-Betondruck von großformatigen Bauteilen in den vergangenen Jahren beachtliche Fortschritte erzielt. Vom Prinzip her ermöglicht das Verfahren große architektonische Gestaltungsmöglichkeiten und eine schnelle Bauwerkerrichtung. Der Überblick über den Stand der Technik sowie die Anwendungsperspektiven im hier vorliegenden Bericht führen allerdings zu der Schlussfolgerung, dass der Technologie für eine Massenanwendung noch große Herausforderungen und Hürden gegenüberstehen. Folgende Aspekte sind von besonderer Bedeutung:

- › Die Entwicklung von druckbarem Beton mit ausreichender Formstabilität ist für eine zuverlässige additive Fertigung unerlässlich. Als schwierig erweisen sich die z. T. gegensätzlichen Anforderungen an das zu druckende Material hinsichtlich guter Pumpbarkeit, der Realisierbarkeit einer kontinuierlichen und zügigen Materialablage sowie der sofortigen Verformungsstabilität (Robustheit) auch unter Last. Bislang existieren kaum Untersuchungen zur Robustheit druckbarer Betone.
- › Untersuchungen zum 3-D-Beton wurden meist unter Laborbedingungen durchgeführt, jedoch nicht unter den Praxisverhältnissen einer Baustelle. Dies gilt auch für die verwendeten Maschinenkonzepte (insbesondere Druckköpfe), die nicht für den Baustellenbetrieb ausgelegt sind. Somit besteht eine grundlegende Herausforderung darin, den 3-D-Druck in großem Maßstab am Ort einer Baustelle praxistauglich und prozessstabil zu implementieren. Dies betrifft insbesondere das Arbeiten unter unterschiedlichen Umweltbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind, Regen) und Standortbeschränkungen (Zugänglichkeit, Abstand zu Transportanlagen usw.) sowie prozessbedingte Effekte (z. B. durch Fernpumpen, Hochdruckpumpen). Außerdem stellen Prozessunterbrechungen besondere Anforderungen an das Material-, Maschinen- und Baumanagement.
- › Ein ganz wesentlicher Punkt ist das Fehlen von praxisgerechten Lösungen zur direkten Integration der Bewehrung in die additive Fertigung. Zwar wurden bereits zahlreiche Methoden erprobt, bislang vermag jedoch kein Ansatz das gesamte Spektrum relevanter Anforderungen (wie z. B. horizontale/vertikale bzw. schlaffe/vorgespannte Bewehrung) abzudecken. Als Alternative zur Stahlbewehrung erscheinen neuartige Faser- und Textilbewehrungen, wie z. B. aus Carbongarnen, am ehesten geeignet. Diesen wird mit Blick auf die Eigenschaften (leicht, sehr hohe Zugfestigkeit) ein großes Substitutionspotenzial gegenüber Stahl zugesprochen. Jedoch handelt es sich bei Carbonfasern um teure Spezialwerkstoffe, die aufwendig und extrem energieintensiv hergestellt werden müssen und deren Verfügbarkeit daher begrenzt ist.

Insgesamt ist der 3-D-Druck mit Beton derzeit deutlich von einem erprobten Verfahren für den Masseneinsatz auf Baustellen entfernt. Es bedarf noch intensiver Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, damit additive Betondruckverfahren im Bauwesen praxistauglich werden. Dabei sind Materialforschung und -entwicklung von besonderer Bedeutung. So sollte die Überführung neuer Baustoffe und konstruktiver Lösungen in die Praxis verstärkt unterstützt werden, damit Innovationshürden abgebaut und wichtige Erfahrungen mit vielversprechenden Ansätzen gesammelt werden können.

Eine wesentliche Anwendungshürde ist darin zu sehen, dass sowohl die eingesetzten Baustoffe (3-D-Betone) als auch die additiven Verfahren selbst den bestehenden Baunormen nicht entsprechen, sodass für die Anwendung von 3-D-Betondruckverfahren derzeit Zulassungen im Einzelfall/vorhabenbezogene Bauartgenehmigungen erforderlich sind. Das ist jedoch zeitaufwendig und teuer. Hier bedarf es einer Weiterentwicklung der Normung, welche die Besonderheiten der neuen Bauweise berücksichtigt. Eine kardinale Verbesserung der Situation würde ein Übergang zu einer neuen Normengeneration mit sich bringen, die konsequent auf leistungsbezogenen Nachweisverfahren anstatt auf den derzeit dominierenden deskriptiven Vorgaben aufbaut.

Additive Fertigung mit anderen Materialien

Neben Beton werden auch andere wichtige Bauwerkstoffe wie Metalle, Kunststoffe oder Holz in der additiven Fertigung im Bauwesen erprobt. Herausforderungen bestehen darin, die benötigten großformatigen Bauteile zu angemessenen Kosten herzustellen. Fast alle Anwendungen befinden sich in einer frühen Entwicklungsphase, sodass selbst auf längere Sicht nicht mit einem breiteren Einsatz im Bauwesen zu rechnen ist. Allerdings sind einige Spezialanwendungen absehbar:

- › Der am meisten verwendete Werkstoff in der additiven Metallfertigung ist *Stahl*. Da der 3-D-Metalldruck jedoch einen hohen Energieverbrauch hat sowie eine lange Herstellungszeit benötigt, dürfte das Verfahren für großmaßstäbliche Anwendungen im Baubereich nur dann infrage kommen, wenn Kosten lediglich eine untergeordnete Rolle spielen. Ein größeres Potenzial des 3-D-Metalldrucks wird im Baubereich etwa komplexen, maßgeschneiderten, topologisch optimierten Verbindungselementen für den Stahlbau zugeschrieben. Hier stehen die Kosten bereits heute in einem guten Verhältnis zum Nutzen, da die Herstellung komplexer Knotenelemente auch mit konventionellen Techniken aufwendig und teuer ist.
- › Anwendungen des 3-D-Drucks mit *Kunststoffen* sind im Bauwesen noch rar; eine Ausnahme ist der 3-D-Druck von Architekturmodellen. Im Gegensatz dazu sind beim Polymerdruck von realen Bauwerken die erforderliche Größe der Bauteile (und entsprechend des 3-D-Druckers), Materialkosten und Produktivität in Bezug auf die Herstellung von zentraler Bedeutung. Dazu kommen die Anforderungen an bestimmte mechanische Eigenschaften und die Sicherung der Dauerhaftigkeit der Kunststoffe. Anwendungspotenziale im Baubereich gibt es z. B. in der Herstellung von Bewehrungs- und Einbauteilen sowie Verankerungssystemen.
- › Mit *Holz* eröffnet sich in der additiven Fertigung die Möglichkeit zum Einsatz eines nachwachsenden Rohstoffs. Verwendet werden dabei üblicherweise Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe. Die wesentliche Herausforderung liegt in der Wahl eines geeigneten Bindemittels, da die üblichen Duroplaste der Holzwerkstoffproduktion aus prozesstechnischen Gründen nicht eingesetzt werden können. Bislang beziehen sich nur wenige Aktivitäten zur additiven Herstellung von Holz ausdrücklich auf Anwendungen im Bauwesen. Im Fokus von Forschung und Entwicklung stehen stattdessen die Bereiche Möbel und Innenausbau – hier gibt es bereits erste kommerzielle Anbieter. Bauspezifische Anwendungspotenziale (wie z. B. temporäre und vollständig rezyklierbare Stützstrukturen für auskragende Betonstrukturen) scheinen aber perspektivisch durchaus vorhanden.

Serielles und modulares Bauen

Beim seriellen Bauen werden Gebäude nicht als Unikate geplant und errichtet, sondern in industriellen Fertigungsprozessen seriell gefertigt. Eng verwandt damit ist das modulare Bauen, bei dem Teile des Bauwerks (wie etwa die Gebäudehülle) aus industriell vorgefertigten Bauteilen (Modulen) nach dem Baukastenprinzip zusammengesetzt werden. Anders als etwa in Großbritannien oder den Niederlanden konnte sich der moderne Modul- und Fertigteilbau im deutschen Wohnungsbau noch nicht etablieren (Anteil von knapp 18%) und beschränkt sich überwiegend auf Einfamilienhäuser in Holzkonstruktion. Einer der Gründe ist, dass die seriell gefertigten

Trabantenstädte der 1970er Jahre bis heute negative Assoziationen wecken und in Deutschland zu einem anhaltenden Skeptizismus gegenüber dem seriellen bzw. modularen Bauen führten.

Allerdings werden serielle und modulare Bauweisen in der Diskussion um die Zukunft des Bauens mittlerweile verstärkt ins Spiel gebracht – u. a. auch deshalb, weil sich die planerischen und technologischen Rahmenbedingungen und Möglichkeiten in den letzten Jahren gravierend geändert haben und digitale und weitgehend vollautomatisierte Vorfertigungsmethoden eine nie dagewesene Komplexität, Variabilität und Präzision der Fertigteile und Module ermöglichen.

Beton, Holz und Stahl im modernen Modul- und Fertigteilbau

Moderne digitale und automatisierte Vorfertigungsmethoden ermöglichen heutzutage eine äußerst flexible Produktionsweise von seriell hergestellten Bauteilen und Modulen, die auch individuelle Kundenwünsche erfüllen kann. Wesentlich ist, dass durch die neuen Technologien eine durchgängige digitale Prozesskette von der Planung des 2-D- bzw. 3-D-Modells bis zur vollautomatisierten Fertigung des Bauteils möglich ist. Durch den Einsatz von Manipulatoren und computergesteuerten Werkzeugmaschinen ist eine schnelle, bedarfsgerechte Anpassung von Form und Gestalt möglich. Fertigungsanlagen mit Industrierobotern und Computerized-Numerical-Control(CNC)-Fräsen gewähren hohe Maßgenauigkeiten und ermöglichen anspruchsvolle Oberflächengestaltungen. Moderne Sensortechnik erlaubt die Detektion kleinster Abweichungen, sodass fehlerhafte Bauteile noch vor Auslieferung entsprechend nachbearbeitet oder aussortiert werden können. Module und Fertigteile sind in der Regel aus Stahlbeton, Holz oder Stahl bzw. einer Kombination dieser Werkstoffe gefertigt, wobei jedes Material seine spezifischen Eigenschaften und damit Vor- und Nachteile hat:

- › Vorgefertigte Bauteile aus Beton – gefertigt in vollautomatisierten Betonfertigteilwerken – werden in allen Bereichen des Bauwesens als integrierte Baukomponenten (z. B. als Decken- und Wandplatten) im großen Umfang verwendet. Im seriellen und modularen Wohnungsbau hat Stahlbeton jedoch aktuell eine geringe Bedeutung. Die Gründe hierfür sind die schlechten bauklimatischen Eigenschaften des Werkstoffs, das sehr hohe Gewicht der einzelnen Raumzellen und die kaum mögliche Wiederverwendung der Elemente.
- › Als Baumaterial gewinnt der nachhaltige Rohstoff Holz immer mehr an Bedeutung. Im modernen Holzbau stehen flächige, additiv hergestellte Bauteile aus Vollholz oder Holzwerkstoffen zur Verfügung, wobei moderne digitale Methoden ganz neue Möglichkeiten bei der präzisen Vorfertigung eröffnen. Das additive Fügen der vorkonfektionierten Stäbe und Platten zu Wand-, Decken- und Dachelementen erfolgt weitgehend automatisch. Vermehrt kommen in den Holzbauunternehmen Portalroboter zum Einsatz, die einzelne Fertigungsschritte übernehmen können.
- › Aufgrund ständiger Weiterentwicklungen auf Materialebene sowie Systemoptimierungen im Vorfertigungsprozess gewinnt die einst nur in Nischenmärkten vertretene Stahlmodulbauweise zunehmend an Bedeutung. Zwar hat sich diese Bauweise in Deutschland noch nicht flächendeckend etabliert, dennoch geht der Trend vor allem bei Gewerbebauten eindeutig in Richtung serielles Bauen mit Leichtbaumodulen. Verbesserungsbefehl gibt es hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, wie z. B. Festigkeit sowie Dauerhaftigkeit der Stähle.

Durch die Kombination der Werkstoffe lassen sich beim Modulbau die unterschiedlichen Eigenschaften der Werkstoffe optimal nutzen, wodurch sich neue konstruktive Möglichkeiten eröffnen. Als hybride Lösung in Verbindung mit Stahl oder Beton hat Holz ein deutlich erweitertes Anwendungspotenzial (erhöhte Brandsicherheit, verbessertes Schwingungsverhalten). Beton hat komplementäre Eigenschaften (niedrige Brennbarkeit, hohe Masse) zu Holz, die z. B. im Deckenbau optimal genutzt werden können. Dagegen wird die Kombination von Holz und Stahl favorisiert, wenn hohe Punktlasten im Gebäude abzuleiten sind. Hier werden Stahlteile z. B. als Verbindungselemente im Skelettbau eingesetzt.

Potenziale und Herausforderungen des Modul- und Fertigteilbaus

Durch die konsequente Digitalisierung und Automatisierung serieller Fertigungsverfahren lassen sich die Prinzipien der Modularisierung auf den Hausbau übertragen. Ziel ist es, ein Gebäude auf eine definierte Zahl von Standardelementen (Modulen) zu reduzieren und mit genau definierten Anschlussstellen für Decke, Außenwand oder Fenster zu versehen. Dabei lassen die Standardmodule durchaus Varianten zu, mit denen sich unterschiedliche Gebäude erstellen lassen. Eine konsequente Einhaltung des Prinzips der Serie über den gesamten Prozess

kann zu Kosteneinsparungen führen. So werden Ersparnisse von ca. 20 % gegenüber herkömmlichen Bauweisen in Aussicht gestellt. Zusätzlich könnten Bauprojekte um mehr als 70 % schneller abgewickelt werden, wodurch sich Einsparungen bei Baunebenkosten, wie z. B. der Bauaufsicht, erzielen lassen.

Vorteilhaft an einem hohen Vorfertigungsgrad ist zudem, dass witterungsbedingte Produktionsunterbrechungen vermieden werden können. Möglich ist im Prinzip eine 24-Stunden-Produktion im Schichtbetrieb. Aufgrund dieser Faktoren verfügen auf Modulbau spezialisierte Unternehmen über mehr Planungs- und Termintransparenz. Der Baustellenbetrieb kann je nach Grad der Vorfertigung drastisch reduziert werden, wodurch sich auch das Tätigkeits- und Arbeitsumfeld der Beschäftigten positiv verändert. Die Verlagerung wesentlicher Arbeitsschritte der Gebäudefertigung in die Werkshallen erlaubt gleichbleibende klimatische Arbeitsbedingungen und reduziert die Staub-, Lärm- und Abgasemissionen auf der Baustelle maßgeblich.

Eine entscheidende Frage ist, wie der – vor allem aus ökologischer Sicht besonders vorteilhafte – mehrgeschossige Holzbau an Bedeutung gewinnen kann. Durch das Bauen mit Holz können große Mengen CO₂ langfristig gebunden und energieintensive Baumaterialien wie Ziegel, Zement und Stahl substituiert werden. Zudem ermöglichen mehrgeschossige Bauten besonders in hochpreisigen Städten grundsätzlich eine effizientere Flächennutzung. Bei Mehrfamilienhäusern bewegt sich die Holzbauquote derzeit allerdings noch auf sehr niedrigem Niveau. Insgesamt sind die Rahmenbedingungen für eine verbreitete Anwendung noch nicht optimal. Aus diesem Grund werden von den Holzbauunternehmen mittelfristig weniger im Neubau Zuwächse erwartet als im Bestandsbau, dort insbesondere in den Anwendungsfeldern Aufstockung und energetische Fassadensanierung. Als hinderlich erweisen sich für den mehrgeschossigen Neubau zum einen die fehlenden herstellerübergreifenden Standards, die wichtig wären, um Kompatibilität, Erweiterung sowie Wiederverwendung der Module sicherzustellen. Erschwerend kommen zum anderen uneinheitliche Vorgaben (z. B. hinsichtlich der Brandschutzanforderungen) in den einzelnen Landesbauordnungen hinzu. Um die Errichtung seriell gefertigter Typenhäuser zu beschleunigen und zu vereinfachen, bedarf es – neben breitgefächerten Forschungsaktivitäten in den Bereichen Baukonstruktion, Statik und Materialtechnologie – auch der Entwicklung standardisierter, einheitlicher Lösungen.

Automatisierte Baumaschinen und Robotik

Aufgrund ihrer Schlüsselrolle in Bauprozessen haben Baumaschinen maßgeblichen Einfluss auf Effektivität und Effizienz der Bauausführung. Automatisierte und digitalisierte Baumaschinen bieten demzufolge erhebliches Potenzial, die Produktivität zu steigern. Zu beobachten ist jedoch, dass zwar zahlreiche Ideen und Ansätze zur Automatisierung und Digitalisierung von Baumaschinen vorliegen, die reale Umsetzung aber vielfach noch auf sich warten lässt. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass Arbeitsprozesse auf der Baustelle in der Regel eher schlecht planbar sind, weshalb sich die Implementierung praxistauglicher Automatisierungsfunktionen erheblich anspruchsvoller gestaltet als in anderen, stärker standardisierbaren industriellen Fertigungsbereichen.

Maschinentechnik im Bauprozess: Stand der Automatisierung

Art und Umfang des Maschineneinsatzes in Bauprojekten unterscheiden sich nach Tief-, Straßen- und Hochbau:

- › *Tiefbau* bezeichnet die Errichtung von Bauwerken, die an oder unter der Erdoberfläche liegen, wozu u. a. die Teilgebiete Erd-, Grund- und Spezialtiefbau gehören. Zu den Maschinen, die im Tiefbau am häufigsten und insbesondere für Erdarbeiten eingesetzt werden, zählen Bagger, Planiertrauben (Dozer), Radlader sowie Erd- oder Straßenhobel (Grader). Die umfassende Automatisierung der Arbeiten in diesem Bereich scheitert hauptsächlich an der hohen Heterogenität der Arbeitsmedien. Form, Zusammensetzung und Eigenschaften von Schüttgütern und Erdstoffen lassen sich bislang sensorisch nur unzureichend erfassen. Dennoch gibt es Arbeitsprozesse, bei denen aufgrund gut planbarer Randbedingungen bereits weitergehende Automatisierungslösungen geeignet sind, etwa beim Planieren großer Flächen oder beim Fräsen langer Gräben.
- › Beim *Bau von Straßen* kommen ebenso wie beim Tiefbau Radlader, Bagger, Grader und Dozer für Planier- und Erdbauarbeiten zum Einsatz. Spezifische Straßenbaumaschinen sind Beschicker, Kaltfräse, Asphaltfertiger, Verdichtungswalze und Recycler, die zur Herstellung der Asphalt- oder Betondecke und zu den notwendigen Vorarbeiten verwendet werden. Die Entwicklungen der Hersteller und Zulieferer konzentrie-

ren sich auf die Überwachung von Parametern wie Schichtstärke, Ebenheit und Verdichtung als Gütekriterium des Straßenbauwerks und/oder die Automatisierung der Prozesse, die Einfluss auf diese Größen ausüben. Insgesamt ist im Straßenbau schon ein vergleichsweise hoher Automatisierungsgrad anzutreffen, da planbare, kontinuierliche Bauprozesse vorherrschen (etwa beim Asphaltbau).

- › Der *Hochbau* umfasst das Planen und Errichten von Bauwerken, die oberhalb der Geländelinie liegen. Zu der im Hochbau einsetzbaren Maschinenteknik gehören verschiedene Bauarten von Kranen, aber auch Spezialgeräte für den Betonbau (Fahrmischer, Betonpumpe, Betonverteiler) oder den Innenausbau (Beton- säge, Kernbohrer). Vor allem bei Kransystemen kommen diverse Assistenzsysteme zum Einsatz (z. B. zur Positionierung und Kollisionsvermeidung), von denen man sich eine Steigerung sowohl der Umschlagleistung und der Zuverlässigkeit als auch der Sicherheit erhofft. Das größte Potenzial für Prozessautomatisierungen besteht jedoch im Beton- sowie im Mauerwerksbau. In beiden Bereichen, die jeweils durch repetitive manuelle Tätigkeiten gekennzeichnet sind, befinden sich hochautomatisierte Roboterlösungen in einer frühen Entwicklungsphase, mit 3-D-Druckverfahren als einem der vielversprechendsten Anwendungsgebiete.

Perspektiven der Digitalisierung und Automatisierung im Baumaschinenbereich

Die Automatisierung von Baumaschinen gestaltet sich insbesondere aus sicherheitstechnischen Gründen sehr schwierig. Von besonderer Bedeutung ist die Gewährleistung einer sicher funktionierenden Umgebungserkennung bzw. Gefahrenbereichsüberwachung der Maschine. Dazu ist eine Sensortechnologie mit ausreichender Redundanz und Robustheit unabdingbar, wofür allerdings noch erheblicher Entwicklungsbedarf besteht. Dies gilt auch für den Bereich der künstlichen Intelligenz (KI). Je größer der Automatisierungsgrad ist, desto autonomer müssen Baumaschinen auf sich ändernde Situationen reagieren können. Die dafür benötigten Algorithmen können nur bedingt programmiertechnisch abgebildet werden, sodass in letzter Konsequenz Methoden des maschinellen Lernens erforderlich sind, um baubezogene Arbeitsprozesse kontinuierlich zu optimieren. Schwerpunkte bei der Entwicklung von Assistenzsystemen sind somit die Evaluierung von Sensoren, die für den Bauprozess geeignet sind, Algorithmen zur zuverlässigen Objekt- und Prozesserkennung sowie baumaschinenspezifische Algorithmen zur Maschinensteuerung. Mit Ausnahme einiger Spezialaufgaben, die sich für autonome Maschinenprozesse eignen (z. B. Fahraufgaben in menschenleeren Arbeitsumgebungen), wird der Mensch jedoch absehbar in fast allen Arbeitsbereichen die zentrale Steuerungsinstanz bleiben – wenn auch mehr und mehr unterstützt durch fortschrittliche Assistenzsysteme.

Um die Praxistauglichkeit innovativer Automatisierungslösungen unter realitätsnahen Bedingungen testen und gegenüber interessierten Unternehmen präsentieren zu können, wäre der Aufbau regionaler Versuchs- und Demonstrationszentren sehr hilfreich. Diese Zentren könnten gleichzeitig auch als Inkubator für Start-ups im Umfeld Baumaschinen und Bauprozesse wirken (Gründerzentren). Wichtig wäre eine interdisziplinäre, praxisorientierte Ausrichtung sowohl der Forschungsprojekte als auch der Versuchszentren, um die durchgängige Betrachtung der gesamten Prozesskette und die Wirtschaftlichkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

Eine durchgängige, schnelle und sichere Kommunikation zwischen den einzelnen Maschinen wie auch zwischen den Maschinen und den vornehmlich als Kontrollinstanz fungierenden Menschen erfordert die Standardisierung von Kommunikationsschnittstellen, Datenaustauschformaten und Übertragungsprotokollen ebenso wie die Festlegung der Inhalte der zu übertragenden Informationen. Zwar sind Telemetriesysteme zur Ortung und Betriebszustandsübermittlung der Maschinen inzwischen Stand der Technik. Jedoch sind diese bislang überwiegend herstellerspezifisch verfügbar und somit die Überwachung und Steuerung heterogener Maschinenflotten momentan fast unmöglich. Für einen vernetzten und automatisierten Baubetrieb werden offene Datenaustauschportale und einheitliche Schnittstellen zu den Clouddiensten der Maschinenhersteller benötigt. Hier besteht erheblicher Standardisierungsbedarf, wobei sich die oft gegenläufigen Interessen der verschiedenen Maschinenhersteller als Schwierigkeit erweisen. Standardisierungsbemühungen haben deshalb am ehesten dann Erfolg, sich bei Herstellern durchzusetzen, wenn sie von den relevanten Verbänden der Maschinenhersteller, wie dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) und Maschinenbetreiber, wie dem Verband der Baubranche, Umwelt- und Maschinenteknik (VDBUM) sowie dem Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V. (HDB) breit getragen und vorangetrieben werden.

Innovative Bautechnologien: Bewertung aus Umweltsicht

Der globale Ressourcenverbrauch hat in den letzten 4 Jahrzehnten enorm zugenommen. Die Baubranche ist dabei ein maßgeblicher Treiber: Etwa die Hälfte der weltweiten Materialförderung entfällt auf nichtmetallische Mineralien, von denen fast alle für Bauzwecke verwendet werden. Der Bausektor steht mithin vor großen Herausforderungen, um den zukünftigen Anforderungen des Klimaschutzes sowie den Zielen einer nachhaltigen Entwicklung im Zusammenhang mit Ressourcennutzung gerecht zu werden. Die in diesem Bericht behandelten Innovationen müssen deshalb auch unter ökologischen Aspekten beurteilt werden.

Digitales Planen und Bauen mit BIM

BIM kann wichtige Beiträge für verbesserte Entscheidungsprozesse im Hinblick auf ökologisch nachhaltiges Bauen liefern. So können mit BIM bereits in der Planungsphase verschiedene Varianten von Baukonstruktionen und -weisen sowie von Baustoffen analysiert und hinsichtlich ihrer ökologischen Effekte bewertet werden. Ferner hat BIM das Potenzial, ein Inventar zu erstellen, das Auskunft über Bauteile und -stoffe im Gebäude gibt, wenn im Lebenszyklus der Rückbau ansteht. Damit ist die Organisation einer optimalen Verwertung der eingebauten Stoffe möglich.

Da eine individuelle Erhebung ökologisch relevanter Daten von Baustoffen und -teilen (wie z. B. der Energiebedarf) in der Praxis nicht durchführbar ist, ist man auf standardisierte Datensätze baurelevanter Datenbanken (z. B. »ÖKOBAUDAT«) und Ökobilanzprogramme (z. B. »GaBi«) angewiesen. Die Prozesskettenanalyse in BIM bildet auf diese Weise ein Modell für die mit der Errichtung des Bauwerks verbundenen Umweltauswirkungen ab. Allerdings liegen nicht für alle Arbeitsschritte, eingesetzten Bauteile und technischen Ausrüstungen Ökobilanzdaten vor, sodass Vereinfachungen und Plausibilitätsannahmen gemacht werden müssen, was ökologischen Gebäudebewertungen mit BIM Grenzen setzt. Automatisierte Ökobilanzierungen, etwa um Änderungen bei der Konstruktion oder der technischen Gebäudeausrüstung zu prüfen, können noch nicht zufriedenstellend durchgeführt werden. Dennoch lassen sich mit solchen Modellen Hinweise auf ökologische Defizite und Vorteile identifizieren.

Additive Verfahren: 3-D-Betondruck

Der 3-D-Betondruck ist aus derzeitiger Sicht ökologisch eher ungünstig zu bewerten. Da der 3-D-Beton auf der Bindemittelgrundkonzeption des konventionellen Betons und damit auf Zementklinker aufbaut, übernimmt er als Rucksack dessen klimaschädlichen Wirkungen und kreislaufwirtschaftlichen Probleme. Die Herstellung von Zementklinker ist sehr CO₂-intensiv. Zudem erlauben zementgebundene Baustoffe am Ende ihres Lebenszyklus keine hochwertige Verwertung. Dies gilt umso mehr, wenn Hochleistungszemente eingesetzt werden. Der 3-D-Beton verstärkt diese Probleme, da er aufgrund der speziellen technischen Anforderungen aus dem bestehenden Zementportfolio diejenigen verwenden muss, die ökologisch mit am ungünstigsten abschneiden.

Die Zementindustrie steht im Hinblick auf die Dekarbonisierung insgesamt vor einer schwierigen Situation, da absehbar keine ernsthaften Alternativen zum emissionsintensiven Zementklinker zur Verfügung stehen. Was ihr als einzige Lösung bleibt, ist die CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS). In Deutschland sind aktuell erste Demonstrationsanlagen geplant. Mit der großtechnischen Realisierung der CCS-Technologie sind allerdings große Unsicherheiten verbunden, insbesondere hinsichtlich der gesellschaftlichen und politischen Akzeptanz für die Umsetzung entsprechender Projekte im erforderlichen Maßstab. Welchen Beitrag die Technologie zum globalen Klimaschutz in Zukunft leisten kann, ist daher ungewiss. Alternative CO₂-arme oder neutrale Bindemittel, mit denen das Klinkerparadigma abgewendet werden könnte, befinden sich zwar vereinzelt in der Entwicklung und Erprobung, allerdings haben sie allesamt noch eher den Status von Nischenprodukten. Es besteht somit ein dringender Bedarf an der Intensivierung dieser Bemühungen – die systemischen Rahmenbedingungen in der Zementindustrie, die seit vielen Jahren vor allem auf inkrementelle Innovationen setzt, sind dafür jedoch ungünstig.

Auch bei Carbon, dem Potenzial als innovatives Bewehrungsmaterial für Beton und 3-D-Beton nachgesagt wird, gibt es offene Fragen hinsichtlich einer ganzheitlichen ökologischen Bewertung. Carbonfasern führen aufgrund ihrer extremen Energieintensität bei ihrer Herstellung einen gewaltigen ökologischen Rucksack mit sich.

Die Entsorgung von Carbonbeton ist noch weitgehend ungeklärt. Jedoch wird Carbonbeton das Potenzial nachgesagt, im Vergleich zu Stahlbeton schlankere Baukonstruktionen zu ermöglichen, womit sich der Bedarf an Beton reduzieren ließe. Doch inwieweit sich solche Einspareffekte insbesondere im Wohnungsbau realisieren lassen, ist noch völlig unklar.

Modulbau

Sehr vielversprechend fällt die ökologische Bewertung des modularen und seriellen Bauens aus. Die Vorfertigung in Werkshallen kann insbesondere durch den Einsatz digitaler Fertigungsmethoden Produktionsabfälle minimieren und somit Ressourcen schonen und die Abfallentsorgung entlasten. Werden zudem noch hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit positiv bewertete Baustoffe eingesetzt, sind für die ökologische Gesamtbewertung besonders günstige Effekte zu erwarten. Insbesondere für den nachwachsenden Werkstoff Holz kann von der Planungsphase mit BIM über die digital optimierte Fertigung im Werk bis hin zum abfallarmen Zusammenfügen der Bauteile und Module eine weitgehend nachhaltige Gebäudeerrichtung erwartet werden. Holz punktet zudem unter dem Gesichtspunkt Kohlenstoffspeicher und der Substitution endlicher Ressourcen.

Die Forcierung der Verwendung von Holz im modularen Gebäudebau kann somit einen positiven Beitrag zum Klimaschutz und zur Ressourceneffizienz leisten. Die Voraussetzungen scheinen dafür gegeben, dass zukünftig die Holzbauquote deutlich erhöht werden kann. Der erforderliche Mehrbedarf an Holz könnte auf der Basis vorliegender Daten der Holzinventur gut gedeckt werden. Allerdings ergeben sich diesbezüglich langfristige Unsicherheiten aufgrund des Klimawandels. Die in den vergangenen Jahren vermehrt zu verzeichnenden Stürme und Dürren sowie der großflächige Borkenkäferbefall führten zu Waldschäden in erheblichem Umfang.

Automatisierte Baumaschinen

Mit Blick auf die direkten Umweltwirkungen von modernen Baumaschinen steht vor allem die Antriebstechnik im Fokus. Stand der Technik ist noch immer der Dieselmotor als Primäraggregate. Vorteil des Verbrennungsmotors ist die hohe Energiedichte des fossilen Energieträgers, der in einfachen, relativ wenig Platz beanspruchenden Kraftstoffbehältern mitgeführt werden kann. Dieselabgase enthalten jedoch verschiedene Substanzen (Kohlendioxid und -monoxid, diverse Stickoxide, Rußpartikel etc.) und haben sowohl lokale (Lärm- und Schadstoffemissionen) als auch globale Umwelteffekte (Treibhausgasemissionen). CO₂-arme Antriebstechniken können auf unterschiedliche Art und Weise umgesetzt werden:

- › durch den Einsatz regenerativer, klimaneutraler Kraftstoffe,
- › durch Antriebssysteme mit zusätzlichen, wieder aufladbaren Speichern (hybride Antriebskonzepte),
- › durch die Elektrifizierung des Antriebssystems.

Alle diese Systeme haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile und in unterschiedlichen Anwendungsbereichen ihre Berechtigung. So eignet sich der batterieelektrische Antrieb beispielsweise nicht für Baumaschinen höherer Leistungsklassen, da die erforderlichen Speicher den verfügbaren Bauraum um ein Vielfaches überschreiten würden.

Die Frage, wie lange der Dieselantrieb für Baumaschinen noch benötigt wird, hängt wesentlich davon ab, wie intensiv an den alternativen Lösungen in den nächsten Jahren geforscht wird und wie schnell die benötigten infrastrukturellen Voraussetzungen geschaffen werden (z. B. Ladeinfrastruktur). Aus wirtschaftlicher Sicht ist der etablierte Dieselmotor momentan noch konkurrenzlos.

Bauen 4.0 – übergreifende Handlungsfelder

Obwohl sich die verschiedenen Bereiche in technischer und anwendungsbezogener Hinsicht in vielen Aspekten teils grundlegend unterscheiden, sollten ihre Perspektiven nicht isoliert betrachtet werden. Analog zur Industrie 4.0 besteht auch beim Bauen 4.0 letztlich das Ziel, die digitalen Einzellösungen entlang der Wertschöpfungskette Planen und Bauen nahtlos miteinander zu vernetzen, um eine flexiblere, datenbasierte Steuerung der Bauprozesse zu ermöglichen und so Effizienzpotenziale zu nutzen. Alles in allem ist der digitale Vernetzungsgrad der Baubranche noch gering und gerade die Schnittstellen zwischen den bereits vorhandenen Werkzeugen der

digitalen Bauplanung (Computer-aided Design – CAD, Computer-aided Manufacturing – CAM, BIM etc.) und den Werkzeugen der digitalen, automatisierten Produktion (additive Fertigung, modulare/serielle Verfahren, Baumaschinen etc.) sind noch unterentwickelt. Über allem steht die Frage, welchen Beitrag die Digitalisierung zur nachhaltigeren Ausrichtung des außerordentlichen energie- und ressourcenintensiven Bausektors leisten kann.

Die innovative Weiterentwicklung der Baubranche ist in erster Linie eine Forschungs- und Entwicklungsaufgabe, die neben den beschriebenen Kerntechnologien vor allem die Baustoffe einbeziehen muss, die zukünftig CO₂-arm hergestellt und verstärkt in die Kreislaufwirtschaft integriert werden müssen. Angesichts des enormen, breitgefächerten Forschungsbedarfs erscheint neben einer Erhöhung der Fördermittel die Entwicklung einer ressortübergreifenden Forschungsstrategie sinnvoll, um die Ressourcen möglichst zielgerichtet einsetzen und Synergien nutzen zu können. Benötigt werden insbesondere langfristig orientierte Programme, die Folgeprojekte ermöglichen und ausreichende Sachmittel umfassen, damit Demonstratoren und Prototypen realisiert werden können. Häufig erweist sich als ein Problem, dass die Förderung in der Regel deutlich vor der Marktreife eines Produkts endet und die erarbeiteten Lösungsansätze nach Abschluss eines Projekts nicht weiterverfolgt werden. Ein besonderes Augenmerk sollte darauf gelegt werden, dass sich neben größeren Konzernen auch KMU an den öffentlich geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekten beteiligen.

Letzteres ist auch deshalb bedeutsam, weil im Rahmen anwendungsorientierter Forschungsprogramme relevante Vorarbeiten im Bereich Normung/Standardisierung geleistet werden – es ist wichtig, dass die Perspektive der KMU hier frühzeitig einfließt. Zudem wäre eine nationale Normungsroadmap, wie sie für BIM entwickelt wird, auch für andere Bereiche (insbesondere neue, mineralisch basierte Verbundwerkstoffe, Schnittstellen für die Automatisierung von Baumaschinen sowie Modulbau) hilfreich, um ein strukturiertes, strategisches Vorgehen zu ermöglichen. Zu beachten ist dabei, dass Normen und Standards nicht nur auf nationaler, sondern vor allem auf europäischer (Europäisches Komitee für Normung – CEN) und internationaler Ebene (Internationale Organisation für Normung – ISO) zu etablieren sind. Das erfordert entsprechende Gremienarbeit, die hauptsächlich von den Unternehmen zu tragen ist. Allerdings sind insbesondere KMU dazu kaum in der Lage. Hier wäre die Politik gefordert, im Zusammenspiel mit den Verbänden und Kammern dafür zu sorgen (z. B. durch finanzielle Unterstützung engagierter Unternehmen), dass die Interessen der deutschen Bauwirtschaft in den internationalen Normungsprozessen angemessen repräsentiert sind.

Daneben hängt es vor allem von der Weiterentwicklung der infrastrukturellen Rahmenbedingungen sowie dem Ausbildungsstandard der zukünftigen Fachkräfte ab, wie schnell sich eine digitale Wertschöpfungskette Planen und Bauen etablieren kann:

- › Die digitale Vernetzung der Bauwirtschaft entlang der Wertschöpfungskette scheitert derzeit auch daran, dass die *infrastrukturellen Voraussetzungen* nur unzureichend gegeben sind. So besteht z. B. ein Mangel an herstellerunabhängigen Datenportalen, über welche die auf der Baustelle anfallenden Maschinen- und Prozessdaten zwischen den Beteiligten ausgetauscht werden können. Viele Maschinenhersteller verfolgen hier proprietäre Lösungen, was den heterogenen Maschinenparks vieler Bauunternehmen nicht angemessen ist. Zudem sind die heute standardmäßig nutzbaren Kommunikationsnetze (Long Term Evolution – LTE; 4. Mobilfunkgeneration – 4G) aufgrund zu geringer Bandbreite, zu großer Latenz, eingeschränkter Netzabdeckung und Zuverlässigkeit kaum geeignet, die anspruchsvollen Kommunikationsanforderungen ferngesteuerter Baumaschinen oder einer cloudgestützten Prozessführung zu erfüllen. Der möglichst flächendeckende 5G-Ausbau der Telekommunikationsinfrastruktur wäre deshalb eine wichtige Zukunftsmaßnahme, die speziell für KMU auch ein wichtiger Anreiz sein könnte, in den digitalen Wandel zu investieren. Dasselbe gilt für die Digitalisierung planungsrechtlicher und bauaufsichtlicher Verfahren, die für den Abbau bürokratischer Hürden und die Beschleunigung des Wohnungsbaus von großer Bedeutung ist. Hier gibt es bei vielen Bauämtern noch großen Nachholbedarf. Bei den laufenden Digitalisierungsbestrebungen der Baubehörden (im Rahmen der Umsetzung des Onlinezugangsgesetzes – OZG¹) wäre von Beginn an möglichst darauf zu achten, dass die Verfahren konsequent BIM-kompatibel ausgerichtet werden, da dies eine zentrale Voraussetzung ist für die Schaffung einer durchgängigen digitalen Prozesskette.
- › Das Berufsbild baustellennaher Berufe wird sich durch die Digitalisierung sowie die Automatisierung von Maschinen und Prozessen grundlegend verändern. Einerseits bleiben zwar die belastenden äußeren Bedingungen des Baustellenumfelds weitgehend bestehen (Wetter, Lärm, Staub), andererseits werden im Bauwesen zunehmend anspruchsvolle Hightechmaschinen und moderne Arbeitsmittel zum Einsatz kommen.

¹ Gesetz zur Verbesserung des Onlinezugangs zu Verwaltungsleistungen (Onlinezugangsgesetz – OZG)

Die bevorstehende Veränderung ist deshalb vor allem auch eine Chance, die Bauberufe für junge Menschen wieder attraktiver zu machen und damit die Ausbildungszahlen in diesen Berufen zu erhöhen. Der Umgang mit automatisierten Baumaschinen, komplexen Softwaretools, Cloudcomputing, Virtual und Augmented Reality (VR/AR) oder der Steuerungstechnik verschiedener Produktionsmaschinen wird dafür übergreifend, wenn auch unterschiedlich akzentuiert und gewichtet, Teil der Ausbildung werden müssen. Wichtig ist dabei zum einen, dass der Fokus nicht nur auf rein fachliche Fähigkeiten wie Software- und Maschinenkenntnisse gelegt wird, sondern vermehrt auch soziale Kompetenzen, wie vernetztes Denken und die kooperative, ganzheitliche Arbeitsweise, gelehrt werden. Zum anderen müssen die Ausbildungsinhalte parallel zur technologischen Weiterentwicklung regelmäßig angepasst werden. Unterstützt werden kann dies durch moderne Ausbildungsmittel wie beispielsweise interaktive Simulatoren oder Blended-Learning-Methoden. Allerdings ist digitales Equipment teuer in der Anschaffung und erfordert auch entsprechend qualifiziertes Lehrpersonal. Gerade die Berufsschulen, die großen Nachholbedarf bei der Digitalisierung haben, benötigen deshalb langfristige finanzielle Unterstützung.

Ohne Zweifel wird der digitale Wandel Zeit benötigen und die Forcierung der Technikentwicklung alleine nicht ausreichend sein, damit Innovationen letztlich auch in der Praxis ankommen. Mit Blick auf die Umsetzungsfähigkeit von Innovationen in der Bauwirtschaft ist stattdessen ein wesentlich erweiterter Blickwinkel notwendig, der auch systemische Rahmenbedingungen und weiche kulturelle Aspekte einbezieht (Betriebsführung, Risikobereitschaft, Kommunikationskultur etc.). Angesichts der Kleinteiligkeit der Baubranche werden digitale Anwendungen nur dann erfolgreich sein, wenn sie den Anforderungen und Bedürfnissen der KMU gerecht werden. Diese sollten deshalb Gelegenheit haben, die Innovations- und Standardisierungsprozesse mitzugestalten. Dafür müssen entsprechende Strukturen geschaffen bzw. ausgebaut werden (z. B. regionale Kompetenz- und Demonstrationszentren, Informations- und Beratungsangebote, niederschwellige Fördermaßnahmen). Bei der Überführung von sinnvollen und nachhaltigen Innovationen in die Praxis kommt vor allem dem Staat als großem Bauherrn eine wichtige Vorbildfunktion zu.

1 Einleitung

Der große Bedarf an bezahlbarem Wohnraum und der vielfach als nicht ausreichend eingeschätzte Wohnungsbestand stellen eine große nationale Herausforderung dar, zu deren Lösung eine leistungsfähige Bauwirtschaft unabdingbar ist. Die Bauwirtschaft plant und realisiert private, gewerbliche und öffentliche Bauvorhaben, von der kontinuierlichen Modernisierung der Infrastruktur bis zu einzelnen Großprojekten. Unterschiedliche Bauteilbereiche von Neubau über Reparatur/Rekonstruktion bis Modernisierung werden durch vielfältige allgemeine oder teilweise hochspezialisierte, kleine regionale Planungsbüros, Handwerksbetriebe bis hin zu international agierenden Großunternehmen bedient.

Der erheblichen Nachfrage nach Baudienstleistungen stehen im Baugewerbe inzwischen u. a. aber auch Personalengpässe gegenüber. Der Arbeitskräftemangel ist aktuell bereits ein Hindernis, notwendige Bautätigkeiten zeitnah auszuführen. Auch fallen die durch Produkt- und Prozessinnovationen verursachten Produktivitätsgewinne in der Baubranche im Vergleich zur Gesamtwirtschaft seit vielen Jahren immer geringer aus. Zudem erhöhen kontinuierlich steigende normative Vorgaben die Planungs- und Ausführungsanforderungen, die Komplexität der Ablaufstrukturen sowie Aufwands- und Kostenkomponenten von Bauvorhaben. Aufgrund dessen ergibt sich ein erheblicher Bedarf an technischen und organisatorischen Innovationen in der Bauwirtschaft, um die anstehenden Herausforderungen meistern zu können. Etliche (digital)technische Neuerungen und Weiterentwicklungen werden diskutiert, vorangetrieben, teilweise auch getestet und eingesetzt. Die Bandbreite reicht von neuen technischen Möglichkeiten zur Vermessung und Dokumentation u. a. durch Drohnen und Spezialensoren, Assistenzsysteme für Planungs- und Ausführungsdokumentation sowie Abrechnungstätigkeiten, dem Einsatz hochspezialisierter Baumaschinen und unterstützender Robotik bei der Bauausführung bis hin zu innovativen Fertigungsverfahren für Bauteile u. a. mittels 3-D-Druck und Hightechwerkstoffen. Ambitionierte Initiativen zielen auf die zunehmende Vernetzung von Maschinen und Assistenzsystemen bis hin zur Erfassung sämtlicher bauwerksrelevanter Daten und Dokumente zur Generierung virtueller Bauwerkmodelle, um sämtliche Prozessabläufe zumindest für die Planung und Realisierung eines Bauvorhabens über übergeordnete Managementsysteme zu realisieren (Bauen 4.0).

Obwohl Baustoffhersteller, bauausführende Bauindustrie und deren Verbände inzwischen durchaus bautechnische sowie forschungs- und entwicklungsbezogene Schwerpunkte setzen, sich an entsprechenden nationalen und europäischen Plattformen beteiligen, Kompetenzzentren gegründet und durch die Politik Gutachten, Strategien und Aktionspläne für bauliche Großprojekte erstellt und Wohngipfel durchgeführt wurden, wird das tatsächliche Potenzial technischer Innovationen bei der Lösung derzeitiger baulicher Herausforderungen oftmals noch nicht hinreichend erkannt bzw. genutzt.

Vor diesem Hintergrund hat der Deutsche Bundestag das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) mit der Durchführung eines TA-Projekts »Innovative Technologien, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft« beauftragt. Entsprechend soll der vorliegende Bericht einen Überblick über relevante Trends in Bezug auf Technologie-, Produkt- und Prozessinnovationen in der Baubranche geben. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf technischen Neuerungen bei der Planung und Konstruktion von Bauwerken, die Potenziale vor allem in Bezug auf Produktivitätssteigerungen sowie Zeit- bzw. Kostensenkungen bieten. Möglichkeiten und Grenzen sowie Spezifika bei der Implementierung im Wohnungsbau wie auch beispielhaft bei größeren Infrastrukturprojekten werden beleuchtet.

Berichtsstruktur

Die Gliederung orientiert sich an relevanten Trends in Bezug auf Technologie-, Produkt- und Prozessinnovationen in der Baubranche: Nach einem kurzen Überblick über die sektorspezifischen Rahmenbedingungen werden in den folgenden Kapiteln maßgebliche Innovationsbereiche erörtert (BIM, additive Verfahren, Modulbau und automatisierte Baumaschinen), wobei jeweils der Stand der Technik, Perspektiven wie auch wesentliche Handlungsfelder herausgearbeitet werden. Auf das wichtige Thema Nachhaltigkeit wird in einem eigenen Kapitel eingegangen, und übergreifende Handlungsoptionen (Bauen 4.0) werden zum Abschluss gesondert diskutiert.

Rahmenbedingungen für Innovation in der Bauwirtschaft (Kap. 2)

In diesem Kapitel werden zunächst die strukturellen und spezifischen systemischen Faktoren der Baubranche dargestellt und diskutiert, die bei einer stärkeren Implementierung der Digitalisierung in diesem Wirtschaftszweig mitberücksichtigt werden müssen. Als Auftakt wird der internationale, insbesondere der europäische Bauproduktmarkt, in der die deutsche Bauwirtschaft eingebettet ist, kurz skizziert. Es folgt eine Markt- und Strukturbeschreibung einschließlich der Entwicklungstendenzen der deutschen Bauwirtschaft, wobei besonders auf die aktuelle Situation des Wohnungsbaus, der Kapazitäten und der Fachkräfte eingegangen wird. Im Weiteren geht es um die Frage, inwieweit systemische Merkmale spezifische Auswirkungen auf die Produktivitätsentwicklungen dieses Wirtschaftssektors haben. Am Beispiel von Zement wird abschließend aufgezeigt, wie bestehende Baustofftechnologien die Innovationen der Bauwirtschaft mit beeinflussen.

Digitales Planen und Bauen mittels BIM (Kap. 3)

Von der konsequenten Digitalisierung der Abläufe in der Wertschöpfungskette Bau wird erhofft, Produktivität und Effizienz in der Branche massiv steigern und damit den Kapazitätsproblemen zumindest z. T. entgegenwirken zu können. Im Fokus steht dabei besonders das BIM. Es handelt sich hierbei um eine softwarebasierte Arbeits- und Planungsmethode, die auf Grundlage digitaler Gebäudemodelle durchgeführt wird und eine durchgängige digitale Vernetzung der Planungs- und Bauprozesse anstrebt, was die Abläufe und Arbeitsweise in der Branche grundsätzlich revolutionieren soll. In diesem Kapitel werden die Grundlagen, Potenziale und Implikationen eines BIM-Einsatzes beschrieben und diskutiert, wobei vor allem die Perspektiven für den Wohnungsbau in den Blick genommen werden. Herausforderungen der BIM-Umsetzung in Deutschland werden beleuchtet und das aktuelle Wissen bezüglich des BIM-Nutzens ausgewertet und zusammengefasst.

Additive Fertigung (Kap. 4)

In innovative Fertigungsverfahren für Bauteile mittels 3-D-Druckverfahren werden in Verbindung mit neuen Verbundwerkstoffen große Erwartungen gesetzt, die vergleichsweise niedrige Produktivität und Wertschöpfung in der Baubranche zu erhöhen. Als 3-D-Druck wird die Herstellung dreidimensionaler Bauteile mithilfe eines automatisierten Schichtaufbaus bezeichnet, bei der das gewünschte Bauteil auf der Grundlage eines digitalen 3-D-Modells durch gezieltes, kontinuierliches Auftragen des Ausgangsmaterials sukzessive aufgebaut wird. Der Baubereich, der sich durch komplexe Einzelfertigungen auszeichnet, ist im Prinzip für additive Verfahren prädestiniert. Da die wichtigsten Massenbaustoffe mineralisch gebundene Baustoffe sind, steht bei der additiven Fertigung im Bauwesen die Verwendung von 3-D-Beton im Mittelpunkt des Interesses und nimmt in diesem Kapitel entsprechend den größten Raum in der Beschreibung und Bewertung ein. Aber auch Stand und Perspektiven des 3-D-Drucks mit anderen Materialien wie Metallen, Kunststoff oder Holz werden kurz beleuchtet.

Serielles und modulares Bauen (Kap. 5)

Beim seriellen Bauen werden Gebäude nicht als Unikate geplant und errichtet, sondern industriell, also in Serie, vorgefertigt. Eng verwandt damit ist das modulare Bauen, bei dem Teile des Bauwerks (wie etwa die Gebäudehülle) aus industriell vorgefertigten Bauteilen, den Modulen, nach dem Baukastenprinzip zusammengesetzt werden. Beide Bauweisen sind in den letzten Jahren verstärkt in den Fokus gerückt – u. a. auch deshalb, weil digitale und weitgehend vollautomatisierte Vorfertigungsmethoden eine nie dagewesene Komplexität und Variabilität der Fertigteile und Module ermöglichen. Diese sind in der Regel aus Beton, Holz oder Stahl bzw. einer Kombination dieser Werkstoffe gefertigt, wobei jedes Material seine spezifischen Eigenschaften und damit Vor- und Nachteile hat, die in diesem Kapitel beleuchtet werden. Nach einem Überblick über den Stand der Technik und über die Marktsituation in Deutschland werden am Beispiel der modernen Betonfertigteileproduktion, des modularen Holzbaus sowie der Stahlmodulbauweise die Potenziale der Digitalisierung für den Fertigteile- und Modulbau genauer ausgeführt, aber auch die Herausforderungen und Hemmnisse für eine breitere Marktdurchdringung dieser Bauweisen aufgezeigt.

Automatisierte Baumaschinen und Robotik (Kap. 6)

Aufgrund ihrer Schlüsselrolle in Bauprozessen haben Baumaschinen maßgeblichen Einfluss auf die Effektivität und die Effizienz der Bauausführung. Der für die Baubranche im Allgemeinen festzustellende, nur unzureichende Digitalisierungsgrad gilt jedoch auch für den Baumaschinensektor. So gibt es bis dato nur eine geringe Durchdringung des Marktes mit digitalisierten Systemen, die für den harten Baustelleneinsatz geeignet sind, obwohl zahlreiche Ideen und Ansätze für weitreichende Automatisierungslösungen vorliegen. Vor diesem Hintergrund werden der Stand und die Perspektiven der Automatisierung und Digitalisierung im Baumaschinenbereich inklusive Baurobotik und moderne Vermessungstechnologien beschrieben und analysiert. Zuerst werden wichtige Rahmenbedingungen erläutert, die Einfluss auf die Entwicklung und den Betrieb von Baumaschinen nehmen. Anhand von Vermessung, Tief-, Straßen- und Hochbau wird anschließend der Status quo der Maschinenteknik im Bauprozess aufgezeigt, bevor der aktuelle Stand sowie die Entwicklungsperspektiven von zentralen Grundlagentechnologien für die Automatisierung und Digitalisierung von Baumaschinen (wie Navigation, Personen- und Objekterkennung, Antriebstechnik etc.) beleuchtet werden.

Innovative Technologien, Prozesse und Produkte im Baugewerbe aus Umweltsicht (Kap. 7)

Der globale Ressourcenverbrauch hat in den letzten 4 Jahrzehnten enorm zugenommen, und die Baubranche ist daran in hohem Maße beteiligt. So entfällt etwa die Hälfte der weltweiten Materialförderung auf nichtmetallische Mineralien, von denen fast alle für Bauzwecke verwendet werden. Der Bausektor steht mithin vor großen Herausforderungen, den zukünftigen Anforderungen des Klimaschutzes sowie den Zielen einer nachhaltigen Entwicklung im Zusammenhang mit Ressourcennutzung gerecht zu werden. Daraus folgt, dass die hier untersuchten Potenziale der Digitalisierung nicht allein auf ökonomische Faktoren wie Produktivität, Bauzeit und -kosten ausgerichtet sein dürfen, sondern auch Nachhaltigkeitsziele maßgeblich zu beachten sind. Aus diesem Grund werden nach einer kurzen Einführung in den Begriff Nachhaltigkeit die in den vorangegangenen Kapiteln behandelten Innovationen wie BIM, additive Fertigungsverfahren, Modulbau sowie automatisierte Baumaschinen aus Umweltsicht reflektiert. Wie sich zeigen wird, hängt die Fähigkeit des Baugewerbes, zukünftig sowohl innovativ als auch nachhaltig zu sein, nicht nur von neuen Technologien ab, sondern im großen Maße auch davon, ob es gelingt, die traditionellen Massenbaustoffe durch nachhaltigere, allem voran klimaneutrale Baustoffe zu substituieren.

Bauen 4.0 – übergreifende Aspekte und Handlungsfelder (Kap. 8)

In diesem abschließenden Kapitel werden übergreifende Aspekte und Handlungsfelder diskutiert, die sich hinsichtlich der digitalen Wertschöpfungskette Bauen 4.0 ergeben. Zusammenfassend wird verdeutlicht, dass in Bezug auf die Umsetzungsfähigkeit von Innovationen in der Bauwirtschaft ein erweiterter Blickwinkel notwendig ist, bei dem die infrastrukturellen und systemischen Rahmenbedingungen maßgeblich mit zu berücksichtigen sind. Zudem wird herausgestellt, dass ein integrativer Ansatz erforderlich ist, der neben der Implementierung von Digitalisierungs- und Automatisierungstechnologien auch die Entwicklung von zukunftsfähigen Bau- und Baustofftechnologien miteinschließt, die einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft genügen.

Gutachten

Im Rahmen des TAB-Projekts wurden drei Gutachten vergeben, deren Ergebnisse – neben substanziellen eigenen Recherchen und Analysen – in die Berichtserstellung eingeflossen sind:

- › Fertigungsverfahren und neue Verbund- und Werkstoffe für das Bauen 4.0. Prof. Dr. Viktor Mechtcherine, Dresden
- › Automatisierte Baumaschinen und Robotik. Prof. Dr. Frank Will, GWT-TUD GmbH, Dresden
- › Innovative Technologien, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft – Themenfeld 2: Digitales Planen und Bauen: Anwendungsperspektiven im Wohnungs(neu)bau. Prof. Dr. Joaquín Díaz, Nico Busch, Moritz Hofmann, Felix Krug, Milena Potpara, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen

Die Verantwortung für die Auswahl, Strukturierung und Verdichtung des Materials sowie dessen Zusammenführung mit Informationen aus eigenen Recherchen und Analysen liegt bei den Verfassern des Berichts, Dr. Christoph Kehl, Dr. Matthias Achternbosch und Dr. Christoph Revermann. Den Gutachter/innen sowie allen an der Erstellung der Gutachten beteiligten Expert/innen sei für ihre engagierte Kooperation im Projekt und ihre Diskussionsbereitschaft sehr herzlich gedankt. Ein herzlicher Dank geht schließlich an Carmen Dienhardt für die Aufbereitung der Abbildungen sowie Brigitta-Ulrike Goelsdorf für die Durchsicht des Manuskripts und die Erstellung des Endlayouts.

2 Rahmenbedingungen für Innovation in der Bauwirtschaft

In diesem Kapitel werden strukturelle und spezifische systemische Faktoren der Baubranche diskutiert, die bei einer stärkeren Implementierung der Digitalisierung in diesem Wirtschaftszweig mitberücksichtigt werden müssen. Als Auftakt folgt in Kapitel 2.1 eine Markt- und Strukturbeschreibung der deutschen Bauwirtschaft, wobei besonders auf die aktuelle Situation des Wohnungsbaus, auf konjunkturelle Entwicklungstendenzen und die Betriebs- sowie Beschäftigungsstruktur eingegangen wird. Danach wird die Produktivitätsentwicklung der deutschen Bauwirtschaft einer genaueren Betrachtung unterzogen, inklusive eines Vergleichs mit anderen europäischen Ländern (Kap. 2.2). Abschließend geht es um die Frage, inwieweit systemische Merkmale spezifische Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit dieses Wirtschaftssektors haben (Kap. 2.3). Dabei wird u. a. am Beispiel Zement dargelegt, inwieweit bestehende Baustofftechnologien die Innovationsfähigkeit der Bauwirtschaft mit beeinflussen.

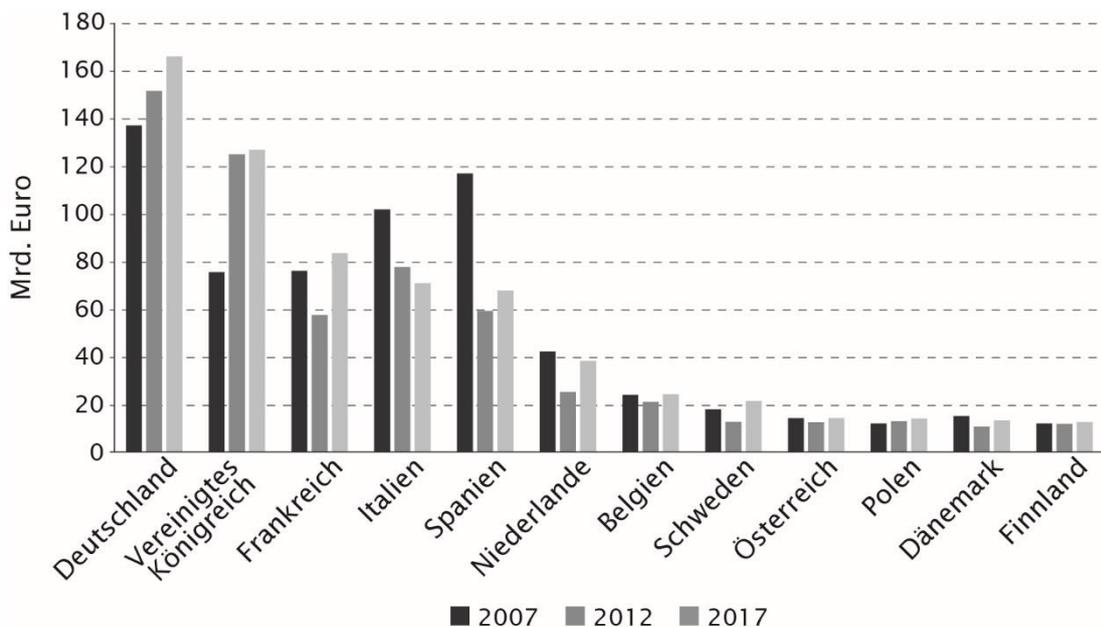
2.1 Struktur und Markt der Bauwirtschaft

Die Bauwirtschaft zählt auf globaler und europäischer Ebene zu den sehr großen Wirtschaftssektoren. Das jährliche globale Bauvolumen wurde 2019 auf etwa 12.700 Mrd. US-Dollar geschätzt (The Business Research Company 2020), nachdem es ab 2015 jährlich um durchschnittlich 6,1 % gestiegen war. In der Europäischen Union (EU-28) wurden 2017 rund 1.400 Mrd. Euro in Wohn- und Nichtwohnbauten investiert (Rein/Schmidt 2018). Davon betragen die Wohnungsbauinvestitionen 686 Mrd. Euro. Deutschland hatte hiervon anteilig ein Investitionsvolumen von 166,2 Mrd. Euro und ist damit im Wohnungsbau im europäischen Vergleich Spitzenreiter, wie aus einem Überblick über die Entwicklung der Bauinvestitionen in ausgewählten EU-Ländern (Abb. 2.1) hervorgeht. Auf den weiteren Plätzen folgen Frankreich, das Vereinigte Königreich, Italien und Spanien. Im Nichtwohnungsbau (gesamte EU-28: 717 Mrd. Euro) befindet sich Deutschland mit 107,8 Mrd. Euro dagegen nach Frankreich und dem Vereinigten Königreich nur an dritter Stelle.

Das Wachstum des Bauvolumens für 2019 im EUROCONSTRUCT-Gebiet² lag bei 2,3 % (Dorfmeister 2019). Das Forschungs- und Beratungsnetzwerk EUROCONSTRUCT (2019) senkte Ende Dezember 2019 (also noch vor der COVID-19-Pandemie) seine Wachstumsraten für die mittelfristige europäische Baukonjunktur, begründet vor allem durch Turbulenzen im Welthandel. Aufgrund der COVID-19-Pandemie, deren wirtschaftliche Auswirkungen immens sind, sind jedoch diese und weitere Konjunkturprognosen bereits Makulatur. Für 2020 wurde prognostiziert, dass die Leistungen im Neubau um 14,3 % und die im Bestand um 10,6 % zurückgehen (Dorfmeister 2020).

² Zum Euroconstruct-Gebiet EC-19 gehören die Länder Österreich, Belgien, Dänemark, Finnland, Frankreich, Deutschland, Irland, Italien, die Niederlande, Norwegen, Portugal, Polen, Spanien, Schweden, die Schweiz, Tschechien, die Slowakei, Ungarn sowie das Vereinigte Königreich.

Abb. 2.1 Reale Wohnungsbauminvestitionen in ausgewählten EU-Ländern



Eigene Darstellung nach Rein/Schmidt 2018

2.1.1 Definitionen und Begriffe im Kontext Bau

Notwendig ist eine Definition bzw. Abgrenzung von verschiedenen Begriffen im Kontext Bau. Begriffe wie *Bauwirtschaft*, *Baubranche* und *Baugewerbe* sind zwar als Synonyme zu verstehen, allerdings kennzeichnet der Begriff *Baugewerbe* in der Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ 2008) der amtlichen Statistiken den entsprechenden Zweig des produzierenden Gewerbes (Statistisches Bundesamt 2008). Das Projektmanagement für Bauvorhaben sowie der Planungsbereich der Architektur- und Ingenieurbüros sind dabei nicht miteingeschlossen. Die WZ 2008 baut rechtsverbindlich auf der statistischen Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft (NACE Rev. 2) auf. Das Baugewerbe setzt sich dort aus den drei Sektoren »Hochbau« (WZ-Nr. 41), »Tiefbau« (WZ-Nr. 42) und »Vorbereitende Baustellenarbeiten, Bauinstallation und sonstiges Ausbaugewerbe« (WZ-Nr. 43) zusammen. Es umfasst in dieser Systematik somit allgemeine und spezialisierte Hoch- und Tiefbautätigkeiten. Dazu zählen Neubau, Instandsetzung, An- und Umbau, die Errichtung von vorgefertigten Gebäuden oder Bauwerken auf dem Baugelände sowie provisorische Bauten.

Die in Deutschland in der Bauwirtschaft übliche sowie auch von den statistischen Ämtern verwendete Unterteilung des Baugewerbes in *Bauhaupt-* und *Ausbaugewerbe* sind in der WZ 2008 nicht vorgesehen (Statistisches Bundesamt 2008).³ Das Bauhauptgewerbe ist laut WZ-Klassifikation eine Teilmenge des Baugewerbes. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Analyse konjunktureller und struktureller Entwicklungstendenzen im Baugewerbe auch andere Branchen einbeziehen kann, die zum Baugeschehen beitragen; dazu zählen der Stahl- und Leichtmetallbau, die Herstellung von Fertigtbauten und spezielle Sparten anderer Wirtschaftsbereiche. Zudem sind auch Planungsleistungen und andere Dienstleistungen miteingeschlossen. Somit können sich die Ergebnisse konjunktureller und struktureller Analysen, entsprechend den berücksichtigten Rahmenbedingungen, z. T. erheblich voneinander unterscheiden.

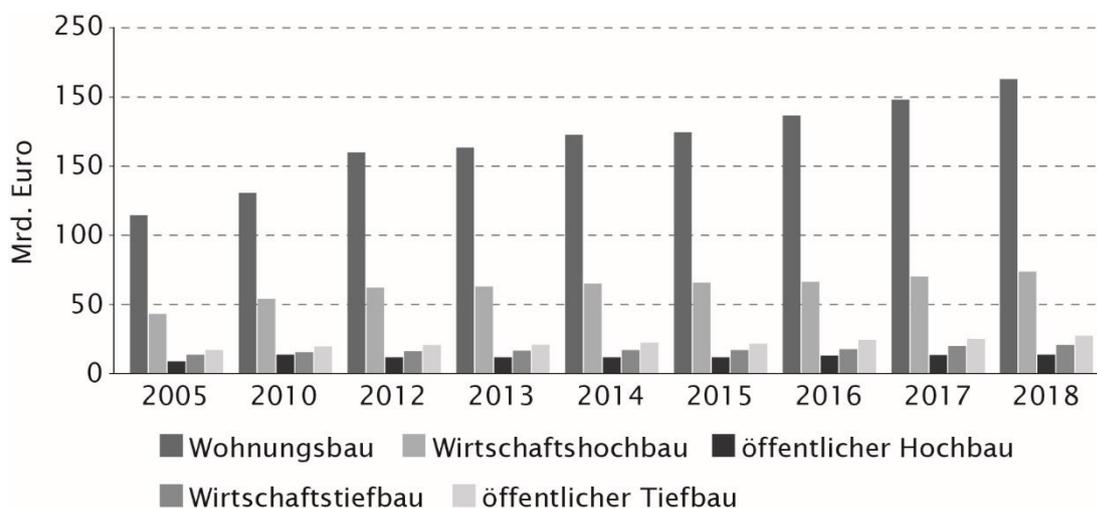
³ Im Sinne des Gesetzes über die Statistik im Produzierenden Gewerbe (ProdGewStatG) sind dem Bauhauptgewerbe die Gruppen »Bau von Gebäuden« (WZ-Nr. 41.2), »Bau von Straßen und Bahnverkehrsstrecken« (WZ-Nr. 42.1), »Leitungstiefbau und Kläranlagenbau« (WZ-Nr. 42.2), »Sonstiger Tiefbau« (WZ-Nr. 42.9), »Abbrucharbeiten und vorbereitende Baustellenarbeiten« (WZ-Nr. 43.1) und »Sonstige spezialisierte Bautätigkeiten« (WZ-Nr. 43.9) zugeordnet (Statistisches Bundesamt 2019d). Das Ausbaugewerbe umfasst die Gruppen »Bauinstallation« (WZ-Nr. 43.2), »Sonstiger Ausbau« (WZ-Nr. 43.3) und »Erschließung von Grundstücken, Bauräger« (WZ-Nr. 41.1).

Die Datenbasis der amtlichen Statistik ist zur Beschreibung des Baugewerbes für bestimmte Fragestellungen im Kontext Bauvolumen und Beschäftigungsstruktur nicht aussagekräftig. Ein Grund dafür liegt in den Abschneidegrenzen der amtlichen Statistik, die in der Regel bei Betrieben und Unternehmen mit 20 und mehr Beschäftigten gezogen werden.⁴ Wie in Kapitel 2.1.3 ausgeführt wird, haben Betriebe mit weniger als 20 Beschäftigten einen erheblichen Anteil an diesem Gewerbe, wodurch es zu Verzerrungen in statistischen Analysen kommen kann. Für eine Darstellung der strukturellen Veränderungen im Baugewerbe ist es erforderlich, die Informationslücken nach Möglichkeit zu schließen. Neben den verfügbaren Angaben der fachlichen Statistiken zum Baugewerbe sind hier vor allem die der Umsatzsteuerstatistik relevant, denn dort sind alle inländischen Unternehmen und Gewerbetreiber/innen – mit wenigen Ausnahmen bezüglich einer Geringfügigkeitsgrenze – erfasst; hinzu kommt, dass der Umsatzsteuerstatistik eine sehr detaillierte Branchengliederung zugrunde liegt (Rein 2019).

2.1.2 Konjunkturelle und strukturelle Entwicklungstendenzen der deutschen Bauwirtschaft

2018 hatten Baumaßnahmen rund 10% Anteil am deutschen Bruttoinlandsprodukt⁵ und das Baugewerbe trug 5,3% zur gesamtwirtschaftlichen Bruttowertschöpfung bei. Die Entwicklung der Bauinvestitionen nach Bausparten von 2005 bis 2018 ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

Abb. 2.2 Entwicklung der Bauinvestitionen nach ausgewählten Bausparten



Eigene Darstellung nach HDB 2019

In den letzten Jahren war in der Baubranche ein starker konjunktureller Aufschwung zu verzeichnen, der vor allem durch den Wohnungsbau angetrieben wurde. Im 1. Quartal 2019 konnte das Bauhauptgewerbe den höchsten je gemessenen Auftragsbestand (53 Mrd. Euro) aufweisen (B_I Medien 2019). Für den Auftragseingang der Betriebe mit mindestens 20 Beschäftigten bedeutete dies ein Plus um 17,8%. So erzielte das Bauhauptgewerbe 2019 ein Umsatzwachstum von 6,7% gegenüber 2018, insgesamt wurden ca. 135 Mrd. Euro erwirtschaftet. Der Wohnungsbau legte um 5,1% zu.⁶

⁴ Ausschließlich in der jährlichen Totalerhebung im Bauhauptgewerbe werden alle Betriebe (d. h. auch jene mit weniger als 20 Beschäftigten) berücksichtigt. Die jährliche Erhebung im Ausbaugewerbe wird dagegen nur in Betrieben mit mehr als 10 Beschäftigten durchgeführt. Hintergrund ist, dass im Ausbaugewerbe zahlenmäßig die kleinen Betriebe in noch deutlicherer Größenordnung als im Bauhauptgewerbe dominieren. Hier steht das Argument der Entlastung kleiner Betriebe von regelmäßigen statistischen Berichtspflichten im Vordergrund. Dies kann nach Angaben des DIW zu Verzerrungen führen.

⁵ https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/bauwirtschaft-im-zahlenbild/bedeutung-der-bauwirtschaft_bwz/ (27.01.2020)

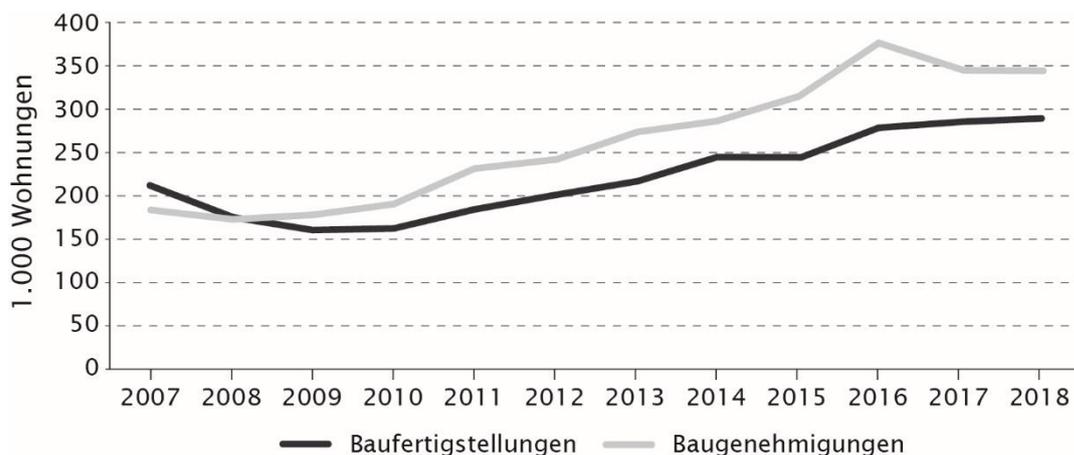
⁶ https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/bauwirtschaft-im-zahlenbild/umsatze-im-bauhauptgewerbe-nach-sparten_bwz/ (12.3.2021)

Alles in allem wurden von 2011 bis 2017 1,44 Mio. Wohnungen gebaut (Prognos 2019), wobei vor allem die Zahl von Mehrfamilienhäusern deutlich zunahm. Hintergrund ist der stark steigende Bedarf an Wohnraum. Im Vergleich zu 2010 leben ca. 2,5 Mio. Menschen mehr in Deutschland (Zunahme um 3%; Bundesregierung 2019) – bezahlbarer Wohnraum ist in Deutschland somit zunehmend knapp geworden. Seit Jahren sind nicht nur in Ballungsräumen wie München, Stuttgart oder Berlin in der Folge hohe und steigende Mieten und Immobilienpreise zu verzeichnen. In der jüngeren Vergangenheit wurden deshalb vielfältige politische Maßnahmen eingeleitet, wie z. B. die Wohnungsbauffensive 2016 (Bundesregierung 2017), um die Bautätigkeit anzukurbeln.⁷

Allerdings wird nach Angaben von Prognos (2019) der von der Bundesregierung (2018d) im Rahmen der Wohnraumoffensive ausgewiesene Bedarf an 375.000 neuen Wohnungen pro Jahr bislang nicht gedeckt. Mit insgesamt 287.000 fertiggestellten Wohnungen lag die Bedarfsdeckung 2018 bei 77%. Im sozialen Wohnungsbau wurde 2017 nur ein Drittel des erforderlichen Bedarfs von 80.000 Wohnungen fertiggestellt. Dies führt zu einer zunehmenden Anspannung auf den Wohnungsmärkten, forciert durch knappe Flächenreserven sowie gestiegene Baukosten. Langfristig rechnet das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) mit einem sich abschwächenden Bedarf, dennoch werden bis 2030 voraussichtlich pro Jahr durchschnittlich immer noch ca. 230.000 neue Wohnungen benötigt.

Daten des Statistischen Bundesamtes (2020d) zu den Baugenehmigungen und Baufertigstellungen von Wohngebäuden der letzten Jahre zeigen, dass die Fertigstellungen den Genehmigungen hinterherhinken (Abb. 2.3). Dies lässt sich u. a. auf Kapazitätsengpässe durch Fachkräftemangel innerhalb der Branche zurückführen.

Abb. 2.3 Baufertigstellungen und Baugenehmigungen von Wohnungen



Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt 2020e

2.1.3 Die Betriebs- und Beschäftigungsstruktur des Baugewerbes

Das Baugewerbe ist in Bezug auf seine Betriebsstruktur ein außergewöhnlich fragmentierter Wirtschaftsbereich. Es zählt ähnlich dem Gastgewerbe zu den Branchen, die von KMU dominiert werden. Laut Empfehlung der Europäischen Kommission (EK 2003) werden Kleinstunternehmen, kleine und mittlere Unternehmen wie folgt definiert: Ein Unternehmen zählt zu den KMU, wenn es nicht mehr als 249 Beschäftigte hat und einen Jahresumsatz von höchstens 50 Mio. Euro erwirtschaftet oder eine Bilanzsumme von maximal 43 Mio. Euro aufweist (Tab. 2.1). Auch die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) definiert den Mittelstand über einen maximalen Jahresumsatz von 50 Mio. Euro.

⁷ Ein neueres Instrument zur Förderung von bezahlbarem Eigenheim ist das im September 2018 eingeführte Baukindergeld, von dem man sich ebenfalls Impulse für den Wohnungsneubau erhofft. Allerdings gibt es Hinweise darauf, dass das Geld 2019 vorrangig (ca. 80%) für den Kauf von Bestandswohnungen verwendet wurde. Bis Ende November 2019 sollen 171.510 Anträge zum Baukindergeld gestellt worden sein (Spiegel Online 2019). Über die Zahl der Bewilligungen liegen von der KfW aktuell keine Informationen vor.

Tab. 2.1 KMU-Schwellenwerte der EU-Kommission seit 1.1.2005

Unternehmensgröße	Beschäftigte	Umsatz oder Bilanzsumme in Euro/Jahr
kleinst	bis 9	bis 2 Mio.
klein	bis 49	bis 10 Mio.
mittel	bis 249	bis 50 Mio.

Quelle: EK 2003

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes (2019c) erzielten KMU im Baugewerbe im Jahr 2017 rund 83 % des Umsatzes und beschäftigten rund 91 % der tätigen Personen. Von dem besonderen konjunkturellen Hoch im Jahr 2018 profitierten vor allem die KMU. Die Wachstumsrate (8,0 %) in diesem Segment erreichte 2018 den Höchststand der vergangenen 14 Jahre.

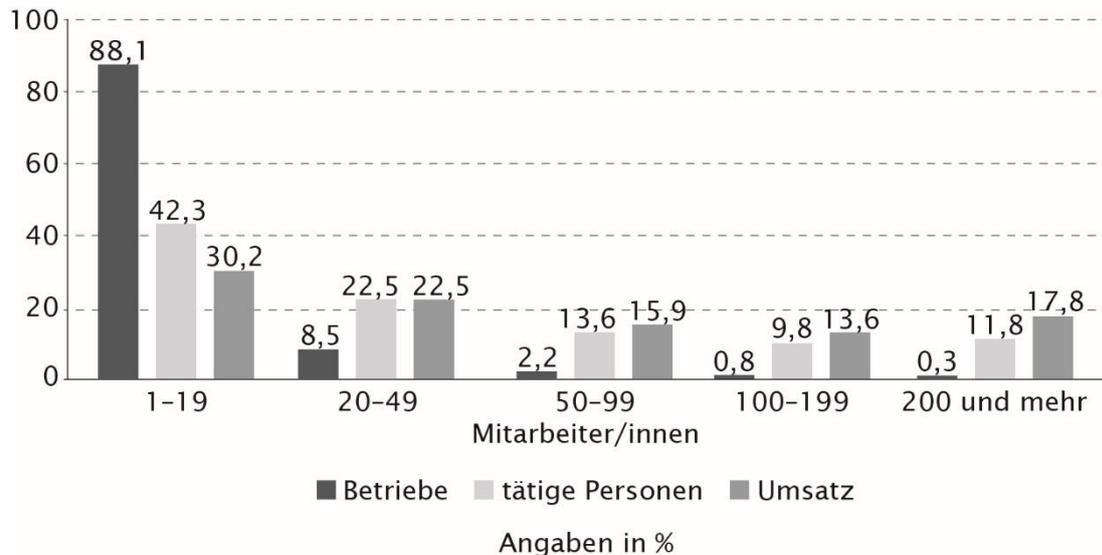
Traditionell liegt der Schwerpunkt der Datenbasis für die amtliche Statistik zur Beschreibung des Baugewerbes auf dem Bauhauptgewerbe. Für die Bereiche Bauinstallation und sonstiges Ausbaugewebe werden nur verhältnismäßig wenige und unvollständige Informationen bereitgestellt (Rein 2019). Das liegt u. a. daran, dass das Ausbaugewerbe nochmals deutlich fragmentierter ist als das Bauhauptgewerbe und Betriebe mit weniger als 10 Beschäftigten in amtlichen Statistiken nicht berücksichtigt werden (Schwarz 2018), was viele Betriebe des Ausbaugewerbes ausschließt. Bleibt dieser Sachverhalt bei Vergleichsanalysen unberücksichtigt, kann ein völlig falscher Eindruck von den Gewichten beider Teilbereiche entstehen. In Wirklichkeit hat das Ausbaugewerbe seit vielen Jahren eine höhere Produktionsleistung als das Bauhauptgewerbe (Rein 2019), was in den amtlichen Statistiken aber nicht zum Ausdruck kommt. Auch bezüglich der Beschäftigtenzahl liegt das Ausbaugewerbe vorn.

Im Bauhauptgewerbe haben von 74.873 Betrieben⁸ (Bezugsjahr 2018; Statistisches Bundesamt 2019c) nur 0,3 % 200 und mehr Beschäftigte, auf die jedoch ca. 18 % des baugewerblichen Umsatzes entfallen. Die weitere Aufschlüsselung der Betriebsstruktur zeigt eindrücklich, dass 55 % (36.172) der Betriebe mit weniger als 20 Mitarbeiter/innen (65.945) nur 1 bis 4 Personen beschäftigen. Bezogen auf alle Betriebe des Bauhauptgewerbes stellt diese Betriebsgröße (1 bis 4 Personen) fast die Hälfte aller im Bauhauptgewerbe ausführenden Betriebe. Abbildung 2.4 zeigt die Betriebsgrößen nach Beschäftigungsgrößenklassen für den Erhebungsmonat Juni 2018.

Auch wenn Kleinstunternehmen im Baugewerbe in Deutschland einen Anteil von 84 % aufweisen, sind im Vergleich zu den anderen großen europäischen Wirtschaftsländern Frankreich, dem Vereinigten Königreich, Spanien und Italien überdurchschnittliche Betriebsgrößen zu konstatieren (Rein/Schmidt 2018). So haben 12 % der deutschen Betriebe zwischen 10 und 19 Beschäftigte, wohingegen in den anderen Staaten diese Größenklasse nur einen Anteil von 2 bis 5 % ausmacht. Auch in den größeren Unternehmensklassen verzeichnet Deutschland mehr Betriebe als die vier anderen großen Länder – bei den größeren mittelständischen Unternehmen mit 50 bis 249 Mitarbeiter/innen hat Deutschland relativ gesehen mehr als doppelt so viele Unternehmen wie Frankreich. In Italien beträgt die Zahl der Betriebe in dieser Größenklasse nur ein Drittel, in Spanien fast nur ein Viertel des deutschen Wertes.

⁸ Die Zahl der im Baugewerbe erfassten Betriebe und Unternehmen variiert je nach herangezogener Statistik aufgrund der unterschiedlichen Erfassungsmethoden. So liegt die Zahl der Unternehmen nach der Unternehmensstatistik der Europäischen Gemeinschaft weit unterhalb der Berechnungen des DIW. Zu beachten ist, dass Eurostat die Zahlen der Unternehmen aus dem Unternehmensregister erfasst, während die nationale Fachstatistik und das DIW über die Anzahl der Betriebe berichten (Rein/Schmidt 2012).

Abb. 2.4 Betriebe, baugewerblich tätige Personen und baugewerblicher Umsatz nach Beschäftigungsgrößenklassen im Bauhauptgewerbe in Deutschland Ende Juni 2018



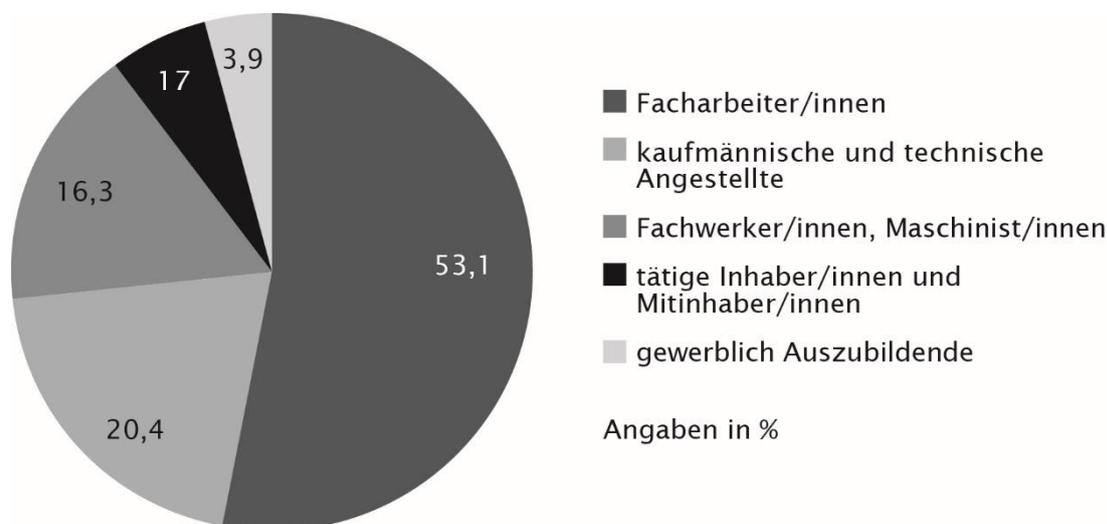
Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt 2019c

Die Zahl der im Baugewerbe beschäftigten Personen variiert je nach herangezogener Statistik aufgrund der unterschiedlichen Erfassungsmethoden. Wie das damalige Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS 2011) in Bezug auf Vergleichbarkeit hinweist, liegen die von Deutschland an Eurostat gemeldeten Zahlen zur Beschäftigung im Baugewerbe zwischen den Angaben der Fachstatistik (Untererfassung aufgrund der Beschränkung auf größere Betriebe) und den Berechnungen des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung e. V. (DIW Berlin); noch weit höhere Werte zeigen die Daten aus der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung, da in dieser alle im Inland tätigen Personen unabhängig von der Dauer der Arbeitszeit und einer anderen Haupterwerbsquelle erfasst werden (so etwa auch die rund 500.000 geringfügig Beschäftigten im Baugewerbe).

Nach den Berechnungen des DIW Berlin waren 2018 im Baugewerbe ca. 1,977 Mio. Personen beschäftigt (Rein 2020). Davon waren 842.000 Personen im Bauhauptgewerbe⁹ erwerbstätig, der Rest entfiel entsprechend auf das Ausbaugewerbe. In der Sparte Hochbau (inklusive der Bauträger) arbeiteten 32% (643.000 Personen) aller Beschäftigten des Baugewerbes. Dem Tiefbau des Bauhauptgewerbes waren 11% aller Erwerbstätigen (225.000 Personen) zugeordnet (Rein 2019). Nach Berufsgruppen aufgegliedert stellten Facharbeiter/innen, Fachwerker/innen und Maschinist/innen ca. 70% der Beschäftigten der Branche (Abb. 2.5).

⁹ inklusive der unter »Bauträger« aufgeführten Beschäftigten zur Erschließung von Grundstücken

Abb. 2.5 Tätige Personen Ende Juni 2018 nach der Stellung im Beruf im Bauhauptgewerbe in Deutschland



Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt 2019c

Die Fachkräftesituation wird von vielen Expert/innen als schwierig eingeschätzt (Süddeutsche Zeitung 2020). Seit 2011 ist die Zahl der Erwerbslosen in der Branche um 40% gesunken, 2018 waren rund 70.000 offene Stellen nicht besetzt (BMWi 2019). Aufgrund der demografischen Entwicklung gehen zudem in den nächsten Jahren mehr Arbeitnehmer/innen der Branche in Rente, als durch Nachwuchs ausgeglichen werden kann. Die Branche versucht, den Engpässen durch eine verstärkte Rekrutierung von Arbeitskräften aus dem Ausland zu begegnen. So stieg der Anteil ausländischer Beschäftigter von 7,7% im Jahre 2009 auf 18% im Jahre 2018 (HDB 2019). Kapazitätsengpässe sieht der Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V. (HDB) derzeit nicht. Sollte die Entwicklung (hohe Baunachfrage bei gleichzeitig steigendem Bedarf an qualifiziertem Personal) jedoch unverändert voranschreiten, könnte sich der Fachkräftemangel in der Baubranche zuspitzen.

2.2 Die Produktivität der Bauwirtschaft

Mehrere Studien bescheinigen der Bauwirtschaft gegenüber anderen Branchen eine vergleichsweise niedrige Produktivitätsentwicklung¹⁰ in den letzten Jahrzehnten (Barbosa et al. 2017; Castagnino et al. 2016; Stern et al. 2018). Allerdings bestehen bei der Messung der Produktivität einer Branche etliche Schwierigkeiten und Herausforderungen, auf die im Folgenden eingegangen wird (Kap. 2.2.1). Anschließend wird die Arbeitsproduktivität als Maßstab für die Leistungsfähigkeit einer Branche definiert (Kap. 2.2.2), die Produktivitätsentwicklung der deutschen Baubranche in den letzten 20 Jahren dargestellt und mit den Verläufen in anderen europäischen Ländern verglichen (Kap. 2.2.3).

2.2.1 Produktivität – Definition, Messung und Aussagekraft

Die Produktivität P kann als ein Maß für die Leistungsfähigkeit der Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital eines Wirtschaftszweiges angesehen werden. Sie ist definiert als das Verhältnis von erzeugten Gütern und Dienstleistungen zu den dazu eingesetzten Produktionsfaktoren (Arbeit, Kapital, Material) oder allgemeiner die Relation von Output zu Input (Dellmann/Pedell 1994).

Die Gesamtproduktivität setzt sich aus den Teilproduktivitäten Arbeits-, Betriebsmittel-, Stoff- und Kapitalproduktivität zusammen. Man spricht auch von Faktorproduktivität und von Multifaktorproduktivität. Die

¹⁰ Hier im Sinne von Arbeitsproduktivität, d. h. Bruttowertschöpfung je Arbeitsstunde.

erste Größe stellt eine Funktion nur eines Produktionsfaktors (z. B. Arbeitsaufwand) dar, während letztere mehrere Produktionsfaktoren (Arbeitsaufwand, Verbrauchsstoffe, Betriebsmittel, Kapital etc.) berücksichtigt.

Die aufgeführte Definition erscheint eindeutig, jedoch können bei der Frage, was dem In- bzw. dem Output zugerechnet wird und was nicht, unterschiedliche Standpunkte auftreten (Krippendorf et al. 2015). Beispielsweise wird der Produzent in seiner Schätzung oder Berechnung der Produktivität den Output einbeziehen, den er selbst am Markt veräußern kann, und den Input, der ihm selbst Kosten verursacht. Es ist offensichtlich, dass man deshalb je nach Perspektive zu unterschiedlichen Einschätzungen der Produktivität kommt.

Die Produktivität wird auf der Industrie- oder Sektorebene, aber auch auf der Unternehmens- und Projektebene bestimmt. Projektbasierte Produktivitätsvergleiche (Fallstudien) können z. B. Bauunternehmen helfen, intern den Bereich zu identifizieren, in dem die Leistungsfähigkeit verbesserungsfähig ist. Produktivitätsanalysen auf Sektorebene beruhen in der Regel auf den Daten der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung. Grundsätzlich besteht dort das Problem, dass für den Input und Output die verschiedenartigsten Faktoren (z. B. die Stückzahl der Güter, die geleisteten Arbeitsstunden, die Tonnen an eingesetzten Rohstoffen, die Kilowattstunden an benötigter Energie sowie in Anspruch genommener Dienstleistungen) in Beziehung zu setzen sind. Dies erfolgt durch die Monetarisierung der Input- und Outputfaktoren. Dieses Vorgehen ist mit z. T. erheblichen Schwierigkeiten verbunden; es bestehen insbesondere methodische und statistische Probleme und Unsicherheiten (BMF 2017). Zu nennen sind hier z. B. die korrekte statistische Erfassung der einzelnen Produktionsfaktoren und die Preisbereinigung der nominalen Bruttowertschöpfung. Verzerrungen ergeben sich auch aufgrund der Festsetzung von Verrechnungspreisen und Preishöhen entlang der Wertschöpfungsketten. Auch wird die Monetarisierung des eingesetzten Kapitals¹¹ und der Abschreibungen als eine der großen Schwachstellen der Produktivitätsmessung angesehen (Krippendorf et al. 2015).

Die Schwierigkeiten der Produktivitätsmessung sind aufgrund der weltweit harmonisierten Referenzmethoden für die Erstellung volkswirtschaftlicher Gesamtrechnungen ein internationales Problem. Weltweit arbeiten nationale Forschungseinrichtungen und Regierungsorganisationen, wie z. B. die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), an der Verbesserung der volkswirtschaftlichen Leistungsmessungen. Alleine zwischen 2006 und 2017 wurden 5.423 wissenschaftliche Untersuchungen im Kontext Produktivität in der Bauwirtschaft in Fachzeitschriften veröffentlicht (Dixit et al. 2019). Für die Baubranche wird der Mangel an robusten Belegen für die Produktivitätsleistung auf die komplexe Struktur und die projektbasierte Arbeitsweise der Branche zurückgeführt (Sezer/Bröchner 2014), was für die hier vertretene These spricht, dass systemische und strukturelle Faktoren eine wichtige Rolle bei der Beurteilung der Produktivität dieser Branche spielen.

Die Europäische Union (EU) und die OECD haben mit dem Aufbau der Datenbanken »EU KLEMS« (Capital, Labour, Energy, Material, Services) und »OECD STAN« (Structural Analysis Database) beträchtliche Anstrengungen unternommen, um Leistungsmessungen von Branchen und Sektoren zu verbessern, doch werden diese Hilfsmittel von manchen Expert/innen nach wie vor für die politische und branchenspezifische Orientierung als ungenügend eingestuft (Dixit et al. 2019; Vogl/Abdel-Wahab 2015).

2.2.2 Die Arbeitsproduktivität als Maß für Effizienz

Um die Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Gesamtproduktivität zu umgehen, beschränkt man sich bei Produktivitätsanalysen meist auf die Arbeitsproduktivität. Diese ist vergleichsweise einfach zu bestimmen. Das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt (BIP) bzw. die preisbereinigte Bruttowertschöpfung (BWS) je Erwerbstätiger und je Erwerbstätigenstunde werden dabei vielfach als Maßstab verwendet (Statistisches Bundesamt 2020f).

Aber auch bei der Verwendung der Arbeitsproduktivität als Maßstab für die Effizienz sind folgende Punkte zu bedenken: Der Maßstab »BWS je Erwerbstätiger« ist von der Aussage her mit größeren Unsicherheiten behaftet als die Größe »BWS je Erwerbstätigenstunde«. Wie schon in Kapitel 2.1.3 dargelegt, kann die Zahl der Erwerbstätigen in den Statistiken aufgrund unterschiedlicher Erfassungsmethoden variieren. Unterschiedliche individuelle Arbeitszeitmodelle sowie Teilzeit und verschiedene Beschäftigungsformen führen zu erheblichen Schwierigkeiten und Unsicherheiten bei der Bestimmung der Zahl der Erwerbstätigen in einem Sektor. Wird zudem die Produktivität von Sektoren verschiedener Länder auf der Basis »BWS je Erwerbstätiger« miteinander

¹¹ Darunter sind nach Krippendorf et al. (2015) z. B. Produktionsanlagen, Immobilien, Beteiligungen, Lizenzen und Patente zu verstehen.

verglichen, ist zudem zu berücksichtigen, dass die Struktur der Erwerbstätigkeit länderspezifisch differieren kann. Im Vereinigten Königreich stellen z. B. die Selbstständigen (aufgrund von Gründungen vieler Kleinbetriebe) mehr als die Hälfte aller Erwerbstätigen im Baugewerbe. Werden in den Analysen nur die Arbeitnehmenden berücksichtigt, führt dies zu relativ hohen Arbeitsproduktivitätswerten für das Vereinigte Königreich. In Italien ist die Baubranche durch zahlreiche kleine Familienunternehmen mit unbezahlt mithelfenden Familienangehörigen geprägt. Auch hier kann die Bestimmung der Zahl der Erwerbstätigen zu Verzerrungen führen. In Deutschland, Spanien und Frankreich haben Arbeitnehmende einen Anteil an den Erwerbstätigen von ca. 80 % (Rein/Schmidt 2018).

Von der Arbeitsproduktivität darf nicht automatisch auf die Gesamtproduktivität geschlossen werden, was jedoch in vielen Analysen getan wird (Krippendorf et al. 2015). Das Statistische Bundesamt (2020f) weist mit Recht darauf hin, dass der ausschließliche Bezug auf den Produktionsfaktor Arbeit nicht die wahre Produktivität in einem Sektor bestimmt, die aus dem Zusammenwirken sämtlicher Produktionsfaktoren (also auch z. B. des Kapitals und der unternehmerischen Leistung) entsteht. Es besteht somit die Gefahr, dass die Arbeitsproduktivität als Maß für die Effizienz eines Wirtschaftssektors überbewertet wird. Im Falle einer als unzureichend bewerteten Produktivität wird dann in erster Linie der Faktor Arbeit als ursächlich angesehen – obwohl häufig gerade die anderen Produktionsfaktoren, vor allem die Kapitalproduktivität, unzureichende Produktivitätsraten begründen können (Krippendorf et al. 2015).

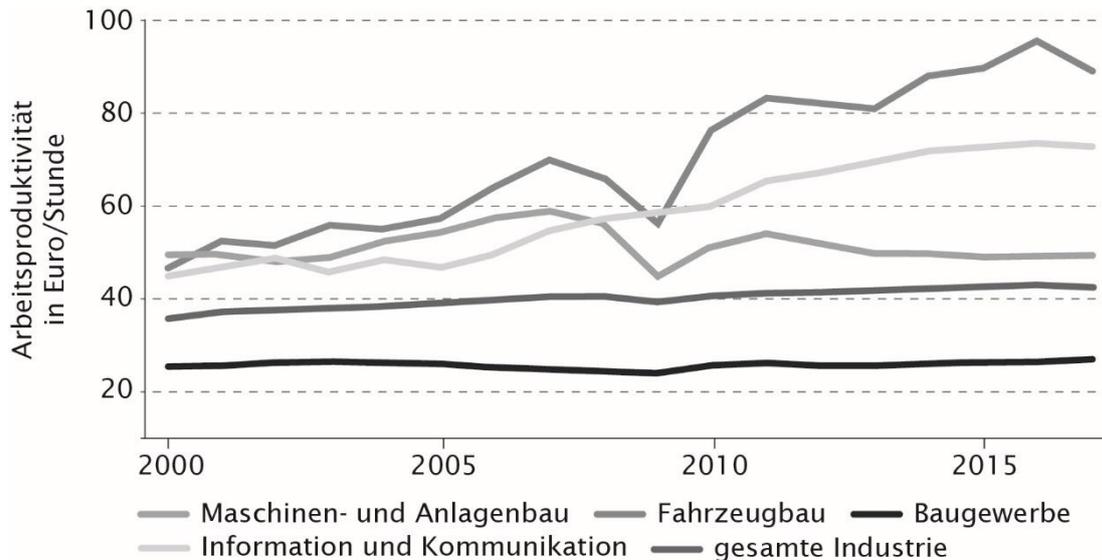
Die *Bruttowertschöpfung in jeweiligen Preisen* je Erwerbstätigenstunde – also bezogen auf die Preise, die für alle verkauften Güter innerhalb eines bestimmten Jahres bezahlt wurden – kann quasi als eine Momentaufnahme für die Arbeitsproduktivität angesehen werden. Für 2019 weist das Baugewerbe mit ca. 42,30 Euro im Vergleich zum »Produzierenden Gewerbe ohne Baugewerbe« (61,30 Euro) oder dem »Verarbeitenden Gewerbe« (59,00 Euro) eine niedrigere Arbeitsproduktivität auf (Statistisches Bundesamt 2020a). Der Bereich »Information und Kommunikation« verfügt dagegen mit 73,10 Euro über eine relativ hohe Arbeitseffizienz. Dagegen bewegen sich die Bereiche »Handel, Verkehr und Gastgewerbe« (36,30 Euro) und die »Dienstleister« (34,90 bis 41,80 Euro) in Bezug auf diesen Maßstab auf einem ähnlichen Niveau wie die Baubranche. Die durchschnittliche Arbeitsproduktivität für die gesamte Wirtschaft betrug 2019 ca. 54,80 Euro. Die Arbeitsproduktivität des Baugewerbes ist nach diesen Angaben somit unterdurchschnittlich.

Die Ursachen für die branchenbezogenen Arbeitsproduktivitätsunterschiede liegen z. T. daran, dass sich Wirtschaftszweige z. B. in Bezug auf Stoff-, Arbeits-, Maschinen- und Kapitalintensität erheblich unterscheiden. In vielen Branchen, wie z. B. dem Fahrzeug- und Maschinenbau, wird ein Großteil der Wertschöpfung über den Einsatz des Faktors Kapital generiert, was dazu führt, dass für diese Branchen die festgestellte Arbeitsproduktivität überbewertet ist.

Die folgenden Betrachtungen beruhen auf Angaben der Datenbank »EU KLEMS« (wiiw 2019), die Daten zur preisbereinigten Bruttowertschöpfung, zur Zahl der Beschäftigten und zu den Arbeitsstunden für einzelne Wirtschaftszweige enthält. Für die Analyse von Produktivitätsentwicklungen werden *preisbereinigte Werte für die Bruttowertschöpfung* und nicht *Werte in jeweiligen Preisen* verwendet, um Verzerrungen durch Preisänderungen zu vermeiden. In Abbildung 2.6 werden die Arbeitsproduktivitätsentwicklungen des Baugewerbes mit denen ausgewählter Wirtschaftszweige in Deutschland verglichen. Das Referenzjahr für die Preise ist 2010.

Demzufolge verharrte die Bruttowertschöpfung je Erwerbstätigenstunde der Baubranche von 2000 bis 2017 auf einem konstant niedrigen Niveau von ca. 25 Euro. Auf einem deutlich höheren Arbeitsproduktivitätsniveau bewegen sich die Sektoren »Maschinen- und Anlagenbau«, »Fahrzeugbau« sowie »Information und Kommunikation«. Die Arbeitsproduktivität der Gesamtindustrie war ab 2000 jährlich um durchschnittlich 1 % gestiegen und erreichte 2017 mit 42,50 Euro einen Wert, der um 65 % über dem der Baubranche lag.

Abb. 2.6 Entwicklung der Arbeitsproduktivität (Bruttowertschöpfung je Erwerbstätigenstunde) in ausgewählten Wirtschaftszeigen in Deutschland



preisbereinigte Bruttowertschöpfung; Bezugsjahr 2010

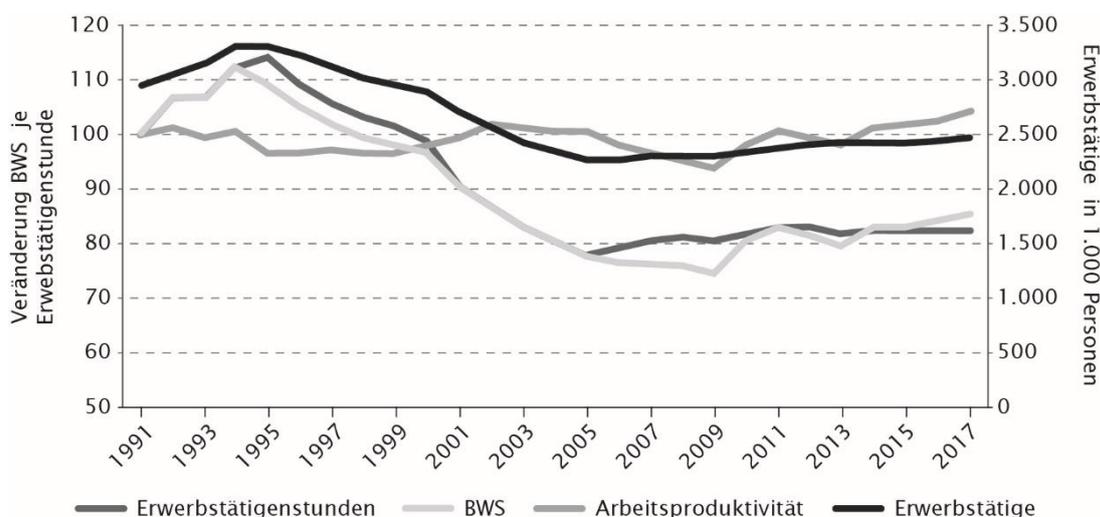
Eigene Berechnungen und Darstellung basierend auf wiiw 2019

Abbildung 2.7 führt zur Darstellung dieses Zusammenhangs für den Zeitraum von 1991 bis 2017 die Veränderungen der bereinigten Bruttowertschöpfung, der Erwerbstätigenstunden und der Arbeitsproduktivität auf. Hierbei sind die Veränderungen jeweils auf die Werte von 1991 bezogen (1991 = 100). Als zusätzliche Information enthält das Diagramm auch die Zahl der beschäftigten Personen im Baugewerbe.

Der betrachtete Zeitraum lässt sich in drei Phasen untergliedern: Von 1991 bis 1995 kam es durch die Wiedervereinigung zu einem außergewöhnlichen Bauboom, der als eine Ausnahmesituation betrachtet werden muss. Es folgte eine bis 2005 andauernde massive Rezession aufgrund eines deutlichen Nachfragerückgangs an Bauleistungen. Die dritte Phase betrifft die Zeit nach 2006. In jenem Jahr setzte ein Erholungsprozess ein, der allerdings von der Wirtschafts- und Finanzkrise nochmals beeinflusst wurde, was sich bis 2009 ungünstig auf die temporäre Produktivitätsentwicklung auswirkte. Nach der Krise war ein Bauaufschwung zu verzeichnen, der über den betrachteten Zeitraum hinaus bis zur COVID-19-Pandemie anhielt.

Wie Abbildung 2.7 aufzeigt, folgen die Erwerbstätigenstunden in weiten Bereichen dem Verlauf der Bruttowertschöpfung. Die Kurven laufen phasenweise fast in Deckung. Da die Arbeitsproduktivität den Quotienten aus BWS zu Erwerbstätigenstunden darstellt, führt dies rechnerisch dazu, dass der Wert für die Produktivität von 1991 bis 2014 nahezu unverändert bleibt. Zwar wird der synchrone Verlauf der Kurven zu manchen Zeitpunkten gestört, wie z. B. 1996 durch das Ende des Baubooms oder direkt vor und nach der Wirtschaftskrise. Ein Gleichgewicht zwischen Bruttowertschöpfung und Erwerbstätigenstunden stellt sich jedoch immer wieder ein. Der deutschen Bauwirtschaft ist es offenbar in dem betrachteten Zeitraum nicht gelungen, ihre Bruttowertschöpfung von der Arbeitsintensität zu entkoppeln und die Wertschöpfung je Arbeitsstunde zu steigern. Es stellt sich die Frage, ob diese Feststellung nur für Deutschland gilt oder auch in den anderen großen europäischen Bauländern ähnliche Entwicklungen zu beobachten sind.

Abb. 2.7 Veränderung der preisbereinigten Bruttowertschöpfung je Erwerb­st­ätigen­stunde im Bau­ge­wer­be



Werte sind auf 1991 normiert; 1991 = 100

Eigene Darstellung nach Die Deutsche Bauindustrie 2018; wiiw 2019

2.2.3 Die Arbeitsproduktivität des Baugewerbes im europäischen Vergleich

In diesem Kapitel soll die Entwicklung der Arbeitsproduktivität im Baugewerbe in Frankreich, Italien, dem Vereinigten Königreich und in den Niederlanden untersucht werden. Ziel ist es zu prüfen, inwieweit die spezifischen Verläufe in den einzelnen Ländern erklärt und nachvollzogen werden können und ob ein Gleichgewicht zwischen Bruttowertschöpfung und Erwerb­st­ätigen­stunden auch dort auftritt. Untersuchungen zu diesen Fragestellungen können helfen, die generelle Aussagekraft dieses Indikators besser zu beurteilen.

In der Literatur wird auf die Schwierigkeiten hingewiesen, die Produktivitätsmessungen verschiedener Länder miteinander zu vergleichen (BMF 2017). Beispielsweise harmonisieren die in den Länderprofilen des European Construction Sector Observatory¹² dargestellten Entwicklungen der Arbeitsproduktivität nicht für alle Länder mit entsprechenden Analysen des BBSR (Rein 2019) oder mit den Daten nach »EU KLEMS« (wiiw 2019). Insbesondere zur Entwicklung in Frankreich und dem Vereinigten Königreich existieren unterschiedliche, z. T. gegensätzliche Einschätzungen.

Um die Unsicherheiten zu minimieren und die Vorgehensweise nachvollziehbar zu machen, wurden im Rahmen des TAB-Projekts eigene Berechnungen auf der Basis von Daten der »EU KLEMS« durchgeführt. Die ermittelten Werte der Arbeitsproduktivität für ausgewählte Länder basieren auf preisbereinigten Volumenwerten für die Bruttowertschöpfung. Das Referenzjahr ist 2010. Als Maß für die Arbeitsproduktivität in einem bestimmten Jahr wurde der Quotient aus BWS-Wert im Baugewerbe des Jahres und Arbeitsstunden der Gesamtbeschäftigten des gleichen Jahres gebildet (wiiw 2019). Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.8a für den Zeitraum von 2000 bis 2017 dargestellt. Abbildung 2.8b stellt ergänzend den zeitlichen Verlauf der Beschäftigung im Baugewerbe in den entsprechenden europäischen Ländern dar. Dies erleichtert die Interpretation. Für die verschiedenen Länder zeigen sich im Einzelnen folgende Ergebnisse:

- › Nach den Daten der »EU KLEMS« erzielt *Frankreich* in der Bauwirtschaft eine relativ hohe BWS pro Erwerb­st­ätigen, die höher ist als in Deutschland. Unabhängig vom Baugewerbe wird der französischen Gesamtindustrie ein hohes Produktivitätsniveau in den letzten 20 Jahren zugewiesen (Eurostat 2020). Die Daten von 2000 bis 2008 lassen den Schluss zu, dass die Beschäftigung im französischen Baugewerbe im Vergleich zur Bruttowertschöpfung überproportional stieg, mit dem Effekt einer kontinuierlichen Absenkung der Arbeitsproduktivität. Dieser Trend setzte sich bis zum Ende der Finanz- und Wirtschaftskrise fort.

¹² https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/observatory_en (15.3.2021)

Ab 2013 fällt die Zahl der Erwerbstätigen leicht ab und die Arbeitsproduktivität im französischen Baugewerbe nahm seit der Krise rein rechnerisch wieder zu.

- › Das *Vereinigte Königreich* weist über den gesamten Zeitraum von 2000 bis 2017 einen relativ konstanten Verlauf der Arbeitsproduktivität ohne nennenswerten Zuwachs auf, ähnlich wie in Deutschland, wenn auch auf einem im Vergleich etwas niedrigeren Niveau.
- › Die Arbeitsproduktivität der *Niederlande* liegt im Vergleich zu den anderen betrachteten EU-Ländern auf relativ hohem Niveau und stieg bedingt durch ein Konjunkturhoch bis zur Weltwirtschaftskrise. Die auch in anderen Ländern danach auftretende Schwäche bei der Baunachfrage hielt bis 2012 an, was mit einer Phase fallender Produktivität verbunden war. Danach zog die Nachfrage insbesondere im Wohnungsbau stark an und führte im Zeitraum 2012 bis 2017 zu einem Zuwachs bei der Bruttowertschöpfung von ca. 19%. Da das niederländische Baugewerbe seine Beschäftigtenzahlen von konjunkturellen Einflüssen relativ unbeeinflusst von 2000 bis 2017 kontinuierlich abbaute (um 15%), führte dies in der Periode nach 2012 zu einem deutlichen Zuwachs der Arbeitsproduktivität.

Abb. 2.8 Die Entwicklung der Arbeitsproduktivität in ausgewählten EU-Ländern

Abb. 2.8a Arbeitsproduktivität im Baugewerbe in ausgewählten EU-Ländern; preisbereinigte BWS – Bezugsjahr: 2010

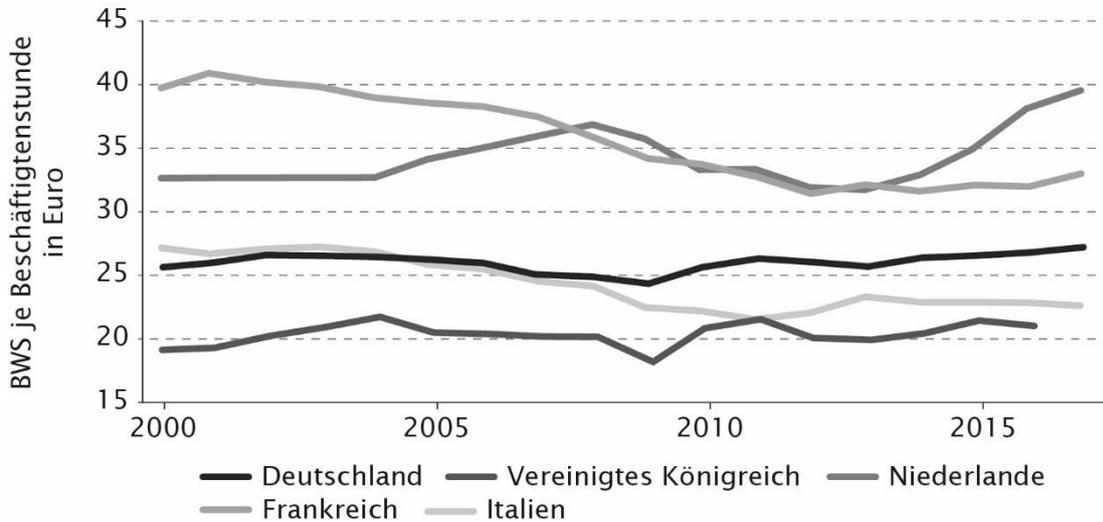
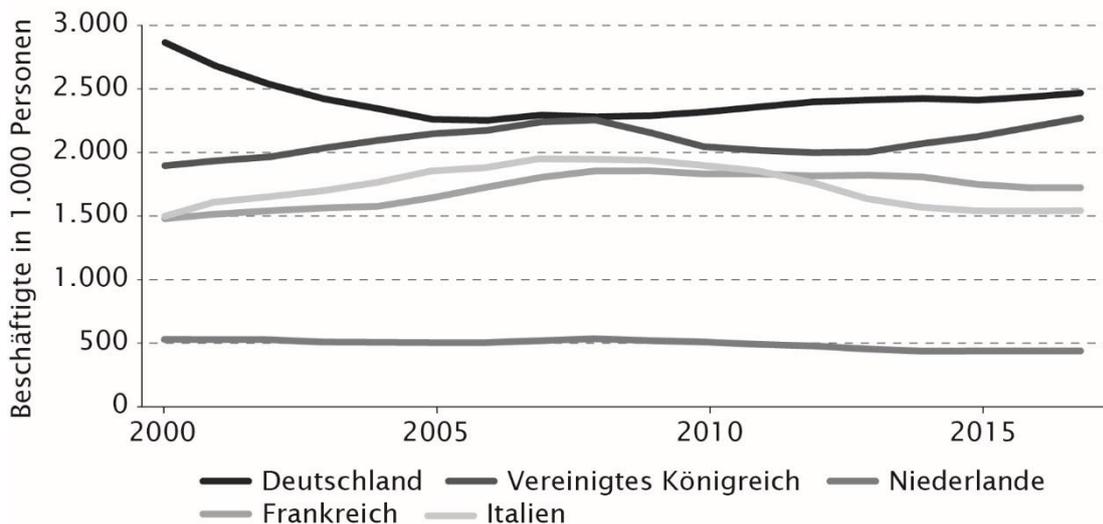


Abb. 2.8b Entwicklung der Beschäftigung im Baugewerbe in ausgewählten EU-Ländern



Eigene Berechnungen und Darstellungen nach wiiw 2019

- › In *Italien* nahm die Beschäftigung im Baugewerbe bis zur Weltwirtschaftskrise kontinuierlich zu. Da der Zuwachs an Beschäftigung in dieser Phase größer war als die Bruttowertschöpfung, führte dies zu einer Abnahme der Arbeitsproduktivität. Ab 2007 begannen die Bauinvestitionen im Zuge der Krise zu sinken, eine Entwicklung, die bis 2017 anhielt. Auch die Arbeitsproduktivität nahm weiter ab, obwohl in den Jahren nach der Krise bei sinkender Bruttowertschöpfung erst zögerlich, dann ab 2012 deutlicher Stellen abgebaut wurden. Ab 2011 stabilisierte sich die Arbeitsproduktivität.

Die Auswertung der Daten der »EU KLEMS« zeigt, dass trotz unterschiedlicher Rahmenbedingungen und Konjunktorentwicklungen in den jeweiligen europäischen Ländern die Arbeitsproduktivität über längere Zeiträume meist auf einem relativ konstanten Wert verharrt. So weist die Arbeitsproduktivität der Baubranchen in Deutschland, im Vereinigten Königreich oder in Italien laut »EU KLEMS« von 2000 bis 2017 trotz kurzfristiger Schwankungen insgesamt kaum Wachstum auf. Das weist zum einen auf eine insgesamt geringe Innovationstätigkeit

der Baubranche hin. Zum anderen lässt sich daraus schließen, dass Analysen zur Entwicklung der Arbeitsproduktivität im Baugewerbe auf ein Land bezogen Hinweise auf Änderungen im Leistungsvermögen geben können, sofern ausreichend lange Zeiträume betrachtet werden. Allerdings dürfen die Befunde nur zurückhaltend interpretiert werden (insbesondere im Branchen- oder Ländervergleich), da wie aufgeführt die Messungenauigkeiten und Unsicherheiten bei der Erstellung der Daten sehr groß sind.

Länderspezifische Unterschiede existieren dagegen beim Produktivitätsniveau, die nicht einfach erklärt werden können. In vielen Studien werden die Ursachen für die unterschiedlichen Niveaus nicht oder nur sehr vage und oberflächlich erörtert und nur selten wird eine konsistente Ursachenanalyse durchgeführt (Bertschek et al. 2019; Ebert 2020). Zu den Ausnahmen zählen z. B. Analysen des BBSR (Rein/Schmidt 2018) und die ältere, aber immer noch aktuelle Studie von Butzin und Rehfeld (2009), mit denen darauf hingewiesen wird, dass strukturelle Faktoren in der Branche eine Auswirkung auf die Produktivität im Baugewerbe haben könnten. Insbesondere sind den Autoren zufolge enge Kooperationen der Betriebe bei der Auftragsdurchführung für die Produktivität vorteilhaft. Größenvorteile von wenigen marktbeherrschenden Bauunternehmen kombiniert mit einer Vielzahl von Kleinstbetrieben und vielen Selbstständigen, die Subunternehmerleistungen anbieten, können nach Einschätzung des BBSR (Rein/Schmidt 2018) zu Steigerungen der Bruttowertschöpfung führen. Dies würde implizieren, dass kooperative Instrumente wie das BIM positive Effekte auf die Produktivität haben können.

Als Beispiel führt das BBSR das Vereinigte Königreich an, dem es – im Unterschied zu den Daten der »EU KLEMS« – eine relativ hohe Arbeitsproduktivität zuspricht und das bei der BIM-Implementierung relativ weit vorangeschritten ist.¹³ Inwieweit diese These verallgemeinerbar ist, lässt sich allerdings hier nicht abschließend beantworten.

Des Weiteren sind die Niederlande und das Vereinigte Königreich nach einer Studie der USP Marketing Consultancy (BauInfoConsult 2019b) Vorreiter bei der Verwendung von Fertigteilen und Modulen. Demnach weist die Niederlande die stärkste Marktdurchdringung beim Einsatz von vorgefertigten Bauelementen auf. Auch das Vereinigte Königreich ist führend im Verbauen von Bauteilen mit hohem Vorfertigungsgrad, wie z. B. bei komplett vorgefertigten modularen Gebäuden oder beim Einsatz volumetrischer Elemente, die bereits schon Installationskomponenten, z. B. Strom- oder Wasserleitungen, integriert haben. Deutschland positioniert sich den Studienergebnissen zufolge beim Thema Fertigteilbau weniger fortschrittlich. In den Niederlanden wirken sich auch die Rahmenbedingungen für den Wohnungsbau günstig auf die Produktivität aus (Haufe Online 2018). Wesentliche Faktoren sind die im Vergleich zu Deutschland niedrigeren behördlichen Auflagen, Planungs- und Ausführungskosten. Es wird auch auf Vereinfachungen im Ausstattungsstandard des sozialen Wohnungsbaus, der in den Niederlanden eine große Bedeutung hat, hingewiesen.

2.3 Das Innovationssystem Bauwirtschaft

Die Art und Weise, wie Gebäude hergestellt werden, hat sich in den letzten Jahrzehnten kaum verändert, was eine naheliegende Erklärung dafür ist, warum die Arbeitsproduktivität der Baubranche im Vergleich zu anderen innovationsfreudigeren Branchen, wie z. B. Maschinenbau und Informations- und Kommunikationstechnologien, auf relativ niedrigem Niveau verharrt. Die entscheidende Frage lautet dann, welche spezifischen strukturellen Merkmale und systemischen Rahmenbedingungen die Innovationstätigkeit der Bauwirtschaft hemmen.

Um sich dieser Frage anzunähern, werden in diesem Kapitel zunächst die strukturellen und systemischen Merkmale des Wertschöpfungssystems Bauwirtschaft dargelegt (Kap. 2.3.1). Daran anschließend werden aus Sicht der Innovationsforschung Faktoren benannt, die sich hemmend auf Innovationsaktivitäten im Bereich Bau auswirken (Kap. 2.3.2).¹⁴ Schließlich wird das Innovationssystem Zement/Zementindustrie näher betrachtet (Kap. 2.3.3), da hierbei zum einen weitere wesentliche Merkmale der Branche sichtbar werden und zum anderen eine starke Abhängigkeit des bauausführenden Gewerbes von dem Innovationssystem Baustoffentwicklung und -forschung zum Ausdruck kommt.

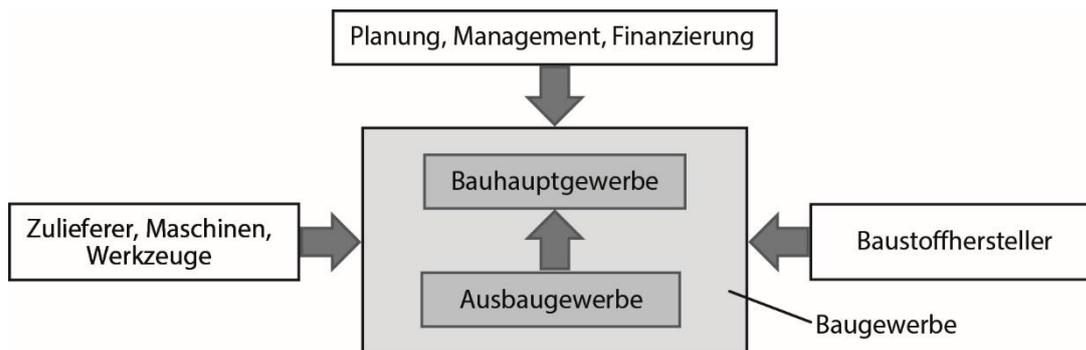
¹³ Grund für die Abweichung dürfte sein, dass das BBSR nur die Arbeitnehmer/innen und Angestellten berücksichtigt, während bei den vorliegenden Berechnungen auf Basis der Daten der »EU KLEMS« alle Beschäftigten zugrunde gelegt wurden. Im Vereinigten Königreich sind Selbstständige im Baugewerbe sehr stark vertreten. Sie stellen mehr als die Hälfte aller Erwerbstätigen dar.

¹⁴ Unter Innovation ist die nichttriviale Abänderung oder Verbesserung eines Prozesses, Produkts oder Systems zu verstehen, die für die umsetzende Organisation eine Neuheit darstellt (Slaughter 1998).

2.3.1 Spezifische systemische und strukturelle Rahmenbedingungen

Die *Bauwirtschaft* stellt ein komplexes Wertschöpfungssystem dar, das alle an Bauprozessen beteiligten Akteure umfasst. In erster Hinsicht sind dies neben den bauausführenden Industrie- und Handwerksbetrieben des Bauhaupt- und Ausbaugewerbes auch die Planer/innen, die Zulieferer von Maschinen, Werkzeugen und Baumaterialien sowie die Baustoffhersteller. Den Baustoffherstellern kommt in Bezug auf das Innovationspotenzial der Bauwirtschaft eine besondere Bedeutung zu, da die bauausführenden Sparten in starkem Maße von den bereitgestellten Baumaterialien und den damit verbundenen Bautechnologien abhängig sind. Die sich damit ergebenden Systemgrenzen der beteiligten Akteure sind in Abbildung 2.9 schematisch dargestellt.

Abb. 2.9 Schematische Darstellung des Wertschöpfungssystems Bauwirtschaft



Eigene Darstellung nach Butzin/Rehfeld 2009

Im Gegensatz zu anderen Industriebranchen, wie z. B. der Stahl- oder Automobilindustrie, produziert die Bauwirtschaft kein vergleichbares Portfolio an Produkten. Praktisch jedes errichtete Bauwerk stellt im Prinzip ein *Unikat* dar, das seine spezifische Planung und Ausführung erfährt. Konzeptionell ist die Bauwirtschaft prozess- und dienstleistungsorientiert ausgerichtet: Die Dienstleistung besteht in der Herstellung des Endprodukts *Bauwerk*, wobei das Baugewerbe als eine Bereitstellungsindustrie bezeichnet werden kann (Pekrul 2006). Die Bauwirtschaft kombiniert dabei wie keine andere Branche produzierende und dienstleistende Funktionen. Eine charakteristische Eigenschaft ist somit, dass das *bauausführende* Gewerbe durch sein fertiges *Produkt* selbst kaum Nachfrage erzeugen kann, sondern diese vielmehr von äußeren, nicht beeinflussbaren Faktoren abhängt (z. B. dem Wohnraumbedarf). Allerdings umfasst das Marktsegment des schlüsselfertigen Wohnungsneubaus den Erwerb neu erstellter, schlüsselfertiger Ein- und Zweifamilienhäuser sowie Wohnungen *direkt* von Bauträgern, die im Regelfall gewerblich tätige Unternehmen sind, die Grundstücke kaufen, bauausführend bebauen und als Gesamtobjekte verkaufen.

Im Unterschied zu anderen Industriebereichen produziert die Bauwirtschaft nicht an festen Standorten, sondern in »wandernden Fabriken« (Bosch/Zühlke-Robinet 2000). Die Baustellenfertigung ist mit Ausnahme der Vorfertigung von Komponenten stets ortsgebunden und damit von den spezifischen örtlichen Verhältnissen abhängig. Dadurch werden die Möglichkeiten einer standardisierten Fertigung bzw. Rationalisierung stark reduziert. Zudem kann im Bauhauptgewerbe kaum auf Lager produziert werden (Ausnahme: Fertigbauteilherstellung), sodass bei Anziehen der Konjunktur die Produktion nicht über den Abbau des Lagerbestands, sondern über den Einsatz zusätzlicher Arbeitskräfte gesteigert werden muss, was im Falle eines Fachkräftemangels zu Kapazitätsengpässen führen kann. Bei der konventionellen Bauweise lassen sich Preissenkungen bzw. Kostenvorteile kaum über den Produktionsprozess erzielen. Viel eher geschieht dies über den Produktionsfaktor Arbeit (Coppola 2012), wo mit billigeren Arbeitskräften Arbeitskosten eingespart werden. Bei der Implementierung innovativer Technologien, wie z. B. der Automatisierung der Bauabläufe, besteht eventuell das Potenzial, die Produktionsabläufe kostengünstiger zu gestalten.

Ein wesentliches Merkmal des Bauwesens ist zudem, dass die Herstellung eines Bauwerks in hohem Maße durch gesetzliche Vorschriften und Regelwerke bestimmt ist. Bauplanungsrecht und Vorschriften regulieren hinsichtlich der äußeren Erscheinung eines Bauobjekts jedes einzelne zu bauende Gebäude. Die Unterschiede

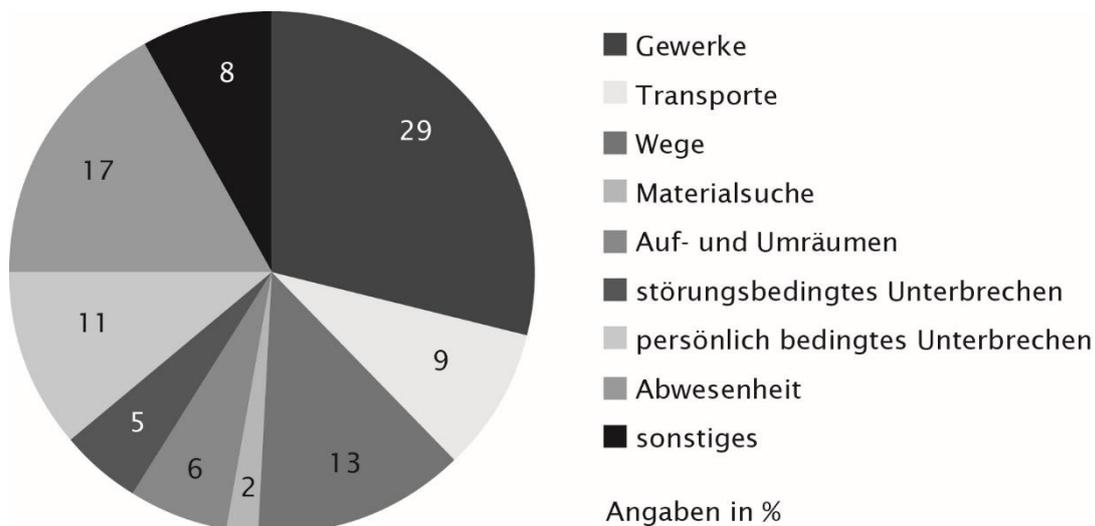
zur Industrieproduktion sind markant: Es werden nicht bestimmte Typen von Produkten zugelassen, sondern jeder Bau muss separat abgenommen werden (Coppola 2012).

Der Bausektor ist im besonderen Maße von den lokalen und regionalen Entwicklungen, wie z. B. der Raumordnungspolitik, abhängig, die sich besonders stark auf die Baunachfrage auswirken. In vielen Fällen vergeben Gebietskörperschaften ihre Bauaufträge an das örtliche bzw. regionale Gewerbe, auch um den lokalen Wirtschaftsraum zu stärken. Zudem erfolgt die Ausschreibung in der Weise kleinteilig, dass auch größere Aufträge von KMU bearbeitet werden können (Bosch/Zühlke-Robinet 1999). Diese Vergabepraxis sowie der Umstand, dass örtliche Besonderheiten an der Baustelle und Unvorhersehbares durch eine Kooperation lokaler Akteure mit viel Spezialkompetenzen gemeistert werden können, haben dazu geführt, dass KMU dominieren und ein mit anderen Sektoren vergleichbarer Konzentrationsprozess nicht stattfindet (Bosch/Zühlke-Robinet 1999). In diesem Kontext muss mitberücksichtigt werden, dass die bestehende Bautechnologie dies fördert: Die Arbeitsweise auf der Baustelle findet vorwiegend arbeitsteilig und sequenziell statt. Bauunternehmen, Handwerksbetriebe und Institutionen arbeiten in spezifischen Projekten zeitlich begrenzt in unterschiedlichen, mehr oder weniger losen Konstellationen zusammen. Die einzelnen Betriebe haben jeweils eine spezifische Funktion (Planung, Bauausführung Hochbau, Tiefbau, Ausbau, Installation etc.) im Herstellungsprozess (Pekrul 2006).¹⁵ Dies führt zu Segmentierungen in der Wertschöpfungskette, sektoral und regional nach Sparten und Märkten sowie temporal bezogen auf das Management der Planung und Bauausführung. Mangelnde Kommunikation zwischen den Akteuren in der bestehenden Bauorganisation wird als erhebliches Innovationshemmnis in Deutschland angesehen (RWK Kompetenzzentrum 2019; dazu auch Kap. 3.3.2).

Ineffiziente Baukoordination und -kommunikation sind häufig auch mit dafür verantwortlich, dass Bauabläufe sich z. T. verzögern und die Fristen nicht eingehalten werden können. Ein solches Umfeld begünstigt das Auftreten von Baumängeln, die ein ernst zu nehmendes systemisches Problem in der Bauwirtschaft sind. Nach einer Analyse von BauInfoConsult (2019a) liegt der Fehlerkostenanteil am gesamten Branchenumsatz 2018 bei rund 14 %. Dies entspräche Kosten von 17,8 Mrd. Euro – bezogen auf den für 2018 statistisch erfassten Gesamtumsatz im Baugewerbe. In Bezug auf die Bauzeit gibt es kontroverse Standpunkte (Jeschke 2013). Auf der einen Seite wird auf den großen Zeitdruck z. B. durch schlüsselfertige Projekte und Unterschätzung des notwendigen Zeitbedarfs hingewiesen. Auf der anderen Seite stehen Beobachtungen im Raum, dass Zeit in der Bauabwicklung verschwendet und nicht für die eigentliche Produktion verwendet wird. Empirische Studien zeigen in der Tat für den Hoch- und für den Tiefbau, dass in Bauprojekten mit dem Faktor Zeit häufig verschwenderisch umgegangen wird. So wurden in einer älteren und vielfach zitierten Studie von 1997 anhand mehrerer Bauprojekte die zeitlichen Abläufe einzelner Tätigkeiten auf Baustellen genauer untersucht (Heyl 2016). In den betrachteten Bauprojekten hatte die wertschöpfende Gewerkearbeit lediglich einen Anteil von 30 % an der Gesamtbauzeit (Abb. 2.10). Liege- und Wartezeiten hatten einen signifikanten Anteil, sodass erhebliche Optimierungs- und Einsparpotenziale angenommen werden können.

¹⁵ Die Innovationsforschung zeigt, dass Akteure mit spezifischen Funktionen in einem komplexen Prozess zudem selten ihr Tätigkeitsspektrum auch entlang der Wertschöpfungskette erweitern.

Abb. 2.10 Prozentuale Verteilung der Tätigkeiten an der Gesamtbauzeit



Eigene Darstellung nach Guntermann 1997; Jeschke 2013

Insgesamt haben die spezifischen strukturellen und systemischen Merkmale des Wertschöpfungssystems Bauwirtschaft einen beachtlichen Einfluss auf die Produktivitätsentwicklung und das Innovationspotenzial der Branche. Dies gilt nicht nur für die deutsche Branche, sondern ist international zu beobachtendes Problem.

2.3.2 Innovationshemmende und -förderliche Faktoren

In der Innovationsforschung werden mit dem Begriff Lowtech jene Industriezweige charakterisiert, die keine oder nur geringe FuE-Ausgaben haben (Hirsch-Kreinsen 2008). Grundlage dieser Kategorisierung ist der Indikator der FuE-Intensität, der das Verhältnis der FuE-Ausgaben zum Umsatz eines Unternehmens oder zum Produktionswert eines Sektors misst. Mithilfe dieses Indikators werden Sektoren mit einer FuE-Intensität von mehr als 5% als Hightech oder Hochtechnologie und solche mit einer FuE-Intensität zwischen 3 und 5% als Mediumhightech oder komplexe Technologien charakterisiert. Sektoren mit einer FuE-Intensität zwischen 0,9 und 3% werden als Mediumlowtech und solche mit einer FuE-Intensität unter 0,9% als Lowtech klassifiziert.

Im »EU Industrial R&D Scoreboard« der Europäischen Kommission, das eine Rangfolge über insgesamt 2.500 globale Unternehmen in den Industry-Classification-Benchmark(ICB)-Wirtschaftsbereichen aufführt, wird dem Wirtschaftssektor¹⁶ Bauwesen und Materialien, in dem das Baugewerbe und die Baustoffhersteller zusammengefasst sind, eine niedrige sektorale FuE-Intensität¹⁷ von 1,7% (Tab. 2.2) zugeordnet (Hernández et al. 2020). Der Sektor Bauen und Materialien liegt damit auf einem der hintersten Plätze.

16 Zur Industry-Classification-Benchmark-Struktur und Definition <https://www.ftserussell.com/data/industry-classification-benchmark-icb> (12.3.2021).

17 FuE-Ausgaben eines Unternehmens geteilt durch seinen Umsatz.

Tab. 2.2 Sektorale Rangfolge der FuE-Aufwendungen sowie die FuE-Intensität der aufgeführten Sektoren über insgesamt 2.500 internationale Unternehmen 2018/2019

Rang	Sektor	FuE in Mrd. Euro	Umsatz in Mrd. Euro	FuE-Intensität in %
1	Arzneimittel und Biotechnologie	153,8	967,8	15,4
2	Hardware und Ausrüstung	127,8	1522,3	8,4
3	Automobilhersteller und Zulieferer	127,8	2708,3	4,7
4	Software- und Computerdienstleister	117,7	1085,8	10,8
5	Elektronische und elektrische Ausrüstungselement	64,2	1282,3	5,0
6	Produktionstechnik	29,9	924,0	3,2
7	Chemie	22,5	1010,4	2,2
8	Allgemeine Industrieunternehmen	20,4	700,7	2,9
9	Luftfahrt und Verteidigung	20,2	506,0	4,0
10	Pflegeausstattung und Dienstleistungen	16,6	444,1	3,7
11	Bauwesen und Materialien	15,7	907,6	1,7
12	Freizeitgüter	15,7	270,4	5,8
13	Banken	10,7	393,9	2,7
14	Erdöl- und Erdgasproduzenten	9,3	2812,5	0,3
15	Haushaltsgeräte und Wohnbau	8,5	337,1	2,5

Eigene Zusammenstellung nach Hernández et al. 2020

Die SV Wissenschaftsstatistik gGmbH des Stifterverbandes (2020) erhebt jedes Jahr die Zahlen zu FuE der Unternehmen und Institutionen für Gemeinschaftsforschung in Deutschland. Danach wurden 2018 nur 82,2 Mio. Euro im deutschen Baugewerbe für FuE ausgegeben, was bei einem Umsatz von ca. 306 Mrd. Euro einer FuE-Intensität von 0,02 % entspricht. Die Branche belegt damit auch hier einen der hinteren Plätze.

Im Vergleich zu anderen Wirtschaftszweigen ist der Bausektor somit durch ein geringes Innovationsniveau gekennzeichnet. Hier ist jedoch zu differenzieren zwischen den Produzenten von Baustoffen und -maschinen und den bauausführenden Sparten. Innovationsaktivitäten finden im eigentlichen Bauhauptgewerbe so gut wie nicht statt, sondern vielmehr bei den Produzenten von Baustoffen, Ausrüstungen und Maschinen sowie bei den Bauingenieur/innen und Architekt/innen. Die Fragmentierung und die losen Verbindungen zwischen den Akteuren im Bauablauf behindern die Einbindung des Bauhauptgewerbes in diese Innovationsaktivitäten. Diese Situation wurde von Taylor (2005) in der Innovationsforschung mit dem Begriff Innovation Gap bezeichnet.

Die Gründe für die geringe FuE-Intensität der Baubranche sind vielfältig. So sind etwa die in Kapitel 2.3.1 diskutierten strukturellen und systemischen Rahmenbedingungen für das Innovationssystem Baugewerbe als hemmend einzustufen. Weitere Faktoren, die z. T. damit in einem engen Zusammenhang stehen, kommen hinzu:

- › die hierarchische Struktur vieler Familienunternehmen mit teilweise patriarchalischem Führungsstil, der als eher wenig innovationsförderlich gilt (Meier 2002; Röhl 2008);
- › die komplizierte und zugleich intransparente Vertrags- und Vergabegestaltung (Barbosa et al. 2017);
- › ein aggressiver Wettbewerb der Unternehmen in der Ausschreibungsphase;

- › die unzureichende Kommunikation und Kooperation mit Zulieferern und Auftragnehmern (Lieferkettenmanagement);
- › ein unzureichender Wissenstransfer von Projekt zu Projekt;
- › die Schwierigkeiten bei der Rekrutierung von qualifizierten Arbeitskräften;
- › örtliche und klimatische Herausforderungen der On-Site-Fertigung im Gegensatz zur Fertig- und Modulbauweise.

Die Unternehmen haben nur begrenzt Einfluss auf diese Faktoren. So fördern das komplizierte Vertragsrecht und das kleinteilige Vergaberecht die innovationshemmende Fragmentierung der Branche (Barbosa et al. 2017). Auch behindert der aggressive Wettbewerb mit seiner Preisdominanz den Spielraum für Innovationen in den Unternehmen. Innovative Problemlösungen finden meist in einem kunden- und praxisorientierten Kontext statt und basieren stark auf praktischem Erfahrungswissen. Der Wissenstransfer und die Lernprozesse von Projekt zu Projekt sind oft nicht optimal organisiert (Thomä/Zimmermann 2016). In der Vergangenheit gab es in Deutschland zudem wenige Institutionen und Netzwerke, welche die Integration der an den Bauprozessen beteiligten Akteure (Industrie- und Handwerksbetriebe des Bauhaupt- und Ausbaugewerbes, Planer/innen, Zulieferer von Maschinen, Werkzeugen und Baumaterialien und Baustoffhersteller, um nur die wichtigsten zu nennen) förderten und dazu beitrugen, Innovationen voranzutreiben.¹⁸ Im Kontext von BIM existiert mittlerweile eine Reihe von entsprechenden Netzwerken und Foren (Kap. 3.2).¹⁹ Im europäischen Ausland gibt es schon länger diesbezügliche Ansätze, beispielsweise in Dänemark das Byggeriets Evaluerings Center, das Anreize zur optimalen Projektdurchführung durch Transparenz und Vergleichbarkeit auf Basis von Evaluierung und gesetzlichen Vorschriften schaffen soll (Skand.Baunews 2019). Des Weiteren ist hier das britische Key-Performance-Indicators-Benchmarkingsystem »Constructing Excellence in the Built Environment« zu nennen, das Lernprozesse in Bezug auf bessere Kommunikation und Koordination fördern soll.

2.3.3 Spezifische Merkmale des Innovationssystems Zement

Gebäude und Baustrukturen haben Nutzungsdauern von 50 bis 100 Jahren und mehr. Die heutigen Anforderungen an Bauwerke wie Design, Dauerhaftigkeit, Wärmedämmung, Recyclingfähigkeit der Baumaterialien sind im Grunde mit den seit über 100 Jahren weitgehend unveränderten traditionellen Baustoffen nicht erfüllbar, sie werden nur durch additive, nachgeschaltete Baustofftechnologien erreicht. Als Beispiel sind hier die Verbundwerkstoffe für die Wärmedämmung zu nennen. Die traditionellen Baustoffe werden selbst nicht infrage gestellt und nach wie vor verwendet. So bestehen moderne Gebäude im Kern meist aus Beton, ein weltweit in großer Menge hergestelltes Material, für dessen Produktion neben Sand, Kies und Wasser auch Zement als Bindemittel benötigt wird.

Die Minimierung von Risiken während der langen Nutzung der Bauwerke und das damit verbundene (und notwendige) Sicherheitsdenken führen zu einer konservativen Haltung hinsichtlich der Regeln und Normen für Baustoffe und Bauwerke. Die langfristige Zuverlässigkeit eines Baustoffs soll noch vor dessen Einsatz nachgewiesen werden können. Wichtige Kriterien für die Beurteilung von Zementssystemen wie Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Bauteils werden durch makroskopische Testverfahren bestimmt. Allgemein anwendbare Rezepturen für die Herstellung zementbasierter Baustoffe wie Beton müssen aufgrund von Unsicherheiten so zusammengesetzt werden, dass Sicherheitsreserven in Bezug auf Leistungswerte berücksichtigt sind. Darüber hinaus müssen umfangreiche und sehr zeitaufwendige Testverfahren durchgeführt werden. Für eine Zulassung selbst inkrementell innovativer Baustoffe sind 10 bis 15 Jahre derzeit der übliche Horizont. Aus diesem Sicherheitsdenken heraus ist nachvollziehbar, dass sich seit mehr als 150 Jahren relativ wenig am System Zement geändert hat. Dieser Konservatismus hat erhebliche Auswirkungen auf das Innovationspotenzial der gesamten Bauwirtschaft.

Was die Wissenskultur betrifft, so werden zementhaltige Baustoffe traditionell hauptsächlich empirisch durch Versuch und Irrtum optimiert, da die maßgeblichen Prozesse bei der Verfestigung des Materials noch nicht vollständig verstanden sind (Stemmermann/Achternbosch 2013). Ziel der Forschung ist es somit, mit wissenschaftsbasierten Ansätzen die Prozesse der Zementchemie besser erfassen, insbesondere in Bezug auf die

¹⁸ <https://www.iat.eu/forschung-und-beratung/projekte/2009/interbau-innovationsstrategien-am-bau-im-internationalen-vergleich.html> (12.3.2021)

¹⁹ <https://www.navispace.de/bim-innovationsforum/> (12.3.2021)

wichtige Eigenschaft der Dauerhaftigkeit. Erst in den letzten 20 Jahren wurden meist sehr aufwendige High-End-Untersuchungsmethoden entwickelt, die Grundlagenforschung in vielen Bereichen überhaupt erst möglich machen. Trotzdem existiert noch immer eine große Lücke zwischen Labor und Realität, die die Transformation vieler Ansätze zur Marktreife begrenzt. Die derzeitige Forschung kann als eine Phase der Wissensgenerierung gekennzeichnet werden.

Da in der einschlägigen Bindemittelentwicklung bislang nur Zementsysteme vorstellbar sind, in denen die Basiskomponente Klinker des klassischen Zements in irgendeiner Form berücksichtigt wird, wurde auch wenig Bedarf an Grundlagenforschung jenseits des Klinkerparadigmas gesehen. Es ist somit nachvollziehbar, dass die Aufwendungen für Forschung bei Großunternehmen relativ klein sind.

Daraus folgt, dass für die Grundlagenforschung zu alternativen Bindemittelkonzepten im Allgemeinen eine Reihe ungünstiger systemischer Rahmenbedingungen besteht. So ist der Zugang zur Finanzierung entsprechender Projekte außerhalb der universitären Grundlagenforschung und spezieller Industrieprojekte traditionell schwierig. Die langen Zeithorizonte bei der Entwicklung und die Anforderungen an neue Bindemittel in Bezug auf Zulassungen und Standards stellen zudem ein hohes Hindernis und Risiko insbesondere für radikalere Forschungsansätze dar. Bei wettbewerblichen Ausschreibungen waren in der Vergangenheit die Erfolgchancen einer Finanzierung von Grundlagenforschung im Bereich Zement relativ gering. Hinzu kommt, dass in der allgemeinen Wahrnehmung die Zementtechnologie im Vergleich zu innovativen Bereichen wie Biowissenschaften oder Informations- und Kommunikationstechnologien als Lowtech und langweilig gilt. Diese Rahmenbedingungen in einem restriktiven regulativen Umfeld behindern kurzfristige Kapitalanlagestrategien externer Investoren, die für andere neue und aufkommende Technologien charakteristisch sind. Festzustellen ist allerdings, dass aufgrund der Aspekte Ressourceneffizienz und Klimaschutz die Grundstoffindustrie heute immer mehr in den Blickpunkt des öffentlichen und industriellen Interesses gerät (agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019).

2.4 Fazit

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Wohnraum, von bestehenden Kapazitätsengpässen in der deutschen Baubranche sowie des durch den demografischen Wandel verursachten Fachkräftemangels stellt sich die Frage, inwiefern die anstehenden Herausforderungen durch (digital)technische und organisatorische Innovationen gemeistert werden können. Dabei sind folgende strukturelle und systemische Rahmenbedingungen und Merkmale des Innovationssystems Bauwirtschaft zu berücksichtigen:

- › Das Baugewerbe errichtet Bauwerke, die im Prinzip jeweils ein *Unikat* darstellen, da jedes seine spezifische Planung und Ausführung erfährt. Die Möglichkeiten einer standardisierten Fertigung bzw. einer Rationalisierung sind stark eingeschränkt.
- › Ein wesentliches Merkmal des Baugewerbes ist die starke Fragmentierung in kleinstteilige Betriebsstrukturen. Diese wirken sich ungünstig auf die Diffusion von neuem Wissen und technologischen Innovationen in die Betriebe aus. Auch die kleinteilige Vergabep Praxis der Bauleistungen nach Losen bei öffentlichen Bauaufträgen begünstigt die Fragmentierung der Branche. Intelligente Ausbildungs- und Organisationsstrukturen zu schaffen, welche die Kleinstbetriebe in der Gesamtheit einbinden, dürfte für den Erfolg der Transformation zu Bauen 4.0 entscheidend sein. Dies wird als ein langwieriger Prozess eingeschätzt, der einschneidend in die Arbeitsstruktur und -kultur der Betriebe eingreift.
- › Die an Bauprojekten beteiligten Akteure (Planer/innen, Bauunternehmen, Handwerksbetriebe etc.) arbeiten in spezifischen Projekten zeitlich begrenzt in unterschiedlichen, mehr oder weniger losen Konstellationen zusammen. Die mangelnde Transparenz in den Bauabläufen und die Kommunikationsdefizite zwischen den Beteiligten werden von vielen Expert/innen als wesentliche Produktivitätshemmnisse angesehen. In diesem Zusammenhang wird die in Deutschland übliche Trennung von Planung und Bauausführung als ein kritischer Punkt gesehen.

Studien zur Produktivitätsentwicklung der deutschen Bauwirtschaft beruhen meist auf Untersuchungen der Arbeitsproduktivität über Zeiträume von 10 Jahren oder weniger, deren Aussagewert sehr eingeschränkt ist, da nur kurzfristige konjunkturelle Einflüsse betrachtet werden. In der arbeitsintensiven Baubranche werden Konjunkturschwankungen maßgeblich über die Zahl der Beschäftigten ausgeglichen. Über längere Zeiträume (20 Jahre und mehr) gesehen, pendelt sich die Arbeitsproduktivität somit meist etwa um den gleichen Wert ein. Dies lässt sich u. a. dadurch erklären, dass sich die eingesetzten Bautechnologien und Bauabläufe (z. B. Mauerwerk- und

Betontechnologie) im in Deutschland dominierenden Wohnungsbau nur unwesentlich geändert haben. Auffallend ist das niedrige Produktivitätsniveau im Vergleich zu anderen Branchen (z.B. Maschinenbau). Auch in anderen europäischen Ländern, wie etwa den Niederlanden oder dem Vereinigten Königreich, zeigt sich hinsichtlich der Produktivitätsentwicklung ein ähnliches Bild. Allerdings gibt es auch Unterschiede im Produktivitätsniveau, deren Ursachen schwierig zu erklären sind.

Das deutsche Baugewerbe gilt traditionell als ein konservativer und wenig innovationsfreudiger Lowtechsektor, was die Gewinnung von hochqualifiziertem Nachwuchs erschwert. Symptomatisch sind die geringen FuE-Aufwendungen der Branche (2018: 82,2 Mio. Euro; BMBF 2020a); auch von der öffentlichen Hand ausgeschriebene Förderprogramme stehen der Baubranche bisher (im Unterschied etwa zur Biotechnologie) nur im geringen Maße zur Verfügung. Der Lowtechstatus trifft auch auf die Baustoffindustrie zu, die im Prinzip seit Jahrzehnten am bestehenden System der Baustoffe (z. B. Portlandzementklinker für Zement) festhält und meist nur inkrementelle Innovationen hervorbringt.

Zusammenfassend dürfte deutlich werden, dass hinsichtlich der Umsetzungsfähigkeit von Innovationen in der Bauwirtschaft die strukturellen und systemischen Rahmenbedingungen maßgeblich mit zu berücksichtigen sind. Zudem ist ein integrativer Ansatz erforderlich, der neben der Implementierung von Digitalisierungs- und Automatisierungstechnologien auch die Entwicklung von zukunftsfähigen Bau- und Baustofftechnologien mit einschließt, die einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft genügen (Kap. 7.3).

3 Digitales Planen und Bauen mittels BIM

Durch die hohe Nachfrage bestehen im Wohnungsbau seit längerem Kapazitätsengpässe, die nicht zuletzt auf eine unterdurchschnittliche Entwicklung der Arbeitsproduktivität zurückzuführen sind (Die Deutsche Bauindustrie 2018) (Kap. 2.2). Gründe für die vergleichsweise niedrige Produktivität in der Baubranche sind u. a.

- › der Unikatcharakter von Bauwerken, bei denen es sich weitgehend um Einzelfertigungen handelt (kaum Standardisierung),
- › die heterogenen und hochindividuellen Gegebenheiten, unter denen Bauwerke erstellt werden (begrenzte Möglichkeiten der Automatisierung),
- › die starke Fragmentierung des Baugewerbes und die Vielzahl der an Bauprojekten beteiligten Akteure.

Planung und Ausführung von Bauwerken sind deshalb hochkomplex, von vielen fehleranfälligen Schnittstellen in den Informationsflüssen und komplizierten logistischen Prozessen geprägt. Zahlreiche Baumängel und Verzögerungen in den Bauabläufen sind typische Folgen dieser Herausforderungen, was wiederum die Kosten von Bauprojekten in die Höhe treibt und zu den Kapazitätsengpässen beiträgt (neben anderen wichtigen Faktoren wie beispielsweise dem Fachkräftemangel).

Insbesondere in die konsequente Digitalisierung der Abläufe in der Wertschöpfungskette Bau wird die Hoffnung gesetzt, Produktivität und Effizienz in der Branche massiv steigern und damit den Kapazitätsproblemen zumindest z. T. entgegenwirken zu können (Die Deutsche Bauindustrie 2018, S. 20). Im Fokus steht dabei besonders BIM, mit dem eine durchgängige digitale Vernetzung der Planungs- und Bauprozesse angestrebt wird, um die Abläufe und Arbeitsweise in der Branche grundsätzlich zu revolutionieren. Allerdings hinkt die Bauwirtschaft im Digitalisierungsgrad bislang anderen Branchen hinterher und gilt zudem hinsichtlich technologischer Innovationen als eher »konservativ und risikoscheu« (Coss 2017). Die zuvor angeführten Gründe für das schwache Produktivitätsniveau der Branche – kleinteilige Unternehmensstrukturen, geringer, systembedingter Standardisierungs- und Automatisierungsgrad – behindern zudem auch die Einführung digitaler Methoden, was erwarten lässt, dass die digitale Transformation der Branche sowohl für die Unternehmen als auch die Politik eine größere Herausforderung darstellt.

In diesem Kapitel werden auf Basis des Gutachtens von Díaz et al. (2019) die Grundlagen, Potenziale und Implikationen eines BIM-Einsatzes diskutiert, wobei besonders die Perspektiven für den Wohnungsbau in den Blick genommen werden.

3.1 BIM: Grundlagen und Potenziale

Bei BIM handelt es sich um eine softwarebasierte Arbeits- und Planungsmethode, die auf Grundlage digitaler Gebäudemodelle durchgeführt wird. Ein digitales Gebäudemodell bündelt idealerweise alle wesentlichen Informationen, die für die Planung, den Bau und die nachträgliche Nutzung eines Bauwerks erforderlich sind. Eine einheitliche Definition des BIM-Begriffs gibt es bislang nicht (Pacher 2018; Stange 2020, S. 15). So wird BIM teilweise auch als Abkürzung für Building Information Model oder für Building Information Management verwendet. Ersteres legt den Fokus auf die Gebäudedaten, Letzteres (wie auch das hier zugrunde gelegte BIM) auf die Prozesse, die für das Management dieser Daten erforderlich sind.

3.1.1 Was ist BIM? Grundidee und Grundbegriffe

BIM basiert auf der Idee einer »durchgängigen, zentralen Projektabwicklung« auf Grundlage digitaler, objektorientierter Gebäudemodelle (Díaz et al. 2019, S. 54) – möglichst über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks hinweg. Laut Stange (2020, S. 158 ff.) lässt sich der Ursprung von BIM bis in die 1960er Jahre zurückverfolgen. Realisierbar wurde die neue Arbeitsmethode jedoch erst mit dem Aufkommen BIM-fähiger Softwareprodukte ab den 2000er Jahren. Bis dahin hatte sich die herkömmliche Herangehensweise an das Planen und Bauen von Bauwerken kaum grundlegend verändert (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 77). Dies gilt

selbst für die Verbreitung von CAD ab den 1980er Jahren. Obwohl es sich bei CAD um ein digitales Planungswerkzeug handelt, erschaffen Planer/innen dabei weiterhin zweidimensionale, elektronische Zeichnungen mit klassischen Elementen wie Schraffuren, Punkten und Linien. CAD ist folglich nicht viel mehr als eine digitale Imitation des traditionellen Arbeitsprozesses mit Stift und Papier. Ein großer Nachteil dieser Arbeitsweise ist u. a. der immens hohe Aufwand, um Änderungen in verschiedenen, inhaltlich verknüpften Plänen durchzuführen. Anpassungen müssen in allen Grundrissen, Ansichten und Schnitten manuell vorgenommen werden, woraus ein beträchtlicher Arbeitsaufwand und ein erhöhtes Fehlerrisiko resultieren. Ein weiterer Nachteil der herkömmlichen papierbasierten Arbeitsweise bzw. ihrer digitalen Entsprechung ist darin zu sehen, dass die für die Bewertung eines konkreten Entwurfs (z. B. hinsichtlich der Kostenentwicklung) benötigten Informationen in der Regel erst zu einem relativ späten Zeitpunkt vorliegen – dann nämlich, wenn der Planungsprozess schon so weit fortgeschritten ist, dass Anpassungen am Design kaum noch oder nur mit großem Aufwand umsetzbar sind (Stange 2020, S. 164).

Ganz anders bei der BIM-Methode: Hier wird das Bauwerk erst komplett digital geplant, anschließend modellbasiert optimiert (z. B. mit Blick auf Bauabläufe, Lebenszykluskosten, Nachhaltigkeitsaspekte etc.) und erst dann, wenn Entwurfs- und Planungsprozesse komplett abgeschlossen sind, mit dem Bau begonnen. Welche modellbasierten Optimierungsmöglichkeiten jeweils bestehen, hängt davon ab, welche Informationsebenen, auch als *Dimensionen* bezeichnet, in ein digitales Bauwerksmodell integriert werden. Üblicherweise werden die folgenden sieben BIM-Dimensionen unterschieden, wobei die Zuordnung der höheren Dimensionen (6-D und 7-D) in der Literatur auch teilweise anders gehandhabt wird (z. B. Goger et al. 2018, S. 32; Stange 2020, S. 184 f.; zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 60 ff.):

- › 3-D-Modell: Hier handelt es sich um ein dreidimensionales Modell eines Bauwerks, das alle Objekte räumlich exakt verortet und somit die Ermittlung von räumlichen Beziehungen (Topologie) und ggf. Bauteilkollisionen ermöglicht. Zusätzlich enthalten 3-D-Modelle in der Regel noch weitere funktionale Bauteilattribute (z. B. Material, Festigkeit etc.).
- › Beim 4-D-Modell wird das 3-D-Modell um zeitbezogene Informationen ergänzt, z. B. die Dauer der Erstellung einer Außenwand. Dadurch können Bauprozesse in Echtzeit simuliert, visualisiert und der Baufortschritt über die gesamte Laufzeit des Projekts dargestellt werden. Dies ist u. a. auch hilfreich für die Planung der komplizierten logistischen Abläufe auf einer Baustelle (Will 2019, S. 57 ff.).
- › 5-D-Modell: Die fünfte Dimension stellt die monetären Informationen eines Bauvorhabens dar (z. B. die Kosten der Erstellung einer Außenwand). Alle Kosteninformationen sind hierbei als Attribute an intelligente Bauteile geheftet, sodass durch einen simulierten Bauablauf (siehe 4-D-Modell) auch der Kostenverlauf visualisiert werden kann. Auf diese Weise lassen sich detaillierte Kostenprognosen erstellen.
- › Das 6-D-Modell enthält zusätzlich Informationen zu Nachhaltigkeitsaspekten wie dem Energieverbrauch. Dies ermöglicht es beispielsweise, die CO₂-Emissionen oder die Energieeffizienz eines Gebäudes oder Bauteils lebenszyklusorientiert zu modellieren und zu optimieren.
- › 7-D-Modell: Neben den sechs genannten Dimensionen umfasst 7-D Informationen insbesondere zur Sicherung des Gebäudebetriebs und für ein anschließendes Instandhaltungsmanagement – z. B. Bedienungsanleitungen, Herstellerinformationen oder Daten zur Garantie sowie zur Gewährleistung und zu Wartungsintervallen. Somit schließt die Hinterlegung der Informationen mit der Inbetriebnahme nicht ab, sondern erweitert sich in die Nutzungsphase und umfasst prinzipiell die gesamte Lebensdauer des Bauwerks.

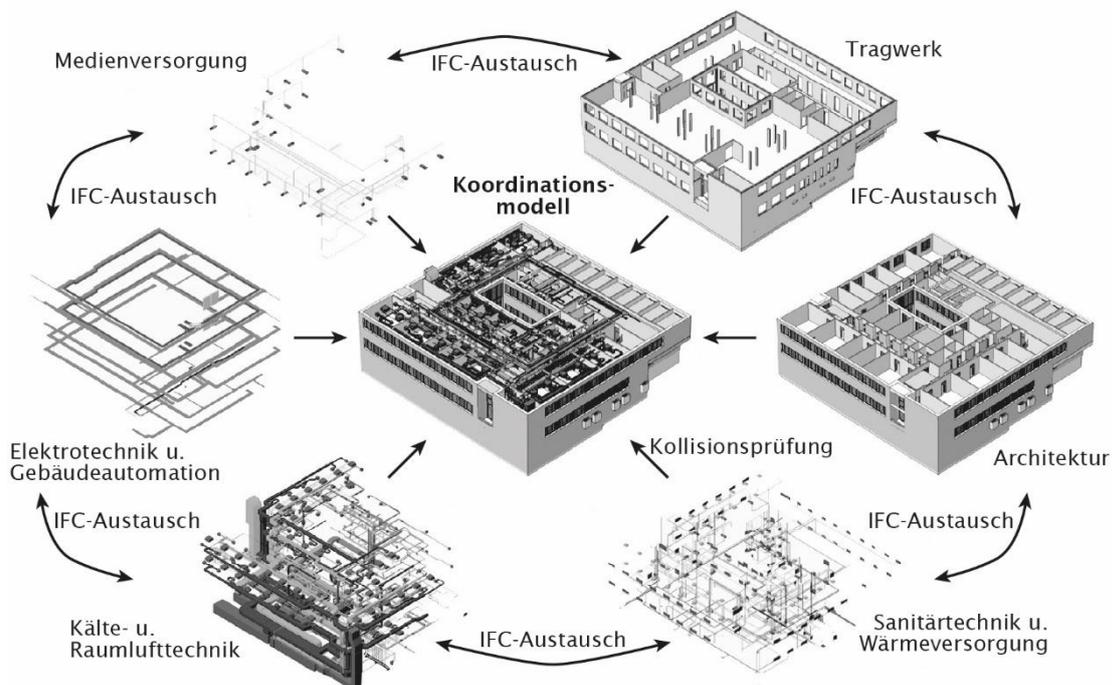
Zu diesen sieben Dimensionen lassen sich digitale Gebäudemodelle prinzipiell um beliebige weitere ergänzen.²⁰ Je mehr Dimensionen ein BIM-Modell umfasst, desto mehr Informationen enthält es. Das digitale Gebäudemodell ist somit als eine objektorientierte Datenbank zu verstehen, welche alle Bauteile (Objekte), deren jeweiligen Eigenschaften und Abhängigkeiten enthält (z. B. bei einer Stütze die Breite, Länge und Höhe sowie das Geschoss und die Bauphase).

Die Idealvorstellung ist, dass alle Bauteile und Informationen in einem Modell zentral verwaltet werden. In der Praxis werden jedoch von den verschiedenen Projektbeteiligten aus organisatorischen und technischen Gründen meist mehrere separate Modelle vorgehalten, die über Schnittstellen miteinander koordiniert werden (Abb. 3.1). Dabei kann zwischen Referenz-, Fach- und Koordinationsmodell differenziert werden (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 78):

²⁰ So unterscheidet etwa Stange (2020, S. 185) noch eine achte Dimension (8D-BIM), die »entwurfs- und konstruktionsrelevante Sicherheitsaspekte« integriert.

- › Das *Referenzmodell*, das in der Regel von den Architekt/innen erstellt wird, dient als initiale Grundlage für die weitere kollaborative Arbeit der Projektbeteiligten und insbesondere die Fachplanungen.
- › Die Fachplaner/innen entwickeln auf Basis des Referenzmodells ihre eigenen *Fachmodelle*, für die sie die Verantwortung tragen. Werden Bauteile geändert oder gelöscht, so sind diese Vorgänge mit den anderen Planer/innen abzustimmen und ggf. in das Referenzmodell einzupflegen (AHO 2019, S. 18).
- › Alle Fachmodelle der Fachplaner/innen werden regelmäßig in einem *Koordinationsmodell* zusammengeführt. Basis dafür bildet das Referenzmodell. Spezielle Prüfsoftware analysiert dann das Koordinationsmodell auf Kollisionen zwischen den verschiedenen Modellen. Planungsfehler, Unklarheiten, Leistungskollisionen oder Planungslücken können so erkannt, lokalisiert und teilweise automatisiert bereinigt werden. Auf diese Weise lassen sich bereits im Vorfeld Probleme und Bauablaufstörungen erkennen und beseitigen (Silbe/Díaz 2017, S. 17). Wenn das Koordinationsmodell kollisionsfrei und abgestimmt ist, wird es zum neuen Referenzmodell, das am Ende des Planungs- und Bauprozesses als »ganzheitliches Bauwerksinformationsmodell für die Objektdokumentation« zur Verfügung steht (Stange 2020, S. 271).

Abb. 3.1 Zusammenführung der verschiedenen Fachmodelle in einem Koordinationsmodell



Quelle: nach hks architekten 2018, S. 65

Einer der hauptsächlichen Unterschiede des BIM-Ansatzes zur herkömmlichen Vorgehensweise besteht darin, dass alle relevanten Projektdaten in Echtzeit aktualisiert werden (Stange 2020, S. 163). Planunterlagen werden nicht mehr auf Papier separat vorgehalten und erst bei Bedarf ausgetauscht wie bis anhin – mit der Gefahr von Informations- und Reibungsverlusten –, sondern alle Informationen werden in eine zentrale Datenbank eingepflegt. Änderungen an dieser Datenbank (bzw. den BIM-Modellen) werden durch vernetzte Prozesse in allen weiteren Anwendungen (Modellen, Plänen, Ansichten etc.) automatisiert übernommen, sodass dementsprechend alle Projektbeteiligten zu jedem Zeitpunkt über den aktuellen Projektstand informiert sind (Díaz et al. 2019, S. 77). Dieses Vorgehen hat tiefgreifende Auswirkungen auf die Arbeitsprozesse in Bauprojekten und die Planungs- und Baukultur (dazu im Detail Kap. 3.3). Vor allem bedingt der Aufbau eines gemeinsam genutzten Modells eine intensive Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen an einem Bauprojekt beteiligten Akteuren (Bauherr/innen, Architekt/innen, Fachplaner/innen und Ingenieur/innen etc.) bereits ab Projektbeginn, was eine entsprechende Projektorganisation und frühzeitige (vertragliche) Absprachen erforderlich macht.

Hinsichtlich der technischen Organisation der Zusammenarbeit ist zwischen der offenen und der geschlossenen Umsetzung zu unterscheiden: Bei einer offenen Umsetzung – auch als »open BIM« bezeichnet – arbeitet jeder Beteiligte mit eigener BIM-Software, während bei einer geschlossenen Variante (»closed BIM«) alle die gleiche Softwarelösung verwenden. Letzteres hat den Vorteil, dass sich der Datenaustausch und die Koordination der verschiedenen BIM-Fachmodelle unkompliziert bewerkstelligen lassen. Als Nachteil von »closed BIM« gilt jedoch die mangelnde Flexibilität, da alle Beteiligten durchgehend und prozessübergreifend das gleiche Softwareprodukt nutzen müssen, was gerade in größeren Bauprojekten, nicht zuletzt aufgrund der kleinteiligen Struktur der Baubranche, nicht praktikabel erscheint. So können etwa Unternehmen mit anderweitigen Softwarelizenzen von der Zusammenarbeit ausgeschlossen sein. »Closed BIM« kann sich somit eher als Hindernisfaktor für eine kollaborative Zusammenarbeit erweisen, weshalb in der Regel eine offene Implementierung des BIM-Prozesses empfohlen wird (AEC/BIM 2017; BAK et al. 2018; Goger et al. 2018, S. 33 f.). Erforderlich sind dafür geeignete, nichtproprietäre Schnittstellenstandards für einen reibungslosen Datenaustausch zwischen den verschiedenen Parteien. Mit den »Industry Foundation Classes« (IFC) sowie dem »BIM Collaboration Format« (BCF), beide entwickelt von der Standardisierungsorganisation buildingSMART²¹, liegen inzwischen herstellerneutrale Dateiformate vor, die den softwareübergreifenden Datentransfer sowie die teamübergreifende Kommunikation in offenen BIM-Prozessen ermöglichen (Stange 2020, S. 174 ff.). Die Entwicklung dieser Standards muss aber weiter vorangetrieben werden.

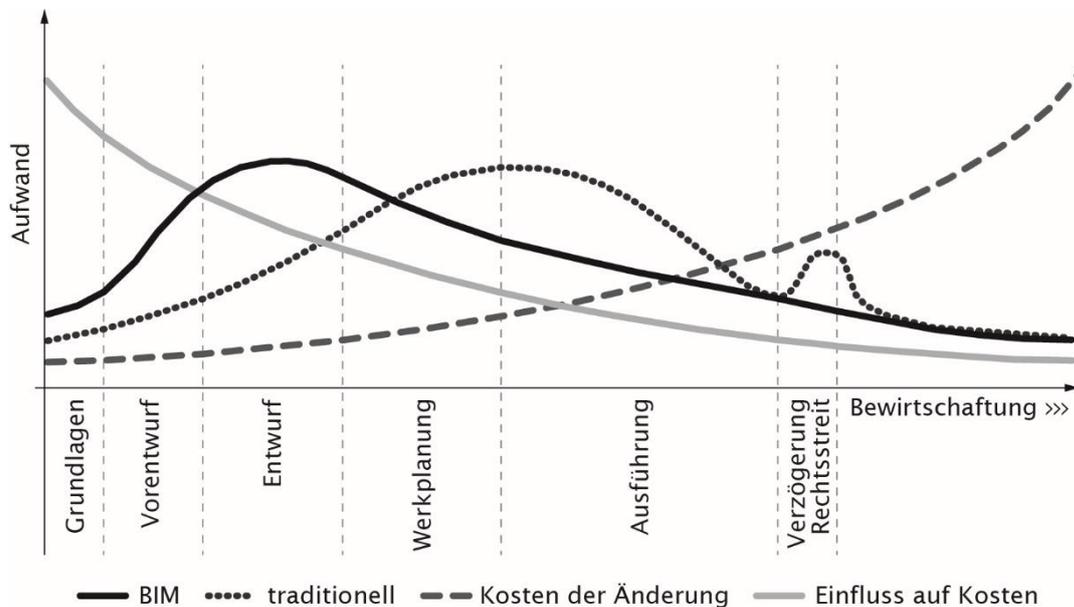
Eine weitere wichtige Unterscheidung in diesem Zusammenhang ist diejenige zwischen »little BIM« und »big BIM«. Bei »little BIM« kommt die BIM-Methode in einem Projekt nicht übergreifend und durchgängig zur Anwendung, der Einsatz beschränkt sich eher auf einzelne Disziplinen (Architekt/innen, Fachplaner/innen etc.) oder Unternehmen (Goger et al. 2018, S. 33). Es handelt sich also um eine Insellösung, bei der das digitale Gebäudemodell nicht als gemeinsamer Anknüpfungspunkt einer disziplinenübergreifenden Zusammenarbeit fungiert. Deshalb kann BIM in so einem Fall auch nur begrenzt als Katalysator für einen verbesserten Informationsaustausch und eine effizientere Projektorganisation dienen. Diese Chance besteht nur bei einer konsequenten Anwendung von BIM bei allen Beteiligten und in allen Projektphasen im Sinne von »big BIM«.

3.1.2 Potenziale

Goger et al. (2018, S. 33) kommen in einer Studie im Auftrag des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie zu dem Schluss, dass die Entwicklung in den nächsten Jahren tendenziell in Richtung »big open BIM« gehen muss, »um das gesamte Potenzial von einem dreidimensionalen Gebäudemodell für alle Stakeholder ausschöpfen zu können« (Goger et al. 2018, S. 33). Worin genau liegen nun aber die Potenziale einer BIM-Implementierung? Eine Antwort darauf gibt die Abbildung 3.2: Die sogenannte MacLeamy-Kurve zeigt die Kostenentwicklung im Verlauf eines Bauprojekts.

²¹ <https://www.buildingsmart.de> (12.3.2021)

Abb. 3.2 Aufwandsverlagerung und Einfluss auf Kostenentwicklung: BIM und traditionelle Planungsmethode im Vergleich



Quelle: nach Egger et al. 2013, S.33

Demnach lässt sich die weitere Kostenentwicklung in den frühen Projektphasen in besonderem Maße positiv beeinflussen (hellgraue Kurve), da die Kosten für Änderungen (gestrichelte Kurve) im Projektverlauf überproportional ansteigen (Díaz et al. 2019, S. 65; Zwiehler/Spreitzer 2019, S. 500). Bei BIM sollen nun die hauptsächlichen Planungsentscheidungen bereits in der Entwurfsphase gefällt werden (schwarze Kurve) – und nicht erst in der Werksplanung und Ausführung wie beim traditionellen Vorgehen (gepunktete Kurve). Auf diese Weise lassen sich Planungsfehler durch Kollisionsprüfungen frühzeitig erkennen und besonders kosten- und zeitintensive rückwirkende Planungsänderungen vermeiden. Konkret erhofft man sich von BIM so eine »Reduzierung von Mehrfacheingaben infolge rückwirkender Planungsänderungen, Reduzierung von Nacharbeiten infolge Planungsfehlern und Auslassungen, Reduzierung der Anzahl von Änderungsaufträgen (Nachträgen) während der Bauphase, Reduzierung von RFIs [Request for Information/Informationsanfragen] und Einhaltung von Sollterminen für den Planungs- und Bauprozess« (Stange 2020, S. 412). Zudem erleichtert BIM die Auswertung von Alternativplanungen enorm, da derartige Untersuchungen auf Grundlage des Bauwerkinformationsmodells automatisiert vorgenommen werden können (Díaz et al. 2019, S. 177). In der herkömmlichen Arbeitsweise ist die Variantensimulation ein äußerst aufwendiges Unterfangen, da die Analysen und Berechnungen zumeist händisch durchgeführt werden müssen.

Die erwarteten Vorteile der BIM-Methode beziehen sich primär auf die Planungs- und Ausführungsphase von Bauvorhaben und lassen sich wie folgt zusammenfassen (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 93, 101 ff., 114 ff. u. 145 ff.):

- › *Reduzierte Planungs- und Ausführungszeiten:* Bereits in der Planungsphase können Bauablaufsimulationen durchgeführt werden. Auf dieser Basis kann der Bauzeitenplan erstellt und mit den dazugehörigen Geometrien verknüpft werden. Dieser Bauzeitenplan unterstützt bei der gezielten Steuerung im Ausführungsprozess und hilft somit, Kapazitätsengpässe zu vermeiden und die Ausführungszeiten zu sichern. Außerdem entsteht durch die digitale Verknüpfung der Komponenten Zeit, Ressourcen und Kosten eine Datengrundlage, welche die integrierte Planung, Organisation, Steuerung, Abwicklung und Kontrolle des gesamten Material- und Warenflusses begünstigt (Supply-Chain-Management). Dadurch kann detaillierter geplant werden, welche Baustoffe bzw. Materialien zu welchem Zeitpunkt und in welcher Menge auf der Baustelle benötigt werden. Zudem können auch Arbeitsabläufe auf der Baustelle effizienter gestaltet werden: Beispielsweise werden im Wohnungsbau Räume von den unterschiedlichen Gewerken häufig mehrfach vermessen. Verwendet man ein BIM-Modell, können derartige redundante Tätigkeiten erheblich reduziert

werden. Zukünftig könnten die Planungszeiten durch die Verwendung von standardisierten und vorgefertigten Bauteilen und Objekten noch weiter optimiert werden.²² Durch den tendenziell höheren Grad der Wiederverwendung dieser Bauteile und die damit verbundenen wiederholten Planungsabläufe könnten erprobte und standardisierte Prozesse entstehen (Silbe/Díaz 2017, S. 36).

- › *Präzisere Kalkulation der Planungs- und Ausführungskosten:* Das Bauwerksinformationsmodell bildet die Basis für die Kostenschätzung, die Kostenberechnung und die Ausschreibung. Durch die Möglichkeit der bauteilbezogenen Mengenabfragen könnten z. B. Ausschreibungen und Leistungsverzeichnisse nach den anerkannten Regeln der Technik zukünftig teil- bzw. vollautomatisiert erstellt werden. Somit lassen sich die Kostenrisiken von Bauprojekten bereits bei der Angebotserstellung fundierter evaluieren und unter Umständen minimieren (Silbe/Díaz 2017, S. 34 f.). Weiterhin ist es möglich, Finanzierungs- bzw. Mittelabflusspläne feiner abzustimmen, was dabei hilft, den Liquiditätsbedarf genauer einzuschätzen. Durch die Möglichkeit der modellbasierten Abrechnung ergeben sich weitere Vorteile, wie z. B. die jederzeit abrufbare Leistungs- und Fortschrittskontrolle.
- › *Erhöhte Planungs- und Ausführungsqualität:* Die Arbeit an einem gemeinsamen Bauwerksinformationsmodell verbessert potenziell den Informationsfluss zwischen den Projektparteien und ermöglicht es, Planungsfehler durch automatisierte Kollisionsprüfungen frühzeitig zu erkennen (Silbe/Díaz 2017, S. 35 f.). Zudem hilft BIM bei der detaillierten Dokumentation des Bauablaufs und kann so dazu beitragen, das Controlling zu verbessern und die Ausführungsqualität zu steigern. Beispielsweise könnte die tägliche Leistungsmeldung direkt von der Baustelle mit einem mobilen Endgerät (beispielsweise Tablet) durchgeführt werden, sodass durch vernetzte Abläufe jeder Projektbeteiligte zu jedem Zeitpunkt über den aktuellen Stand informiert ist. Durch die Möglichkeit der Visualisierung (z. B. auch durch VR oder AR) könnte außerdem das räumliche Verständnis und somit der direkte Bezug zu Bauteilen etc. auf der Baustelle effizienter für alle Beteiligten aufgebaut werden.

Die BIM-Methodik wird aktuell zumeist nur auf die Prozesse Planung und Realisierung angewendet, obwohl die Herstellungskosten im Lebenszyklus eines Gebäudes nur einen kleinen Teil der Gesamtkosten ausmachen und die Hauptkosten (etwa 80 %; Stange 2020, S. 30) während der Nutzungsphase anfallen. Gerade mit Blick auf den Wohnungsbau könnte BIM seine Potenziale vor allem dann ausspielen, wenn es für eine möglichst ganzheitliche Lebenszyklusbetrachtung genutzt wird. So ermöglicht die BIM-Methodik durch die automatisierte Analyse von Variantensimulationen grundsätzlich eine Optimierung der Flächeneffizienz sowie der Kosten eines Gebäudes über dessen gesamten Lebenszyklus hinweg (Planung, Herstellung, Nutzung inklusive Wartung und Reparatur bzw. Sanierung, Rückbau) (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 106 u. 154 ff.). Das Ziel ist, knappe Ressourcen wie Fläche oder Energie möglichst effizient zu nutzen und so die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von Bauprojekten gesamtheitlich (und nicht nur bezogen auf einzelne Lebenszyklusphasen) zu steigern. Als Voraussetzung müssen lebenszyklusbezogene Informationen wie Austauschzyklen, Wartungsintervalle oder Recyclingmöglichkeiten von Bauteilen oder die Nutzungsintensität von Räumen (beispielsweise »mittel« und »hoch«) in die Bauwerksinformationsmodelle integriert werden. Im Anschluss lassen sich verschiedene Gebäudevarianten (z. B. Wände mit und ohne Wärmedämmung, verschiedene Wandstärken) hinsichtlich ihres Energieverbrauchs, ihrer Gesamtkosten (Herstellung, Betrieb, Rückbau) oder der Intensität der Flächennutzung automatisiert miteinander vergleichen. Zwar entsteht dadurch ein Mehraufwand in der Planungsphase, der jedoch durch die erwarteten Einsparungen in den späteren Projektphasen wettgemacht werden kann (ARGE BIM4RAIL 2019, S. 8).

Durch die Integration von BIM und geografischen Informationssystemen (GIS) eröffnen sich zudem neue raum-, stadt- und umweltsplanerische Möglichkeiten. GIS dient der Erfassung raumbezogener Daten (Geodaten) sowie deren Modellierung, Analyse und Visualisierung (Neumair/Haas 2018; dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 169 ff.). Zu den GIS-Daten zählen beispielsweise – neben vielen anderen – die Daten der Liegenschaftskataster der Länder, die im Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystem der Vermessungsverwaltungen in Deutschland (ALKIS) in bundesweit einheitlicher Form enthalten sind. Wesentliches Ziel der Verknüpfung von BIM und GIS ist die Einbettung des BIM-Objektmodells in einen größeren räumlichen Kontext, sodass eine erweiterte Basis für Analyse- und Simulationsprozesse entsteht. Von Nutzen ist das z. B. für die Planung größerer Infrastrukturvorhaben im Bereich Straßen- oder Schienenbau, etwa um umweltsplanerische

²² Immer mehr Baustoffhersteller stellen in sogenannten Bauteilbibliotheken ihre Produkte als virtuelle 3-D-Modelle für den BIM-Einsatz zur Verfügung (Grimm 2018b). Daneben entstehen auch öffentliche Datenbanken, in denen die Daten zu Bauteilen herstellerübergreifend gesammelt werden (z. B. <https://www.bimobject.com/>; 12.3.2021).

Aspekte zu prüfen und zu optimieren (Schaller et al. 2019). Aber auch im Wohnungsneubau bieten sich zahlreiche Vorteile: vom Immobilienmanagement (Prüfung von Lage und Standort) über die Stadtplanung (Analyse der Bestandssituation, Evaluierung städtebaulicher Auswirkungen geplanter Gebäude; Halatsch 2019) bis hin zur digitalen Baugenehmigung (Kasten 3.1). Voraussetzung ist neben der Entwicklung interoperabler Datenstandards (BIM und GIS betreffend; Gruber et al. 2019) vor allem die Digitalisierung und einheitliche Verfügbarmachung der umfangreichen amtlichen Geodatenbestände – eine Aufgabe, die in Deutschland häufig in föderaler Zuständigkeit liegt und deshalb trotz langjähriger Bemühungen noch etliche Zeit in Anspruch nehmen dürfte (TAB 2021, S. 64).

Kasten 3.1 Digitale Baugenehmigung

Die Digitalisierung der Baugenehmigungsverfahren, für die die Bauaufsichtsbehörden der Länder und Kommunen zuständig sind (je nach Festlegung in den Landesbauordnungen der Bundesländer), gilt als wichtiger »Baustein für das kostengünstigere und schnellere Bauen von der Planung bis zur Fertigstellung« (Pfeifer et al. 2020). Schon heute werden Entwurfs- und Konstruktionspläne in 2-D-CAD, zukünftig voraussichtlich vermehrt in 3-D-BIM erstellt und sind so prinzipiell für ein elektronisches Antragsverfahren nutzbar (Theiler et al. 2019). Der Digitalisierungsstand in den verantwortlichen Behörden ist jedoch sehr unterschiedlich.²³ Mit Beschluss auf dem im Herbst 2018 durchgeführten »Wohngipfel« soll der durchgängig digitale Bauantrag bundesweit befördert und so »der Weg von der Planerstellung zum fertigen Bauwerk [...] effizienter gestaltet und damit kostenoptimiert werden« (Bundesregierung 2018c, S. 11). Gesetzliche Grundlage dafür ist u. a. das OZG, das Bund, Länder und Kommunen verpflichtet, Verwaltungsleistungen bis Ende 2022 auch online anzubieten und über Verwaltungsportale zugänglich zu machen.²⁴

In verschiedenen Bundesländern wurden bereits eigenständige Pilotprojekte zur Digitalisierung der Genehmigungsverfahren durchgeführt (z. B. in Nordrhein-Westfalen, Partnerschaft Deutschland 2019); zusätzlich wurde vom Bund im Rahmen der Umsetzung des OZG ein beim BMI angesiedeltes Digitalisierungslabor eingerichtet (unter Federführung Mecklenburg-Vorpommerns), um Lösungen für die Digitalisierung der Baugenehmigungsverfahren zu entwickeln und zu testen.²⁵ Von großer Bedeutung ist dabei die Standardisierung des Datenaustauschs, da diverse Akteure mit ihren verschiedenen Informationstechnologie(IT)-Systemen am Genehmigungsprozess beteiligt sind. Auf Beschluss des IT-Planungsrates²⁶ von Oktober 2017 wurden XPlanung und XBau zu verbindlichen Standards bei der Bearbeitung von Planungs- und Genehmigungsverfahren erklärt:²⁷

- › XPlanung beschreibt die Struktur, den Inhalt und die Form der Informationen, die für die Erstellung von räumlichen Planwerken (Raumordnung, Landes- und Regionalplanung, Bauleitplanung und Landschaftsplanung) benötigt werden;
- › XBau dagegen standardisiert den Inhalt unterschiedlicher Nachrichten in bauaufsichtlichen Verfahren und soll zugleich die BIM-Methode unterstützen, »indem es das bauordnungsrechtliche Genehmigungsverfahren zu Beginn des Bauprojekts digital abbildet« (Leitstelle XPlanung/XBau 2018, S. 6).

Zusammen bilden diese zwei Komponenten »wichtige Rahmenbedingungen, um den digitalen Strukturwandel im Bereich Planen und Bauen aktiv mitzugestalten« (Leitstelle XPlanung/XBau 2018, S. 4 f.). Die Umsetzung vonseiten der Kommunen soll bis 2023 erfolgen, wobei in Hamburg eine Leitstelle XPlanung XBau

²³ Beispiel Stadt Dresden: Hier sind die notwendigen Formulare digital verfügbar und editierbar (https://www.dresden.de/de/rathaus/dienstleistungen/baugenehmigung_dl15.php; 23.3.2021), müssen jedoch noch in analoger Form eingereicht werden (Will 2019, S. 55).

²⁴ <https://www.bmi.bund.de/DE/themen/moderne-verwaltung/verwaltungsmodernisierung/onlinezugangsgesetz/onlinezugangsgesetz-node.html> (12.3.2021)

²⁵ <https://www.onlinezugangsgesetz.de/Webs/OZG/DE/umsetzung/themenfelder/bauen-und-wohnen/bauen-und-wohnen-node.html> (12.3.2021)

²⁶ Der IT-Planungsrat ist ein politischer Ausschuss, der neben der Koordinierung der Zusammenarbeit im Bereich der Informationstechnik zwischen Bund und Ländern noch weitere Aufgaben innehat. Unter anderem liegen seine Schwerpunkte im Beschluss von IT-Standards in der Steuerung von E-Government-Projekten oder aber der Weiterentwicklung des Verbindungsnetzes des Bundes und der Länder (https://www.it-planungsrat.de/DE/ITPlanungsrat/Aufgabenspektrum/aufgabenspektrum_node.html; 12.3.2021).

²⁷ <https://www.xleitstelle.de/leitstelle/rechtliches> (12.3.2021)

(XLeitstelle)²⁸ eingerichtet wurde, der wichtige Koordinierungsaufgaben sowie die Pflege und Weiterentwicklung der Standards obliegen.

Quelle: Díaz et al. 2019, S. 178 ff.

3.2 Stand der BIM-Umsetzung in Deutschland

Generell gilt die Bauwirtschaft als Branche, die bei der Digitalisierung hinterherhinkt (Kocijan 2018). Im »Digitalisierungsindex Mittelstand«, der im Auftrag der Deutschen Telekom erstellt wird und 2019 zum vierten Mal erschien, belegen die mittelständischen Unternehmen der Bauwirtschaft im branchenübergreifenden Vergleich seit jeher einen der hinteren Plätze.²⁹ Für 2019 wurde ihr durchschnittlicher Digitalisierungsgrad mit 52 von 100 möglichen Punkten bewertet. Damit liegt das Baugewerbe 4 Punkte unter dem branchenübergreifenden Durchschnitt von 56 Punkten und deutlich hinter den Branchen Verkehr, Transport und Logistik (61 Punkte) sowie der Industrie (59 Punkte). Digitale Vorreiter sind Banken und Versicherungen (65 Punkte), Information und Kommunikation sowie Energie und Wasserversorgung (je 64 Punkte) (Deutsche Telekom 2019a u. 2019b). Das vergleichsweise niedrige Digitalisierungsniveau der Baubranche wird auch durch andere Studien bestätigt, so etwa den »KfW-Digitalisierungsbericht Mittelstand 2018« (KfW Research 2018).

Die Betrachtung des Digitalisierungsindex der Deutschen Telekom im Zeitverlauf zeigt, dass im Baugewerbe bei der Digitalisierung offenbar Aufholeffekte bestehen. 2016 hatte der Rückstand auf den branchenübergreifenden Durchschnitt noch bei 6 Punkten gelegen.³⁰ Dennoch verharrt die BIM-Nutzung, passend zum unterdurchschnittlichen Digitalisierungsgrad, auf einem niedrigen Niveau: So gaben 2017 15 % und 2018/2019 13 % der befragten Bauunternehmen an, BIM zu nutzen (30 % planen jeweils einen Einsatz) (Deutsche Telekom 2017, S. 6, 2019b, S. 6). Bei den befragten Unternehmen mit mehr als 50 Mitarbeiter/innen liegt der Anteil der BIM-Anwender/innen aktuell immerhin bei 22 %, was die These stützt, dass größere Unternehmen sich gegenüber der Digitalisierung generell aufgeschlossener zeigen (Deutsche Telekom 2019a, S. 9).

Die Aussagekraft der Zahlen aus dem Digitalisierungsindex ist allerdings begrenzt. Denn zur Anzahl und Art der befragten Unternehmen aus dem Baugewerbe ist nichts bekannt, sodass sich die Repräsentativität der Befragungsergebnisse nicht überprüfen lässt bzw. gewährleistet ist (alles in allem wurden knapp 2.100 mittelständische Unternehmen für den »Digitalisierungsindex 2019/2020« befragt; Deutsche Telekom 2019a, S. 3). Außerdem wurde auch die Art der BIM-Nutzung offenbar nicht genauer abgefragt (z. B. ob digitale Modelle erstellt werden, ganzheitlich mithilfe der modellorientierten Arbeitsweise geplant oder IFC als Datenaustauschformat genutzt wird). Diese Limitationen treffen größtenteils auch auf die restlichen Erhebungen zu, die in den letzten Jahren zur Verbreitung von BIM in Deutschland erschienen sind, was z. T. die große Varianz der Umfrageergebnisse zu erklären vermag. Insgesamt weist vieles darauf hin, dass die BIM-Methode bislang in Deutschland nur in einem geringen Umfang zum Einsatz kommt:

- › Eine Onlineumfrage im Rahmen des Forschungsprojekts »Future Construction 4.0 – Neue Bauprozesse durch parametrische Planungs- und digitale Fertigungsmethoden« (FUCON 4.0) von 2015, an der 378 Planer/innen (Architekt/innen, Fachplaner/innen, Generalunternehmer/innen) sowie Bauherr/innen und Projektmanager/innen teilgenommen hatten,³¹ zeigte im Ergebnis, dass 80 % der Befragten die BIM-Methode kennen und 14 % bereits länger (> 1 Jahr) mit ihr gearbeitet haben. Dabei werden hauptsächlich bauteilorientierte Gebäudemodelle genutzt (3-D-BIM), jedoch kaum Prozessinformationen wie Zeit (4-D) und Kosten (5-D) berücksichtigt. Zu den BIM-Anwender/innen gehören vor allem die befragten Planer/innen (22 % arbeiten immer oder häufig mit BIM), darunter dann diejenigen (29 %), die überwiegend mit größeren Projekten (Volumen > 25 Mio. Euro) zu tun haben. Immerhin 18 % der Befragten halten BIM für gänzlich ungeeignet und 39 % derjenigen, die nicht mit BIM arbeiten, wollen ihre bewährten Arbeitsmethoden (vornehmlich 2-D-Zeichnungen) beibehalten. Die Ergebnisse der Studie wurden vom Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation veröffentlicht (Braun et al. 2015).

²⁸ <https://www.xleitstelle.de/> (12.3.2021)

²⁹ Gebildet wird der Index anhand von 64 Kriterien aus 4 Handlungsfeldern (Kundenbeziehungen und Services, Produktivität, Geschäftsmodelle, IT-Sicherheit und Datenschutz), zu denen die befragten Unternehmen ihre Selbsteinschätzung abgeben (<https://www.digitalisierungsindex.de/>; 12.3.2021).

³⁰ Das Baugewerbe lag damals bei 46 Punkten, der Durchschnitt bei 52 (Deutsche Telekom 2016a, 2016b).

³¹ Bei den Befragten sind die Planer/innen mit knapp 75 % überrepräsentiert (Braun et al. 2015, S. 25).

- › 2016 führte die BRZ Deutschland GmbH (BRZ 2016) eine telefonische Befragung von 407 IT-Entscheider/innen aus den Bereichen Bauplanung und Bauausführung durch, um »die Potenziale und Risiken der relevanten IT-Trends für die Baubranche zu bewerten«. 70 % der Befragten kennen die BIM-Methode, davon setzen sie 23 % auch ein. Mit BIM vertraut sind auch hier vor allem die befragten Planer/innen und Architekt/innen (80 % kennen BIM, 34 % setzen es ein), während insbesondere kleinere Hochbauunternehmen Neuland betreten. Von den Hochbauunternehmen mit weniger als 20 Mitarbeiter/innen sind nur 41 % mit BIM vertraut, bei 14 % kommt es zur Anwendung. Obwohl die Bekanntheit von BIM bei den befragten bauausführenden Unternehmen mit der Unternehmensgröße kontinuierlich ansteigt, korreliert die tatsächliche Anwendungshäufigkeit der Planungsmethode damit nicht direkt. So wird BIM bei den Hochbauunternehmen von mittelgroßen Unternehmen (20 bis 50 Mitarbeiter/innen) am häufigsten eingesetzt (22 %; bei den Unternehmen mit mehr als 50 Mitarbeiter/innen 19 %).
- › An einer 2017 durchgeführten Onlineumfrage zur BIM-Implementierung auf der Webseite der DETAIL Business Information GmbH nahmen 312 »Protagonisten aus der gesamten Wertschöpfungskette Bau« teil (Herrmann/Westphal 2017). Die Ergebnisse: 38 % der Befragten arbeiten bereits nach der BIM-Methode, 27 % bereiten aktuell die Einführung vor, und 8 % planen dies. Der Anteil der Nichtnutzer/innen liegt bei 34 %.
- › 2018 veröffentlichte die Unternehmensberatung PricewaterhouseCoopers (PwC 2018) eine Studie »zur aktuellen Branchensituation und Marktentwicklung im deutschen Baugewerbe«, basierend auf einer telefonischen Befragung von »Entscheidungsträgern von 100 führenden Unternehmen der deutschen Bauwirtschaft« (Erhebungsjahr 2017). Dabei standen die Wachstumspotenziale durch Digitalisierung speziell im Fokus. Nach der Einsatzhäufigkeit von BIM befragt, zeigt sich bei Unternehmen über alle Sektoren hinweg (Bausoftware, Baustoffe, Gebäudeausstattung, Bauunternehmen, baunahe Dienstleistungen, Bauwerkzeuge, Bauchemie, Gebäudetechnik) nur eine geringe Verbreitung. Am häufigsten wird BIM bei Unternehmen aus den Bereichen Bausoftware, Baustoffe und Gebäudeausstattung eingesetzt (jeweils 11 %). Bauunternehmen folgen mit einem Anteil von 9,6 %.
- › Ebenfalls aus 2018 stammt eine Erhebung zum Digitalisierungsstand der mittelständischen deutschen Baubranche der Mittelstand 4.0 Agentur Kommunikation (2018), bei der auch die BIM-Nutzung Thema war. Neben qualitativen Interviews mit Vertreter/innen dreier Bauverbände wurden per E-Mail 298 mittelständische Bauunternehmen aus Berlin und Brandenburg zum aktuellen Stand der Digitalisierung in ihrem Unternehmen und zu generellen Motiven und Hemmnissen von Digitalisierungsvorhaben befragt; 47 Unternehmen nahmen an der schriftlichen Umfrage teil. Ergebnis: Nur 5 Unternehmen (10 %) nutzen BIM, obgleich darin große Chancen gesehen werden. Fast jedes zweite Unternehmen (49 %) gab an, dass das Fehlen qualifizierter Mitarbeiter/innen die Implementierung hemmt.

Korrespondierend zur vergleichsweise geringen Verbreitung von BIM in der deutschen Baupraxis setzte hierzu-land die staatliche Förderung der BIM-Nutzung erst verhältnismäßig spät ein. Als erste staatliche Maßnahme wurde Ende 2015 vom BMVI – auf Empfehlung der 2013 eingesetzten Reformkommission Bau – der Stufenplan »Digitales Planen und Bauen« ins Leben gerufen. Ziel war die schrittweise Einführung von BIM in allen Infrastrukturprojekten des Bundes bis 2020 (BMVI 2015). Der Plan beschreibt konkret, welche Anforderungen von den öffentlichen Auftraggebern des Infrastrukturbaus bis wann einzufordern sind und welche Kompetenzen sich Auftragnehmer/innen aneignen sollten, um Projekte modellorientiert abwickeln zu können (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 14 f.):

1. In der ersten Phase bis 2017 sollte die modellorientierte Arbeitsweise mit Pilotprojekten und begleitenden wissenschaftlichen Aktivitäten vorbereitet werden (z. B. Standardisierungsmaßnahmen, Aus- und Weiterbildung, Klärung rechtlicher Fragen, Entwicklung von Leitfäden).
2. In der zweiten Phase von 2017 bis 2020 sollte eine größere Zahl von Pilotprojekten mit bestimmten Mindestanforderungen (definiert als Leistungsniveau 1; Kasten 3.2) durchgeführt werden, um eine breitere Erfahrungsbasis zu schaffen.
3. Ab 2020 ist dann die verpflichtende Implementierung dieser Mindestanforderungen in allen neuen Infrastrukturprojekten vorgesehen. Gleichzeitig wird der Stufenplan für den Zeitraum von 2021 bis 2025 weiterentwickelt und ein entsprechendes BIM-Leistungsniveau 2 konzipiert.

Der BMVI-Stufenplan hat zweifellos, dies lässt sich bereits heute sagen, einen wichtigen Beitrag zum digitalen Fortschritt im Infrastrukturbereich geleistet. Unternehmen wie die DB Netz AG, die sich in Infrastrukturprojekten engagieren, haben diverse BIM-Pilotprojekte lanciert, wissenschaftlich evaluieren lassen und Strategien zur

Umsetzung der geforderten Ziele entwickelt (DB AG 2019; König 2019). Im Gegensatz dazu besteht im Hochbaubereich aktuell kein Plan zur verpflichtenden Einführung der BIM-Methodik, sondern lediglich ein Erlass des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) vom 16. Januar 2017 (Díaz et al. 2019, S. 51 f.). Dem zufolge muss bei Hochbauprojekten des Bundes ab einer Bausumme von 5 Mio. Euro geprüft werden, ob die Anwendung von BIM infrage kommt. Das entspricht folglich einem Prüfauftrag an die Baubehörde, eine verpflichtende BIM-Implementierung vergleichbar zu öffentlichen Infrastrukturprojekten ist jedoch nicht vorgesehen (Beuthan 2017). Der Erlass des BMU hat deshalb auch kaum merkliche Effekte beim Ausbau der BIM-Implementierung im Bundeshochbau gezeitigt (Díaz et al. 2019, S. 15).

Kasten 3.2 BIM-Leistungsniveau 1

Das BIM-Leistungsniveau 1 stellt Mindestanforderungen fest, die ab 2017 bei öffentlichen Infrastrukturprojekten eingehalten werden sollen. Die Anforderungen beziehen sich auf die Bereiche Daten, Prozesse und Qualifikationen.

Daten: Durch die Auftraggeberinformationsanforderungen (AIA) legt der Auftraggeber genau fest, wann er welche Daten in welcher Genauigkeit erwartet (z. B. Datenformat, Maßstab, Detailtiefe). Bei der Erstellung der AIA sollte eng mit den zukünftigen Betreiber/innen kommuniziert werden, um auch die für sie relevanten Informationen früh herauszuarbeiten. Alle zu erbringenden Leistungen sind auf Basis eines 3-D-Modells digital abzugeben. Benötigte 2-D-Pläne müssen aus dem Modell bei Bedarf automatisch abgeleitet werden. Das Modell ist mitsamt allen Fachinformationen auf eventuelle Planungskollisionen zu prüfen.

Prozesse: Abläufe und Schnittstellen werden durch den BIM-Abwicklungsplan (BAP) definiert. In diesem Plan wird festgelegt, zu welchem Zeitpunkt Zusammenführungen der Modelle für Kollisionsprüfungen erfolgen und wann welche Planung in welcher Detailtiefe geliefert wird. Er stellt den Fahrplan des Projekts bezüglich der Weitergabe und Verwaltung von Informationen. Zudem ist eine gemeinsame Datenumgebung zu implementieren, auf die alle Projektbeteiligten Zugriff erhalten können.

Qualifikationen: Auftragnehmer, die an einer Vergabe beteiligt sind, sollen BIM-Kompetenzen zur Umsetzung von Projekten auf dem Leistungsniveau 1 vorweisen können. Diese Qualifikation soll bei der Auftragserteilung berücksichtigt werden. Die Auftraggeberseite sollte die Ausschreibung BIM-gerecht erstellen (z. B. AIA) und Angebote werten.

Quelle: BMVI 2015, S. 9 ff.; Díaz et al. 2019, S. 14 f.

Im internationalen Vergleich hinkt Deutschland damit anderen Ländern hinterher, die die BIM-Einführung teilweise wesentlich früher und stärker forciert haben (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 66 ff.; Stange 2020, S. 303 ff.). Als Vorreiter sind insbesondere die USA, Großbritannien, Dänemark, Finnland, Norwegen, die Niederlande und Singapur zu nennen. Eine besondere Rolle spielte hierbei meist der Staat als öffentlicher Auftraggeber (Borrmann et al. 2015, S. 13): Beispielsweise besteht in Singapur seit 2008 die Pflicht, Bauunterlagen von öffentlichen Bauvorhaben elektronisch einzureichen (»BIM e-submission«); Finnland und Dänemark führten 2007, Norwegen 2010 BIM als teils verpflichtende Planungsmethode für öffentliche Auftraggeber ein (McAuley et al. 2017). Die britische Regierung erklärte 2011, die Bauindustrie mittels BIM auf ein neues technisches Niveau anheben zu wollen, gründete eine BIM Task Group und machte BIM für alle öffentlichen Bauvorhaben ab 2016 obligatorisch (McAuley et al. 2017, S. 40).

Dieses Engagement spiegelt sich auch in den Nutzungszahlen wider, die laut Umfragen teils deutlich über denen in Deutschland liegen. Laut nationalen Erhebungen der britischen NBS Enterprises Ltd. (2011 u. 2020) unter Branchenexpert/innen (bis zu 1.000 Befragte) stieg die BIM-Nutzung in Großbritannien von 13 % im Jahr 2011 auf 73 % im Jahr 2020. 2016 veröffentlichte die NBS (2016) auch eine internationale Erhebung (durchgeführt unter Branchenvertreter/innen in Großbritannien, Tschechien, Kanada, Japan und Dänemark; Teilnehmerzahlen zwischen 157 und 244), der zufolge BIM in Dänemark mit 78 % Nutzeranteil am weitesten verbreitet ist; es folgen Kanada mit 67 %, Großbritannien mit 48 % und Japan mit 46 % sowie auf dem letzten Platz Tschechien (25 %). Obwohl diese Zahlen aufgrund der inhärenten Unsicherheiten solcher Befragungen mit Vorsicht zu interpretieren sind, sind sie ein Hinweis darauf, dass Deutschland bei der BIM-Implementierung noch großen Aufholbedarf hat.

Dies gilt insbesondere für die Formulierung von Richtlinien und Standards hinsichtlich der Durchführung von BIM-Projekten, die für »einheitliche und konsistent angewandte Prozesse« und die Bereitschaft der Unternehmen zur BIM-Übernahme von großer Bedeutung sind.³² So erschien zwar 2013 erstmals ein BIM-Leitfaden im Auftrag des BBSR, der als Ratgeber »eine erste Annäherung an das Thema BIM und die damit verbundenen Anforderungen« bietet (Egger et al. 2013, S. 3). Verbindliche Vorgaben sind darin jedoch nicht zu finden. Stattdessen wird in diesem Dokument auf die bislang nicht vorhandenen BIM-Richtlinien in Deutschland hingewiesen, die für »die Schwierigkeiten der BIM-Anwendung« mitverantwortlich gemacht werden (Egger et al. 2013, S. 4).

Seither hat sich zwar hierzulande einiges getan. Es haben sich zahlreiche Initiativen und Einrichtungen gebildet, die sich mit der BIM-Methode und deren praktischer Umsetzung beschäftigen (Kasten 3.3). Hervorzuheben ist der beim VDI (2019) eingerichtete BIM-Koordinierungskreis, der die nationale Richtlinienarbeit vorantreibt, die seit 2013 in Form der Richtlinienreihe VDI 2552 langsam Gestalt annimmt. Dennoch liegt Deutschland im Bereich der Standardisierungsaktivitäten deutlich hinter anderen Ländern zurück: Die Briten entwickelten bereits 2013 eine Spezifikation,³³ in der die grundlegenden Abläufe eines BIM-Projekts formuliert wurden (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 68 f.). Die Besonderheit dieser Richtlinien stellen Data Drops dar. Hierbei werden zu ausgewählten Zeitpunkten während der Laufzeit vorab definierte Projektinformationen an die Bauherr/innen überreicht. Weiterhin wurde eine »National BIM Library«, aufgebaut, die BIM-fähige Bauteile und Objekte diverser Hersteller und Planer/innen inklusive dazugehöriger Bauteilinformationen enthält und so eine standardisierte Informationsbasis für die effiziente Projektdurchführung frei zur Verfügung stellt. In anderen Ländern gibt es ähnliche Standardisierungsbemühungen, die bereits in internationale Normen einfließen und somit auch für Deutschland maßgeblich werden könnten (McAuley et al. 2017; Stange 2020, S. 319 ff.).

Auf europäischer Ebene werden die erwähnten nationalen Bemühungen seit 2016 durch die EU BIM Task Group begleitet, um die relevanten Akteure in den einzelnen Ländern zu vernetzen und einen gemeinsamen europäischen Ansatz zu finden (Herrmann/Westphal 2017, S. 16). Die rechtlichen Weichen dafür waren schon Anfang 2014 gestellt worden, als die EU-Beschaffungsrichtlinien reformiert wurden. In der Folge können die Mitgliedstaaten seit 2016 nach Art. 22, Abs. 4 der Richtlinie 2014/24/EU³⁴ »für öffentliche Bauaufträge und Wettbewerbe [...] die Nutzung spezifischer elektronischer Instrumente, wie z. B. elektronischer Instrumente für die Gebäudedatenmodellierung oder dergleichen, verlangen« (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 57 u. 69; Borrmann et al. 2018, S. 43; Herrmann/Westphal 2017, S. 16). Praktisch zeitgleich wurde seitens des Komitees 442 des CEN mit der europäischen Normung der BIM-Prozesse begonnen. Als einer der ersten Schritte wurde festgelegt, dass das in der ISO-Norm 16739 beschriebene offene Austauschformat IFC4 auch auf europäischer Ebene als maßgeblicher Datenstandard eingeführt wird (EN ISO 16739). Da CEN-Normen verpflichtend in das nationale Normenwerk übernommen werden müssen – in Deutschland gilt in diesem Fall seit 2017 die entsprechende Norm DIN EN ISO 16739 –, war damit der Weg frei für »open BIM« auf gesamteuropäischer Ebene.

Kasten 3.3 Wichtige BIM-Akteure in Deutschland

Die *planen-bauen 4.0 GmbH* (PB40) wurde 2015 auf der Leitmesse Bau in München durch alle relevanten Verbände und Kammerorganisationen der Wertschöpfungskette Planen, Bauen und Betreiben in Deutschland gegründet. Ziel ist die »Einführung von digitalen, den gesamten Lebenszyklus von Bauwerken sowie Immobilienprojekten abbildenden Geschäftsprozessen«. ³⁵ PB40 sieht sich auch als Plattformgesellschaft und zentraler Gesprächspartner im Bereich Forschung, Regelsetzung und Marktimplementierung von BIM. Die Initiative war maßgeblich an der Erarbeitung des Stufenplans »Digitales Planen und Bauen« des BMVI beteiligt und arbeitet an dessen Weiterentwicklung.

³² <https://planen-bauen40.de/handlungsfelder/standardisierung/> (12.3.2021)

³³ Publicly Available Specification 1192-2 »Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling«

³⁴ Richtlinie 2014/24/EU über die öffentliche Auftragsvergabe und zur Aufhebung der Richtlinie 2004/18/EG; dies betrifft Projekte, die den EU-Schwellenwert überschreiten, der 2021 bei 5.350.000 Euro liegt (https://europa.eu/youreurope/business/selling-in-eu/public-contracts/public-tendering-rules/index_en.htm; 12.3.2021).

³⁵ <https://planen-bauen40.de/> (12.3.2021)

Das 2017 gegründete *Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Planen und Bauen* ist Teil der Förderinitiative »Mittelstand 4.0 – Digitale Produktions- und Arbeitsprozesse«, die im Rahmen des Förderschwerpunkts »Mittelstand-Digital – Strategien zur digitalen Transformation der Unternehmensprozesse« vom BMWi unterstützt wird. Insgesamt zwölf Partner aus Wissenschaft und Praxis, verteilt über ganz Deutschland, bringen in diesem Kompetenzzentrum ihr Know-how aus der Bau- und Immobilienbranche ein, um kleine und mittlere Unternehmen sowie Handwerksbetriebe bei der Digitalisierung und beim Einstieg in BIM zu unterstützen. Das BMWi ermöglicht die kostenlose Nutzung aller Angebote von »Mittelstand-Digital«. ³⁶

In den einzelnen Bundesländern wurden verschiedene *BIM-Cluster* gegründet, die den Erfahrungsaustausch und die Vernetzung der Interessensgruppen rund um das Thema BIM regional unterstützen sollen. ³⁷ BIM-Cluster sind als eingetragene Vereine (z. B. Hessen) organisiert oder lose angesiedelt an Kammern (z. B. Rheinland-Pfalz) oder Verbänden (z. B. Nordrhein-Westfalen). Es gibt keine Vorgabe für die Organisation. Die Zusammenarbeit basiert auf Fachexpert/innen der PB40, buildingSMART und allen anderen Kammern und Verbänden auf Landesebene. Ziel ist u. a., die landesspezifischen Bauordnungen bei der BIM-Implementierung zu berücksichtigen.

Das deutschsprachige Chapter von *buildingSMART International* wurde 1995 (damals als International Alliance for Interoperability e. V.) auf Initiative führender deutscher Planungs-, Ausführungs- und Bausoftwareunternehmen gegründet, um die damals noch neuen modellbasierten, intelligenteren Planungsmethoden in Deutschland, Österreich und in der Schweiz voranzubringen. Wesentliche Aufgabe des Verbandes ist die Weiterentwicklung und Standardisierung des offenen, d. h. herstellerneutralen Informationsaustausch (IFC) in BIM-Projekten und die Definitionen und Standardisierung von entsprechenden Arbeitsprozessen. ³⁸

Der *Branchendialog Digitaler Hochbau* ist eine 2017 vom BMU und BMWi (2017) initiierte Plattform, welche die Vernetzung der Akteure der Wertschöpfungskette Bau und den digitalen Transformationsprozess im Hochbaubereich unterstützen soll. Mitglieder im Beirat sind Vertreter/innen der Bundesarchitektenkammer (BAK), der Bundesingenieurkammer (BingK), des HDB, des Zentralverbands des Deutschen Baugewerbes e. V. (ZDB), des Bundesverbands Bausoftware (BVBS) und des VDMA. Aktivitäten zum Bundeshochbau werden durch das BBSR und das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) begleitet.

Der *VDI* konzipiert als technisch-wissenschaftlicher Verein u. a. Standardisierungen in Form von VDI-Richtlinien. 2013 wurde mit dem VDI-Koordinierungskreis ein Gremium eingerichtet, das die nationale Richtlinienarbeit im Bereich BIM vorantreiben soll. Ungefähr 100 Expert/innen arbeiten seither – in enger Abstimmung mit buildingSMART e. V. und internationalen Standardisierungsgremien (CEN und ISO) – an der Richtlinienreihe VDI 2552, die nach Vollendung 11 Blätter umfassen soll (VDI 2019). VDI 2552 »liefert einen strukturierten Ansatz für die effektive Implementierung von BIM in die Prozesse des Planens, Bauens und Betriebens [und] beschreibt dazu die heute bereits international bewährten Regeln der Technik, Erfahrungen und Entwicklungen bei der Anwendung von BIM«. ³⁹

Quelle: Díaz et al. 2019, S. 12 ff.

3.3 Implikationen und Voraussetzungen des BIM-Einsatzes

Es sollte durch die bisherigen Ausführungen deutlich geworden sein, dass sich durch die konsequente Anwendung der BIM-Methode die Abläufe und Prozesse im Bauwesen grundlegend verändern. Infolge der kollaborativen Arbeit am digitalen Bauwerksmodell von Projektbeginn an wird die lineare Abfolge einzelner Bauphasen – Planung, Bauausführung, Betrieb – aufgehoben, insofern Know-how aus der Ausführungs- wie ggf. auch der Betriebsphase bereits in die Entwurfs- und Planungsphase integriert wird. Dies erfordert nicht nur ein Umdenken und eine z. T. radikale Abkehr von der bisherigen Arbeitsweise bei allen Projektbeteiligten sowie die Bereitschaft, sich auf ein neues integratives Arbeitskonzept einzulassen; auch Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten müssen neu definiert und zugeordnet werden. Wichtige Aufgaben kommen hierbei den BIM-Manager/innen

³⁶ <https://www.kompetenzzentrum-planen-und-bauen.digital/> (12.3.2021)

³⁷ <https://planen-bauen40.de/bim-cluster/> (12.3.2021)

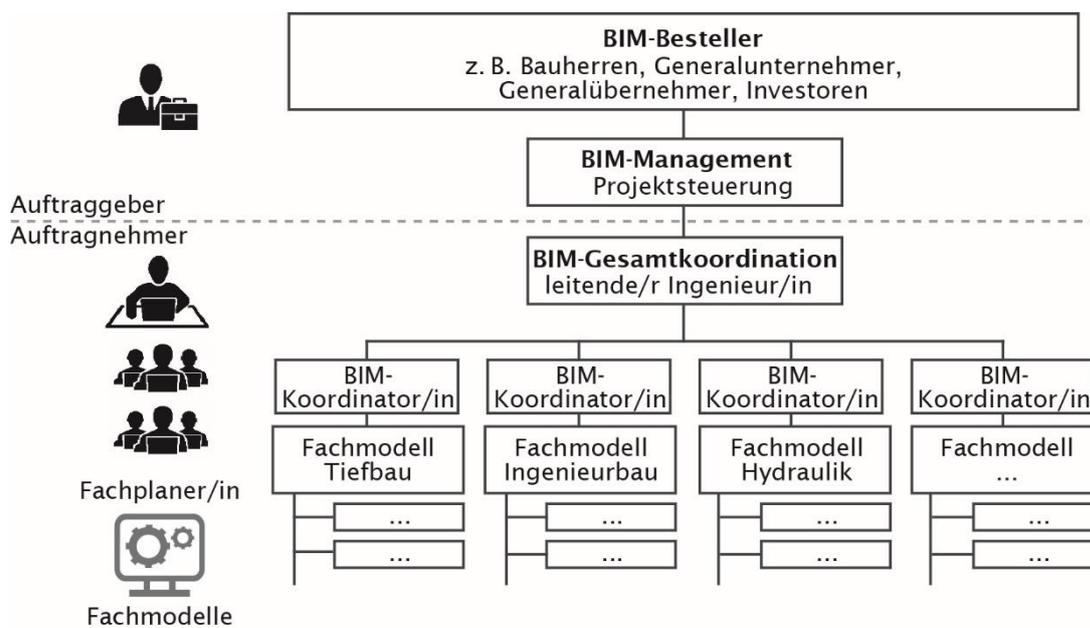
³⁸ <https://www.buildingsmart.de/> (12.3.2021)

³⁹ <https://www.vdi.de/richtlinien/unsere-richtlinien-highlights/vdi-2552> (12.3.2021)

und den BIM-Koordinator/innen zu, die ein BIM-Projekt von Beginn an bis zu seinem Abschluss begleiten (Abb. 3.3).

Die Schlüsselrolle haben die *BIM-Manager/innen*, die auf Auftraggeberseite als eine Art digitale Bauleitung fungieren. Ihnen obliegt die Aufgabe, die Arbeitsabläufe organisatorisch wie administrativ zu koordinieren (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 71) – sie werden deshalb auch als BIM-Projektsteuerer bezeichnet (Stange 2020, S. 265). Während bei der traditionellen Bauablaufplanung die Verantwortlichkeiten für Pläne, Rechnungen etc. mithilfe des Planstempels der Erstellerin/dem Ersteller zugewiesen werden, müssen bei der BIM-Arbeitsweise Zugriffsrechte verteilt werden, da ansonsten alle Projektbeteiligten Zugriff auf das Gesamtmodell haben und somit Änderungen durchführen können. Die BIM-Manager/innen klären die Zuständigkeiten und teilen den Projektbeteiligten die entsprechenden Zugriffsrollen zu (Silbe/Díaz 2017, S. 53). Sie sind Ansprechpartner/innen für alle Projektbeteiligten, koordinieren die Arbeit am digitalen Gebäudemodell und übernehmen die Qualitätssicherung.

Abb. 3.3 Organisation von BIM-Projekten



Quelle: nach Ehle 2019

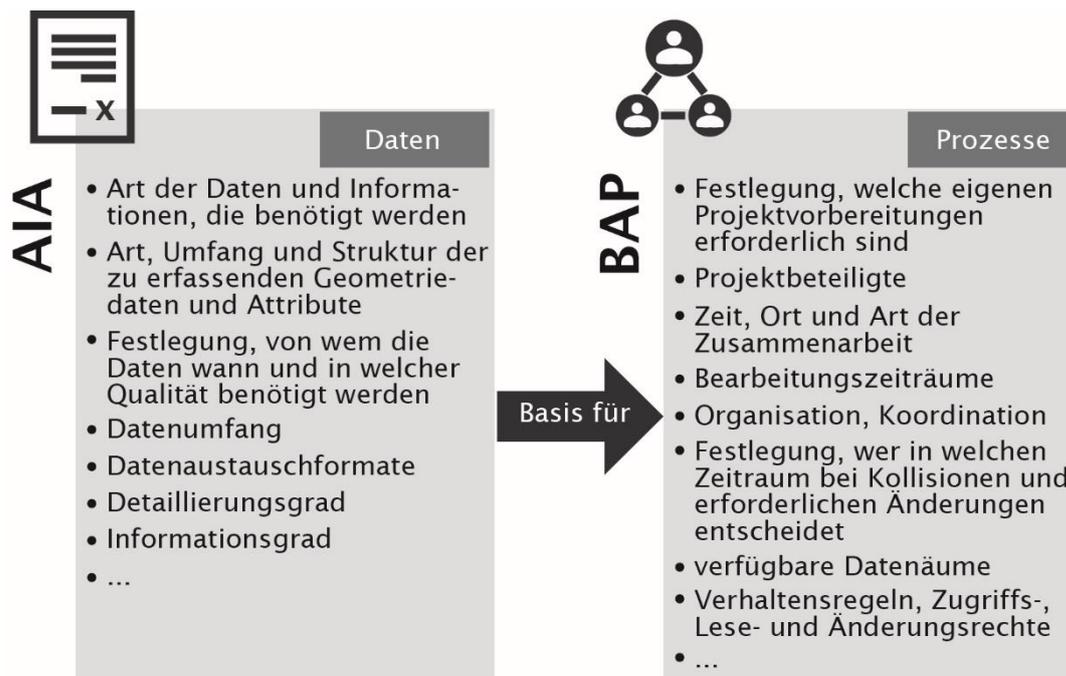
Die BIM-Manager/innen agieren auf operativer Ebene in enger Abstimmung mit den *BIM-Koordinator/innen*, die auf Auftragnehmerseite (Architektur-, Fachplanungsbüros, ausführende Baufirmen etc.) die BIM-Prozesse in den einzelnen Fachbereichen überwachen (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 71 f.). Die BIM-Koordinator/innen prüfen die eingehenden Modelle der BIM-Autor/innen, fügen diese in ein BIM-Fachmodell zusammen und sorgen für den fehlerfreien Datenaustausch (AHO 2019, S. 23). Sollten aufgrund der Projektkomplexität mehrere BIM-Koordinator/innen notwendig werden, könnte ein/e *BIM-Gesamtkoordinator/in* mit der Aufgabe betraut werden, die Zusammenführung der verschiedenen Fachmodelle zu definierten Zeiten in einem BIM-Koordinationsmodell mithilfe separater Software (Model-Management-Software) vorzunehmen.

Grundlage für die Arbeit der BIM-Manager/innen sowie -Koordinator/innen sind die Festlegungen, die in den AIA und im BAP genannt werden (Abb. 3.4; dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 15 u. 74 f.). In den AIA legt die Auftraggeberseite vertraglich fest, wann welche Daten in welcher Genauigkeit und in welcher Form benötigt werden (Austauschformat, Informationsgehalt, Detaillierungsgrad etc.). Dies umfasst neben den geometrischen Anforderungen an das 3-D-Modell vor allem die Bauteilattribuierung, also mit welchen Eigenschaften (z. B. Wärmedurchlässigkeit, Schallschutz oder ökologischer Fußabdruck) die einzelnen Bauteile versehen werden sollen (BMVI 2015, S. 9). Auch ob Kosten- und Zeitinformationen (4-D- und 5-D-BIM) in das digitale Gebäudemodell integriert werden, ist hier zu fixieren. Bei der Erstellung der AIA sollte möglichst auch der zukünftige Betreiber/innen einbezogen werden, damit auch die für sie relevanten Anforderungen abgedeckt

sind. Oft auch als BIM-Pflichtenheft bezeichnet, ergänzt die AIA somit die vertraglichen Bestimmungen zwischen Auftraggeber- und Auftragnehmerseite.

Ergänzend dazu werden im BAP, der auf den AIA aufbaut, die genauen Abläufe der modellorientierten Zusammenarbeit definiert. Dazu gehört, »wie oft und wann Planungsbesprechungen und Zusammenführungen der Fachmodelle mit Kollisionsprüfungen stattfinden, welche Teile der Planung bis wann in welcher Detailtiefe geliefert werden müssen sowie wann und in welchem Umfang Visualisierungen, Mengenermittlungen, Simulationen technischer Anlagen, Lebenszyklusbetrachtungen usw. durchzuführen sind« (BMVI 2015, S. 10 ff.). Der BAP beschreibt somit den konkreten Fahrplan eines BIM-Projekts.

Abb. 3.4 Inhalte der Auftraggeberinformationsanforderungen (AIA) und des BIM-Abwicklungsplan (BAP)



Quelle: Díaz et al. 2019, S. 76 in Anlehnung an Silbe/Díaz 2017, S. 62

Die beschriebenen Vorteile von BIM (Kap. 3.1.2) lassen sich nur dann realisieren, wenn die Methode möglichst durchgängig im gesamten Planungs- und Bauprozess (und ggf. darüber hinaus) von allen Beteiligten eingesetzt wird und zwar mit einem möglichst hohen Informationsgehalt und Detaillierungsgrad (4-D- oder 5-D-»open-Big-BIM«; Kap. 3.1.1). Den BIM-Prozess entsprechend zu implementieren, ist eine äußerst herausfordernde Aufgabe, insbesondere bei größeren Projekten mit ihren zahlreichen Akteuren. Die Hürden liegen dabei nicht nur im technischen Bereich (Software und Datenaustausch), sondern vor allem im Bereich der Prozessorganisation und des Informationsmanagements. Da die Branche hier mit einem grundlegenden Paradigmenwechsel in der Herangehensweise an Bauprojekte konfrontiert ist, ist ein gemeinsames Verständnis der Arbeitsprozesse von entscheidender Bedeutung.⁴⁰ Entsprechend groß ist der Standardisierungsbedarf zu allen Aspekten von BIM – von technischen Schnittstellen und öffentlichen Bauteilbibliotheken über Grundlagenthemen (z. B. Begriffs- u. Prozessdefinitionen) bis hin zu Anwendungsvorgaben (Anforderungen an den Datenaustausch und das Datenmanagement, erforderliche Qualifikationen) –, wie die sehr breite Ausrichtung der einschlägigen Richtlinienreihe 2552 des VDI aufzeigt (Abb. 3.5; Kap. 3.2).

⁴⁰ <https://www.detail.de/artikel/von-status-quo-bis-paradigmenwechsel-35157/> (12.3.2021)

Wichtig für die BIM-Tauglichkeit eines Programms ist vor allem, dass es mit offenen Datenformaten wie IFC umgehen und so in »open-BIM«-Projekten eingesetzt werden kann. Daneben ist für die technische Umsetzung eines BIM-Projekts auch der Aufbau einer gemeinsamen Datenumgebung (CDE) empfehlenswert, die als Kollaborationsplattform teamübergreifendes Arbeiten und eine zentrale Datenverwaltung in der Cloud ermöglicht (Díaz et al. 2019, S. 109 ff.). Hinzu kommen also unter Umständen Kosten für die Anschaffung eines solchen CDE-Systems (z. B. Autodesk »BIM 360«, Allplan »Bimplus«).

Viele Unternehmen (auch solche mit BIM-fähiger CAD-Ausstattung) dürften im Zuge der Umstellung auf BIM mit der Frage konfrontiert sein, ob ihre IT-Infrastruktur noch zukunftsfähig ist und nicht gleich in aktuelle Hard- und Software investiert werden soll. Doch selbst wenn dies der Fall sein sollte und entsprechende Anschaffungen fällig werden, dürften in den allermeisten Fällen die Kosten für Schulung und Weiterbildung der Mitarbeiter/innen sowie die damit verbundenen Produktivitätseinbußen den größten Teil der Umstellungskosten ausmachen (Karl/Spengler 2018). Dabei geht es auch, aber nicht nur, um die Weiterentwicklung der Computer- und Softwarekenntnisse. Da es sich bei BIM um eine ganz neue Arbeitsmethode handelt, die die bisherigen Abläufe teilweise grundsätzlich verändert, sind viele Aspekte des Arbeitens betroffen, die (je nach Tätigkeitsfeld) den Erwerb bestimmter fachlicher Fähigkeiten und methodischer Kompetenzen bis hin zur Entwicklung neuer Berufsbilder (wie z. B. BIM-Manager/in; Karl et al. 2015) erforderlich machen. Laut Karl und Spengler (2019) gehören zu den BIM-relevanten Kompetenzbereichen beispielsweise vernetztes und virtuelles Arbeiten, der Umgang mit großen Datenmengen oder die Interaktion mit Softwarealgorithmen. Speziell sind stärker als bislang soziale Kompetenzen, systemorientiertes Denken oder das Verständnis für interdisziplinäre Zusammenhänge gefordert, ohne die eine kollaborative Zusammenarbeit nicht erfolgreich durchgeführt werden kann.

Die Einführung der Arbeitsmethode BIM erfordert somit ein hohes Maß an Aufgeschlossenheit gegenüber Arbeitsveränderungen und neuen Technologien (Díaz et al. 2019, S. 97). Nicht alle Mitarbeiter/innen zeigen sich dieser Situation gegenüber offen oder verfügen über das erforderliche Digital-Know-how – nicht zuletzt dürfte es sich dabei im Wesentlichen auch um eine Generationenfrage handeln. Die Motivation, gezielte Schulung und Weiterentwicklung des Personals (bis die neuen Abläufe und Rollen eingespielt sind) sind deshalb eine langfristige Aufgabe, deren Umsetzung längere Zeit beanspruchen könnte als von vielen Expert/innen bisher erwartet (u. U. bis zu 10 Jahre und mehr) (Meurers 2019). Einzelne Forschungsarbeiten bestätigen, dass die erfolgreiche BIM-Implementierung eine strategische Planung und Vorgehensweise benötigt (Poirier et al. 2015). Dabei empfiehlt sich ein stufenweises Vorgehen. Hilfreich ist, mit einfachen Projekten zu beginnen, um sich anschließend Schritt für Schritt an komplexere Aufgaben heranzutasten und Routinen zu entwickeln (Egger et al. 2013, S. 36). Zur Beurteilung, wie gut ein Unternehmen oder ein Projektteam auf BIM eingestellt ist, wurden zahlreiche BIM-Reifegradmodelle entwickelt, mit denen der »Grad der Qualität, Wiederholbarkeit und Durchgängigkeit der Bereitstellung einer BIM-Leistung« und somit der BIM-Implementierungsgrad bewertet werden können (Stange 2020, S. 196). Die einzelnen Reifegradmodelle umfassen üblicherweise sowohl technische als auch organisatorische Aspekte, legen jedoch teils sehr unterschiedliche Bewertungsmaßstäbe und -kriterien zugrunde (für einen Überblick Stange 2020, S. 195 ff.; Wu et al. 2017). Die Vielfalt der bestehenden Ansätze, die BIM-Reife zu messen, macht jedenfalls deutlich, dass die BIM-Implementierung ein sehr vielschichtiger, von vielen Faktoren abhängiger Prozess ist.

Welche Kosten von Unternehmensseite dafür aufzuwenden sind, ist nicht allgemein bezifferbar, da dies stark von den individuellen unternehmerischen Voraussetzungen abhängt (Unternehmensgröße und Leistungsbereich, Vorerfahrungen und Digitalisierungsgrad, vorhandene Kompetenzen des Personals, Softwareausstattung etc.). Damit sich die Umstellung auf BIM für ein Unternehmen wirtschaftlich rechnet, müssen die Kosten durch die erreichbaren Produktivitätsgewinne aufgewogen werden. Allerdings sind Letztere zunächst nicht spürbar und fallen erst durch die mittel- oder langfristige Nutzung von BIM ins Gewicht, weshalb sich viele Bauunternehmen zunächst sträuben, traditionelle und bewährte Arbeitsabläufe zu unterbrechen, um in einen Arbeitswandel zu investieren (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 101). Dies gilt insbesondere für kleinere Baufirmen, die durch BIM keine allzu großen Effizienzgewinne erwarten können oder sogar Nachteile zu befürchten haben, wie z. B. erhöhte Transparenzpflichten (Zwiehler/Spreitzer 2019). Zu beachten ist, dass sich die hauptsächlichen Potenziale von BIM erst auf der Gesamtprojektebene zeigen und gerade in der Planungsphase mit einem deutlichen Mehraufwand zu rechnen ist. BIM ist deshalb besonders in jenen Ländern weit verbreitet (z. B. Großbritannien), in denen Totalübernehmer den Markt dominieren (Borrmann et al. 2018, S. 49). Große Bauunternehmen, die Planung und Ausführung selbstständig gestalten, profitieren besonders von der Durchgängigkeit an Informationen und der Bereitstellung aller Gewerkinformationen innerhalb eines digitalen

Modells. Hier besteht ein genuines Eigeninteresse an der durch die Digitalisierung entstehenden Effizienzsteigerung, was bei KMU oft nicht im selben Maße der Fall ist. Letztere verfügen in der Regel auch über geringere finanzielle und organisatorische Ressourcen, sodass ihnen die Umstellung auf BIM naturgemäß schwerer fällt.

Die kritische Frage von Dainty et al. (2017), ob sich durch die Verbreitung von BIM eine digitale Kluft zwischen den großen Baukonzernen und den KMU auftut, ist deshalb berechtigt, bislang aber kaum wissenschaftlich untersucht worden und eine eindeutige Antwort lässt sich angesichts der heterogenen Struktur des Baugewerbes und der beteiligten Firmen auch kaum geben. Bislang liegen nur wenige, fast ausschließlich internationale Untersuchungen zur BIM-Adoption von KMU vor (Hosseini et al. 2016; Lam et al. 2017; Poirier et al. 2015; Vidalakis et al. 2020). Diese zeigen relativ konsistent, dass BIM vor allem unter KMU noch auf größere Zurückhaltung stößt. Für Deutschland werden diese Befunde zumindest durch eine vorliegende Befragung gestützt, wonach »Unsicherheit gerade bei KMU über Kosten, Hindernisse und Potenziale [...] den flächendeckenden, unternehmensübergreifenden Einsatz der BIM-Methode« erschweren (Butz/Burcu 2016, S. 15). Neben einer unternehmensinternen Digitalisierungsstrategie (Krüger 2018) benötigen KMU deshalb – über verbindliche politische Vorgaben hinaus – geeignete Rahmenbedingungen, um die Potenziale von BIM nutzen zu können (Dainty et al. 2017; Poirier et al. 2015). Dazu gehören u. a. Beratungsmöglichkeiten (inklusive Best-Practice-Leitfäden, wie z. B. von Helmus et al. 2018), Weiterbildungs- und Schulungsangebote sowie klare Richtlinien und Standards (etwa für die Prozessgestaltung), an denen sie sich orientieren können (Butz/Burcu 2016, S. 15).

3.3.2 Paradigmenwechsel in der Planungs- und Baukultur?

Während Spezifika der Bauwirtschaft (relativ niedrige Produktivität, hoher Anteil an KMU) in vielen westlichen Ländern mit der Situation in Deutschland vergleichbar sind, gibt es bei der BIM-Einführung insbesondere für den Wohnungsbau eine deutsche Besonderheit zu beachten: die strenge Trennung von Planung und Ausführung (Kasten 3.4). Dieses Modell weist den Architekt/innen eine herausgehobene Stellung im Planungs- und Bauprozess zu, da ihnen die »mit der Objektplanung verbundenen Koordinations- und Integrationsaufgaben« obliegen (BAK o. J., S. 6). Hingegen kommt den beauftragten Bauunternehmen eine rein ausführende und damit nachgeordnete Rolle zu (Pacher 2018).

Kasten 3.4 Der Imperativ der Trennung von Planung und Ausführung in Deutschland

Der Grundsatz, dass Planung und die Vergabe für Bauleistungen eines Gebäudes unabhängig von den Lieferinteressen von Bauproduktherstellern oder am Bau agierender Unternehmen stattfinden sollen – und zwar zum Vorteil des Auftraggebers –, reichen bis in die 1880er Jahre zurück (Wehrle 2018). Bis heute ist die Trennung von Planung und Ausführung mit der losweisen Vergabe von Planungs- und Ausführungsleistungen ein unumstößliches Leitprinzip des deutschen Vergabewesens. Dabei stehen verschiedene rechtliche Regelungen (VOB⁴³, VOL⁴⁴ VgV⁴⁵, HOAI⁴⁶) nebeneinander, die aufeinander abgestimmt sind und sich aufeinander beziehen.

Nach der VOB sind Bauleistungen in der Menge (Teillöse) aufgeteilt und nach der Art der Fachgebiete (Fachlöse) getrennt zu vergeben. So müssen Bauleistungen im Vergabeverfahren nach § 7 Abs. 1 Nr. 1 VOB/A⁴⁷ »eindeutig und [...] erschöpfend« beschrieben werden und zudem nach § 7b Abs. 1 VOB/A »durch eine allgemeine Darstellung der Bauaufgabe (Baubeschreibung) und ein in Teilleistungen gegliedertes Leistungsverzeichnis« definiert werden. Das setzt voraus, dass die Planungsphase (zumindest für die zu vergebenden Bauleistungen) vor Beginn der Vergabe abgeschlossen ist – sie wird damit in der Konsequenz strikt von der Ausführungsphase getrennt (Uhlendorf 2017, S. 2). Dahinter steht die Prämisse, dass die Planung und die Vergabe für Bauleistungen eines Gebäudes unabhängig von den Lieferinteressen von Bauproduktherstellern oder am Bau agierender Unternehmen stattfinden sollen. In § 3 Abs. 6 der VgV wird ebenfalls ausdrücklich klargestellt, dass Bau- und Planungsleistungen nicht gemeinsam vergeben werden müssen. Auch die

⁴³ Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB)

⁴⁴ Vergabe- und Vertragsordnung für Leistungen (VOL)

⁴⁵ Verordnung über die Vergabe öffentlicher Aufträge (Vergabeverordnung – VgV)

⁴⁶ Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure – HOAI)

⁴⁷ Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen Teil A (VOB/A)

HOAI basiert auf diesem Grundprinzip. Sie beinhaltet die Trennung der Vergütungen für Planung/Beratung einerseits und der Bauausführungskosten andererseits.

Zwischen Architekt/innen und den bauausführenden Unternehmen in Deutschland besteht auf dieser Rechtsgrundlage seit längerem ein Disput in diesem Kontext bezüglich Kompetenzen, Verantwortung, Wettbewerb und Haftung (Haberle/Stimpel 2016). Strittig ist insbesondere die Verantwortung für die Ausführungsplanung, die Bauunternehmen, welche eine Generalunternehmervergabe bevorzugen, einfordern.⁴⁸ Insbesondere bauausführende Unternehmen sehen die »starke Fragmentierung und Trennung von Planung und Ausführung« als Ursache für Schnittstellenprobleme und erhebliche Reibungsverluste und fordern ein stärker kooperatives Vorgehen und eine viel frühere Einbindung bereits bei der Genehmigungsplanung, wobei BIM hier als wichtiges Hilfsmittel gesehen wird (HDB 2020; Stange 2020, S. 10 f.). Demgegenüber führt die Architektenkammer die Gesamtverantwortung und Haftung der Planer/innen gegenüber den Bauherr/innen für das Gesamtwerk an und beharrt auf der strikten Trennung zwischen Planung/Überwachung einerseits und der reinen Ausführung andererseits (Haberle/Stimpel 2016).

Alternativ bieten sich die im Ausland praktizierten Bauabwicklungsformen an, die unter dem Oberbegriff »Partnerschaftliches Bauen« zusammengefasst werden können, in denen sich alle Projektbeteiligten auf öffentlicher und privater Seite auf Augenhöhe begegnen. Ein bemerkenswertes Beispiel stellt das australische »Project Alliance« dar, bei dem ein einziger Mehrparteienvertrag zwischen Bauherr/innen, Planer/innen, Architekt/innen und Bauunternehmen geschlossen wird. In Australien realisiert die öffentliche Hand mittlerweile jedes dritte Bauprojekt per »Project Alliance«. Einen ebenfalls partnerschaftlichen Ansatz verfolgen die angelsächsische Variante »Design & Build« oder das niederländische »Bauteamverfahren«. Diese umfassen ebenso Projektteams aus Planer/innen und Ausführer/innen, die sich in der ersten Planungsphase mit den Bauherr/innen gemeinsam besprechen. Damit soll in diesem frühen Stadium bereits eine Kostensicherheit von 90 bis 95 % erreicht werden.

Eine strikte inhaltliche Trennung von Planung und Bauausführung läuft der Kernidee der BIM-Methode zuwider, die einen integralen Planungsprozess unter Einbezug möglichst aller Projektbeteiligten vorsieht. Gerade auch das spezifische fachliche Know-how der ausführenden Firmen wäre bei der Arbeit am digitalen Gebäudemodell gefragt (Pacher 2018). Inwiefern die bestehenden Planungsstrukturen mit BIM vereinbar sind, wird deshalb schon seit einiger Zeit kontrovers diskutiert, wobei die hauptsächlichen Konfliktlinien zwischen den Vertreter/innen der Bauindustrie auf der einen Seite und den Architektenkammern auf der anderen Seite verlaufen (Kasten 3.4).

In diesem Zusammenhang steht neben der VOB vor allem auch die HOAI im Fokus. Diese ist zwar methodenneutral, sieht jedoch eine prozentual festgeschriebene Honorierung eines Planungsauftrags nach sequenziellen, aufeinanderfolgenden Leistungsphasen vor (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 74, 125 f. u. 214 f.). Bei Anwendung der BIM-Arbeitsmethode ist durch die frühzeitige modellbasierte Arbeit mit einem erhöhten Aufwand besonders in den ersten drei Leistungsphasen zu rechnen, welcher nicht durch die Grundleistungen ausreichend honoriert werden kann. Seit der letzten HOAI-Novelle 2013 ist es möglich, BIM-bezogene Arbeiten als »Besondere Leistungen« frei zu vergüten (BAK o. J.). Dafür ist jedoch erforderlich, dass der Auftraggeber im Vorfeld alle wesentlichen Informationen bzw. Grundlagen zur Abschätzung der zu erbringenden Leistung in den AIA klar definiert. Das kann wie ein methodisch bedingter Mehrkostenbeitrag wirken, der zusätzlich zur Projekterstellung zu leisten ist. Konkret bedeutet dies, dass die HOAI grundsätzlich kein unüberwindbares Hindernis für die Anwendung der Methode darstellt, allerdings auch nicht gerade als BIM-fördernd gilt – entsprechend wird immer wieder eine grundlegende Reform der HOAI angemahnt (Eschenbruch/Malkwitz 2014, S. 30).

Die Regulierung der Honorare der Planung durch eine staatliche Verordnung, wie sie in Deutschland mit der HOAI vorliegt, hat in Europa eher Ausnahmecharakter. Nur in wenigen europäischen Ländern existiert eine bindende Honorarordnung der Architekt/innen und Planer/innen. In zahlreichen Ländern sind empfehlende Vorgaben als mehr oder weniger bindende Richtlinie üblich, z. T. sind diese Empfehlungen, wie z. B. in Frankreich,

⁴⁸ Bei Großprojekten, wie z. B. Flughäfen, Großbahnhöfen, und Bauvorhaben mit festgelegten Bausystemen wird seit vielen Jahren die strikte Trennung von Planung und Bauausführung nicht mehr eingehalten. Große Unternehmen bearbeiten den Markt auch mit dem Leistungsbild eines Generalunternehmers, die Leistungspakete (aus einer Hand) anbieten. Jedoch erfolgt selbst bei einer Bündelung der unterschiedlichen Planungsleistungen und Bauleistungen in einer Vergabeeinheit die eigentliche Bauausführung, d. h. die eigentliche Leistungserbringung für das Bauwerk, nach Fachdisziplinen bzw. Leistungsbereichen getrennt.

bei öffentlichen Aufträgen verpflichtend. Für den privaten Bereich sind dort jedoch solche verpflichtenden Vorgaben untersagt. In der Folge hat die EU-Kommission die Bundesrepublik Deutschland beim Europäischen Gerichtshof (EuGH) verklagt, weil sie die verbindliche HOAI aufrechterhält. In seinem Urteil vom 4. Juli 2019 hat der Gerichtshof der Europäischen Union (EuGH 2019) entschieden, dass die Regelungen zu Höchst- und Mindestpreisen in der deutschen HOAI dem EU-Recht widersprechen. Bei ihrer Entscheidung stützten die Richter sich auf die 2006 verabschiedete Richtlinie 2006/123/EG⁴⁹, die vorsieht, dass grundsätzlich im freien europäischen Binnenmarkt der Wettbewerb auch über den Preis möglich sein muss. Die deutschen Argumente, dass durch die geregelten Mindest- und Höchstsätze Qualitätsstandards und der Verbraucherschutz gesichert werden, ließen die EU-Richter nicht gelten. Die Architektenkammer beharrt dennoch weiterhin auf der Rechtslage einer (angepassten) Honorarordnung.

Weitere rechtliche Fragen im Zusammenhang mit BIM betreffen u. a. das Urheber- sowie das Haftungsrecht (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 213 f.):

- › Durch die kooperative Arbeit an einem gemeinsamen digitalen Modell stellt sich die Frage, ob durch BIM »die Haftungsgrenzen verwischen« und somit Unklarheit entstehen könnte, wer die Verantwortung für etwaige Fehler zu tragen hat (Eschenbruch/Malkwitz 2014, S. 69; Stange 2020, S. 243). Grundsätzlich ist es so, dass BIM-Planungs- und Managementleistungen in der Regel dem Werkvertragsrecht unterliegen. Das BIM-Modell gilt als eigenständiger Teilwerkerfolg und ist somit Gegenstand der Abnahme. Planungsbeiträge haften demzufolge für Mängel innerhalb ihrer im Werkvertrag geschlossenen Pflichten und sind weiterhin für die abgesprochene Leistung verantwortlich (Eschenbruch/Malkwitz 2014, S. 70; Liebich et al. 2018, S. 43 f.). Sollten gemeinsame Pflichtverletzungen auftreten, kann eine gesamtschuldnerische Haftung in Betracht kommen. An dem bisherigen Haftungsmodell ändert sich also prinzipiell nichts und es sind auch keine gesetzlichen Anpassungen erforderlich. Um Haftungsprobleme zu vermeiden, sind aber detaillierte vertragliche Absprachen zu treffen – beispielsweise zu Verantwortlichkeiten und Zuständigkeiten, zu Projektabläufen und -zielen, zu technischen Voraussetzungen sowie Detaillierungsgraden der Planungen (Wer liefert welche Informationen wann und zu welchem Zeitpunkt sowie in welcher Qualität? Wer haftet für deren Richtigkeit?). Zusätzlich ist aus haftungsrechtlicher Sicht zu prüfen, wie die traditionellen Zweiparteienvträge um innovative Vertragsgestaltungen erweitert werden können, wie sie beispielsweise aus dem angloamerikanischen Bereich mit Mehrparteivträgen und »Integrated Project Delivery« bekannt sind (Przerwok 2018).
- › Grundsätzlich sind architektonische Leistungen gemäß § 2 Abs. 1 Nr. 4 Urheberrechtsgesetz (UrhG)⁵⁰ urheberrechtlich geschützt, sofern sie eine gewisse Schöpfungshöhe aufweisen. Inwiefern dies auch für das Gebäudeinformationsmodell gilt, ist umstritten (BAK o.J. S. 81 f.; Thiel 2017). Urheberrechtliche Fragen stellen sich insbesondere dann, wenn mehrere Beteiligte am Modell gearbeitet haben, wie es ja für BIM typisch ist. In einem solchen Fall kommt eine Miturheberschaft nach § 8 UrhG für diejenigen in Betracht, die einen eigenen schöpferischen Beitrag geleistet haben. Alle Beteiligten sind dann Miturheber des Werkes, unabhängig vom konkreten Umfang ihres Beitrags. Auch hier empfehlen sich klare vertragliche Absprachen, um die »urheberrechtlich relevanten (Teil-)Leistungen im BIM-Gesamtleistungspaket genau« zu regeln (Thiel 2017). Üblicherweise gehen die mit dem Urheberrechtsschutz verbundenen Nutzungsrechte am digitalen Gebäudemodell nach Abschluss der Planungsleistungen und Bezahlung des vereinbarten Honorars auf den Auftraggeber über. Bei Beauftragungen von Teilleistungen oder der vorzeitigen Beendigung eines Vertrags kann es aber zu juristischen Streitfällen kommen (Eschenbruch/Malkwitz 2014, S. 75). Handlungsbedarf besteht dahingehend, die Nutzungsrechte für weitere Nutzungen des Gebäudeinformationsmodells für z. B. das Facility-Management generell sicherzustellen.

Insgesamt ist also festzuhalten, dass BIM in Deutschland keine grundsätzlichen rechtlichen Hürden im Wege stehen – die meisten juristischen Konfliktpotenziale lassen sich auf vertraglicher Ebene lösen. Insofern ist nicht ganz richtig, dass BIM »eine konsequente Abkehr von der strikten Trennung von Planung und Bau« erfordert und es »zu einer neuen Rollenverteilung« zwischen planenden Architekt/innen und ausführenden Firmen kommen muss, wie Pacher (2018) meint. BIM ist durchaus mit den Spezifika der deutschen Planungs- und Baukultur vereinbar. Allerdings setzt diese der kooperativen Arbeitsweise relativ enge Grenzen, sodass sich die Potenziale der Methode unter Umständen nicht vollumfänglich nutzen lassen.

⁴⁹ Richtlinie 2006/123/EG über Dienstleistungen im Binnenmarkt

⁵⁰ Gesetz über Urheberrecht und verwandte Schutzrechte (Urheberrechtsgesetz – UrhG)

3.4 Produktivitätssteigerung durch BIM – Stand des Wissens

Die in Kapitel 3.1.2 dargelegten Vorteile von BIM, insbesondere die positiven Auswirkungen auf die Effizienz und Produktivität von Bauvorhaben, sind vielfach postuliert und beschrieben, jedoch noch kaum empirisch untersucht worden. In Deutschland hat die wissenschaftliche Evaluation der im Zuge des BMVI-Stufenplans »Digitales Planen und Bauen« durchgeführten Pilotvorhaben zwar grundsätzlich positive Einschätzungen ergeben. Für den Schienenwegebau etwa sind »alle Voraussetzungen vorhanden, um Effizienzsteigerungen in den Planungs- und Bauprozessen realisieren zu können«, so die Feststellung der ARGE BIM4RAIL (2019, S. 7). BIM wirkt sich ihnen zufolge positiv auf die Realisierung von Projekten aus und bringt qualitativ bessere, mindestens aber gleichwertige Ergebnisse hervor. Allerdings ist ein exakter »Vergleich zwischen der konventionellen Herangehensweise und der Anwendung BIM-gestützter Methoden hinsichtlich Effizienz, Qualität etc.« aufgrund des geringen BIM-Reifegrades dieser Projekte und der nicht durchgängigen BIM-Verwendung noch nicht möglich (BMVI 2017, S. 13). Somit bewegen sich die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse aus der Umsetzung des Stufenplans vornehmlich auf einer relativ allgemeinen qualitativen Ebene und beziehen sich zudem, was hervorzuheben ist, ausschließlich auf Großprojekte im Infrastrukturbereich. Auch die meisten internationalen Studien beschränken sich auf eine qualitative Herleitung des BIM-Nutzens, zumeist auf Basis von Nutzerbefragungen (Stange 2020, S. 23).⁵¹ Festzustellen ist somit, dass die in Kapitel 3.1.2 dargelegten Potenziale von BIM bislang nur unzureichend anhand von tatsächlichen Projektdaten verifiziert worden sind.

Die Frage, wie sich BIM konkret auf die Produktivität und die Kostenstruktur eines Bauprojekts auswirkt, ist gerade für KMU wichtig. Denn diese benötigen möglichst exakte quantitative Abschätzungen zu den Kosten-Nutzen-Effekten der BIM-Anwendung, um fundiert beurteilen zu können, ob bzw. unter welchen Bedingungen sich der Umstieg auf BIM auch angesichts der hohen Implementierungskosten für sie rentiert (Barlish/Sullivan 2012). Wie bereits bemerkt, sind Forschungen dazu bislang Mangelware. Das hat vor allem auch methodische Gründe:

- › Um den Einfluss des BIM-Einsatzes auf die Projektleistung messbar zu machen, werden für die wichtigen Projektzielgrößen Zeit, Kosten und Qualität geeignete Indikatoren benötigt. Wie in Kapitel 2.2 dargelegt wurde, erscheint der Produktivitätsbegriff dafür nur bedingt geeignet, da er zu unscharf und nicht konsistent definiert ist. Vor diesem Hintergrund entwickelten Barlish und Sullivan (2012) anhand von Fallstudien eine gemeinsame Metrik (»common metrics«), um BIM-bezogene Kosten-Nutzen-Effekte mess- und evaluierbar zu machen. Als relevante Kennzahlen für die Bewertung des BIM-Nutzens wurden demnach identifiziert: die Anzahl der Änderungsaufträge sowie der Informationsanfragen und Auswirkungen auf den Zeitplan. Diese Informationen werden von den projektverantwortlichen Unternehmen jedoch oft als sensible Geschäftsdaten behandelt und nicht offengelegt, was die wissenschaftliche Evaluation von BIM deutlich erschwert (Parvan 2012, S. 12).
- › Bauprojekte sind von komplexen Zusammenhängen und vielen Einflussfaktoren bestimmt (Projektgröße und -organisation; Anzahl, Kompetenzen und Erfahrung der Beteiligten; rechtliche, technische und örtliche Rahmenbedingungen). Jedes Bauvorhaben ist damit einzigartig. Untersuchungen, die den Einfluss der BIM-Methode anhand von Einzelprojekten evaluieren, sind deshalb nicht verallgemeinerbar und ihre Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf andere Projekte übertragbar. Um eine wissenschaftlich exakte Bewertung zu ermöglichen, wäre ein systematischer Vergleich von repräsentativen BIM- und Nicht-BIM-Projekten unter analogen Rahmenbedingungen erforderlich. Aufgrund der Heterogenität von Bauprojekten und der Tatsache, dass diese (bis auf wenige Ausnahmefälle) entweder mit oder ohne BIM durchgeführt werden, ist eine derartige Vorgehensweise nicht möglich.
- › Verallgemeinerbare Aussagen zu BIM-Effekten sind zudem nur möglich, wenn Stichproben betrachtet werden, die repräsentativ sind für bestimmte typische Projektmerkmale (z. B. Größe, regionale Verortung, Objekttyp etc.). Die BIM-Methode ist jedoch in der Baupraxis noch nicht wirklich angekommen. Aufgrund der begrenzten Zahl an BIM-Projekten und der oft nicht verfügbaren Projektdaten stoßen quantitative Forschungen deshalb schnell an enge methodische Grenzen.

⁵¹ Siehe die Ergebnisse der Onlineumfrage, die im Rahmen des FUCON-4.0-Forschungsprojekts durchgeführt wurde (Kap. 3.2): »Fast die Hälfte der BIM-Nutzer bestätig[t] eine bessere und transparentere Kommunikation im Planungs- und Bauprozess sowie ein bessere Kostenkalkulation und Projektcontrolling. Auch herrscht generell eine größere Datengenauigkeit und Mehrfacheingaben entfallen. Im Allgemeinen können Projekte besser geplant werden, finden 40% der Teilnehmer« (Braun et al. 2015, S. 26).

Aufgrund dieser Schwierigkeiten handelt es sich bei den meisten quantitativen Untersuchungen zu den BIM-Potenzialen um nichtrepräsentative Fallstudien, in denen einzelne, wenige Projekte betrachtet wurden. Die Ergebnisse der wichtigsten Studien aus den letzten 15 Jahren sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tab. 3.1 Ergebnisse quantitativer Untersuchungen zu BIM-Potenzialen

Quelle	Region, Zeitraum	Untersuchungsmethode	Art und Größe der Stichprobe	Untersuchungsfrage	wesentliche Ergebnisse
Becerik-Gerber/ Rice 2010	USA, 2009	schriftliche Befragung	424 Teilnehmer/innen, primär Architekt/innen und Ingenieur/innen	wahrgenommene Rentabilität von BIM	Reduktion der Projektkosten um 50 % bei 50 % der Befragten (hingegen: bei 12 % Steigerung der Kosten um bis zu 50 %) Reduktion der Gesamtdauer des Projekts um bis zu 50 % bei 58 % der Befragten (hingegen: bei 10 % Steigerung der Gesamtdauer um bis zu 50 %)
Chelson 2010	USA, 2005–2009	schriftliche und mündliche Befragung; Fallstudienanalyse	47 BIM-Nutzer/innen, primär Generalunternehmer; 8 Unternehmen	Einfluss der BIM- Anwendung auf die Produktivität von Bauprojekten	Reduktion der Informationsanfragen um 90 % deutliche Reduktion von Nacharbeiten während der Bauphase drastische Reduktion von Änderungsaufträgen während der Bauphase Reduktion der Projektkosten um 4 bis 7 %
Azhar 2011	USA, 2005–2007	Fallstudienanalyse	10 Projekte eines Bauunternehmens	Analyse des ROI von BIM	Variation des BIM-ROI ³ von 140 bis 39.900 %

Quelle	Region, Zeitraum	Untersuchungsmethode	Art und Größe der Stichprobe	Untersuchungsfrage	wesentliche Ergebnisse
Barlish/ Sullivan 2012	k. A.	Fallstudienanalyse	4 abgeschlossene Projekte (2 Nicht-BIM, 2 BIM) eines Unternehmens aus dem industriellen Umfeld	Entwicklung einer Methodik zur Analyse des BIM-Nutzens und deren Anwendung auf neuere Projekte	Vorteile durch BIM (BIM vs. Nicht-BIM-Projekte): Anzahl Informationsanfragen: 3 weniger Kosten durch Änderungsaufträge: 5 % Reduktion ¹ Projektdauer: 10 % Reduktion ²
Parvan 2012	k. A.	modellbasierter Ansatz, Experteninterviews	10 teilnehmende Expert/innen (Architekt/innen, Fachplaner/innen, Bauunternehmer/innen etc.) für die Parametrisierung des Modells	Simulation der Lieferkette im Planungs- und Bauprozess mit und ohne BIM-Anwendung	Verbesserung durch BIM-Anwendung: Planungszeit: 30 % Bauzeit: 10 % Planungskosten: 8 % Gesamtprojektkosten: 4 %
Bryde et al. 2013	global, 1987–2013	Fallstudienanalyse	35 abgeschlossene internationale Bauprojekte unterschiedlicher Größe und unterschiedlichen Typs mit BIM-Anwendung; davon die Hälfte aus den USA	Analyse der BIM-Vorteile auf Basis von publizierten Sekundärdaten	berichtete Effekte von BIM: Kosten: 60 % (21 Projekte) positiv, 6 % (2 Projekte) negativ Projektdauer: 34 % (12 Projekte) positiv, 9 % (3 Projekte) negativ Kommunikation: 37 % (13 Projekte) positiv, 0 % negativ Qualität: 34 % (12 Projekte) positiv, 0 % negativ
Giel/Issa 2013	k. A.	Fallstudienanalyse	3 Fallstudien mit jeweils 2 vergleichbaren Projekten (1 mit und 1 ohne BIM) eines mittelgroßen Bauunternehmens	Analyse des ROI von BIM auf Basis archivierter Projektunterlagen	ROI ³ : 16 bis 1.653 % Reduktion von Informationsanfragen (BIM zu Nicht-BIM): 34 bis 68 % Reduktion von Änderungsaufträgen (BIM zu Nicht-BIM): 37 bis 40 %

Quelle	Region, Zeitraum	Untersuchungsmethode	Art und Größe der Stichprobe	Untersuchungsfrage	wesentliche Ergebnisse
Stowe et al. 2015	global, k. A.	Expertenwork-shops, Fallstudienanalyse	35 Workshops in 8 Ländern, alle Disziplinen vertreten	Bewertung des ROI von »Big-BIM«-Projekten (Anwendung von BIM bei allen Beteiligten)	Einsparungen durch BIM von bis zu 10% der Gesamtprojektkosten möglich; ROI steigt mit der Zahl der BIM-Nutzer/innen im Projekt
Kelly/Ilozor 2016	USA, k. A.	statistische nichtrepräsentative Datenanalyse	13 Variablen aus 93 gewerblichen Bauprojekten eines einzelnen Unternehmens	Zusammenhang zwischen BIM-Einsatz und diversen projektbezogenen Leistungsdaten	keine signifikanten Leistungseffekte (Zeit, Anzahl Informationsanfragen, Mängel) bei BIM-Projekten nach Kontrolle der Einflüsse aller übrigen unabhängigen Variablen
Smits et al. 2017	Niederlande, 2014	schriftliche Befragung	890 niederländische Expert/innen (Architektur, Ingenieurwesen, Bau und Betrieb)	Auswirkungen der organisatorischen BIM-Erfahrung auf BIM-Implementierung und Unternehmensleistung (Zeit, Kosten und Qualität)	Reife der BIM-Implementierungsstrategie einziger zuverlässiger Prädiktor für Unternehmensleistung; Ergebnis legt nahe, dass Einfluss der BIM-Reife auf Projektergebnisse eher begrenzt ist
Stange 2020	global, 2018/2019	statistische, als repräsentativ bezeichnete Datenanalyse	Primärdaten aus 105 internationalen Bauprojekten unterschiedlicher Größe und Kategorie sowie unterschiedlichen Typs	Potenziale der BIM-Anwendung im Planungs- und Bauprozesse unter besonderer Berücksichtigung des projektbezogenen BIM-Reifegrades	keine nennenswerte Steigerung der Produktivität durch BIM im Planungs- und Bauprozess; Befunde deuten darauf hin, dass dafür die insgesamt relativ geringen BIM-Reifegrade in den Projekten verantwortlich sind

1 in % der Gesamtprojektkosten

2 in % hinter dem prognostizierten Zeitplan

3 Verhältnis von Nettoeinsparungen zu Kosten

Eigene Zusammenstellung angelehnt an Stange 2020, S. 351 ff.

Mehrheitlich zeigen sie positive Effekte eines BIM-Einsatzes und zwar hinsichtlich auf Qualität, Zeit und Kosten von Bauprojekten. Als wichtige Kennzahlen für die Qualität des Planungsprozesses gilt die Anzahl der Änderungsaufträge und der Informationsanfragen in einem Projekt – in mehreren Studien wird hier von einer teils deutlichen Reduzierung im Zuge der BIM-Anwendung berichtet (Barlish/Sullivan 2012; Chelson 2010; Giel/Issa 2013). Was Planungs- und Bauzeit anbelangt, wurde ebenfalls in vielen Untersuchungen eine Verbesserung konstatiert (Barlish/Sullivan 2012; Becerik-Gerber/Rice 2010; Bryde et al. 2013; Chelson 2010); mithilfe eines modellbasierten Ansatzes schätzt Parvan (2012), dass sich die Planungszeit durch BIM um 30 %, die Bauzeit um 10 % und die Gesamtprojektzeit um 16 % verbessern lassen (vor allem in Verbindung mit modularem Bauen; Kap. 5). Da Qualitätsmängel und Zeitüberschreitungen als die größten Kostentreiber von Bauvorhaben gelten, liegt nahe, dass BIM – sollten sich die positiven Auswirkungen auf Planungseffizienz und -qualität sowie Projektdauer bestätigen – auch die Kosten von Bauprojekten zu senken vermag. Die Studienlage liefert dafür erste Indizien: So sind laut Stowe et al. (2015) bei den Gesamtprojektkosten Einsparungen von bis zu 10 % möglich, ein Ergebnis, das durch andere Untersuchungen im Großen und Ganzen gestützt wird (Barlish/Sullivan 2012; Becerik-Gerber/Rice 2010; Chelson 2010; Parvan 2012). Giel und Issa (2013) kommen anhand von drei Projektfallstudien zu dem Schluss, dass der Return of Investment (ROI) von BIM⁵² jeweils positiv ausfällt, jedoch von Projekt zu Projekt sehr stark variiert.

Die Aussagekraft dieser Ergebnisse muss jedoch aus den bereits erwähnten methodischen Gründen mit einiger Vorsicht betrachtet werden. Da die entsprechenden Studien nur auf kleinen Stichproben oder Einzelfallanalysen beruhen, sind sie mit größeren Unsicherheiten behaftet und nicht verallgemeinerbar. Wichtige Einflussfaktoren wie Projektgröße und -typ oder BIM-Reife wurden in der Regel nicht differenziert betrachtet. Und insgesamt ist die Studienlage auch nicht einheitlich, sondern es gibt durchaus Forschungsarbeiten, welche das positive Bild nicht bestätigen. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass gerade die beiden quantitativ umfangreichsten Untersuchungen zu abweichenden Resultaten kommen:

- › Kelly und Ilozor (2016) untersuchten anhand von 93 abgeschlossenen Bauprojekten (primär Gewerbebauten) eines Bauunternehmens aus den USA erstmals systematisch die Wechselwirkungen zwischen bestimmten Projektleistungsergebnissen (Kosten- u. Zeituwachs, Mängel- u. Informationsanfragenverhältnis) und der BIM-Nutzung. In die statistische Analyse wurden auch unabhängige Kontrollvariablen wie die Bereitstellungsmethode, die geografische Region, die Bruttofläche, die Geschosshöhe, der Projekttyp sowie die baubegleitende Planung einbezogen. Das Ergebnis: Bei einem Konfidenzniveau von 95 % waren nach Kontrolle des Beitrags anderer unabhängiger Variablen keine signifikanten Unterschiede zwischen BIM- und Nicht-BIM-Projekten festzustellen (bezüglich Kosten- und Zeituwachs, Mängel- und Informationsanfragenverhältnis). Bei einem Konfidenzniveau von 90 % verzeichneten die BIM-Projekte sogar ein deutlich höheres Zeitplanwachstum als Nicht-BIM-Projekte. Da die Daten fast alle von einem einzigen Bauunternehmen stammen, ist die Studie allerdings nicht repräsentativ für die Bauindustrie.
- › Stange (2020) überprüfte die qualitativ hergeleiteten Verbesserungspotenziale von BIM anhand von realen Projektdaten im globalen Kontext. Unter anderem wurden mithilfe einer Onlinebefragung Primärdaten aus 105 internationalen Bauprojekten aus verschiedenen Bereichen (Wohnungsbau, Gewerbebau, Industriebau, Infrastruktur- und Wasserbau) und verschiedener Größe gesammelt und anschließend hypothesengeleitet und unter besonderer Berücksichtigung des BIM-Reifegrads analysiert.⁵³ Die Stichprobe wird als repräsentativ bezeichnet. Im Großen und Ganzen konnte die Studie – trotz vereinzelt positiver, aber nichtsignifikanter Ergebnisse wie u. a. einer Verminderung der Häufigkeit von Nacharbeiten – keine substanziellen »Verbesserungspotenziale durch die Anwendung von BIM im Planungs- und Bauprozess« belegen (Stange 2020, S. XIII ff.). Insbesondere wurde kein nennenswerter Einfluss von BIM auf die Produktivität im Planungs- und Bauprozess festgestellt. Der Autor führt diesen Umstand auf die geringe BIM-Reife der untersuchten Projekte zurück.

Auf Basis der vorliegenden Studien ist keine eindeutige Bewertung der Kosten-Nutzen-Effekte der BIM-Anwendung möglich. Es gibt zwar etliche Hinweise, dass BIM sich im Einzelnen positiv auf relevante Projektleistungsdaten (Anzahl Informationsanfragen und Änderungsaufträge sowie erforderliche Nacharbeiten; Planungs- und

⁵² In diesem Fall definiert als $(\text{Gewinne der Investition} - \text{Kosten der Investition}) \times 100 / \text{Kosten der Investition}$.

⁵³ Die betrachteten unabhängigen Variablen waren: Soll-Ist-Abweichungen der Planungs- und Bauzeit, Häufigkeit von Mehrfacheingaben infolge rückwirkender Planungsänderungen, Häufigkeit von Nacharbeiten infolge Planungsfehlern und Auslassungen, Anzahl der Informationsanfragen und der Änderungsaufträge.

Bauzeit etc.) auswirken kann. Angesichts der Heterogenität der Bauprojekte und der Vielzahl (teils schwer quantifizierbarer menschlicher) Faktoren, die sich auf den BIM-Erfolg auswirken – vor allem BIM-Reife, Projektgröße, Kompetenzen der Beteiligten, diverse kommunikative und organisatorische Aspekte (Barlish/Sullivan 2012) –, fehlt es bislang an ausreichend differenzierten Forschungsarbeiten und an einer validen Bewertungsmethodik (Jung-Lundberg 2019). Der BIM-Erfolg ist nicht zuletzt auch deshalb schlecht bestimmbar, da die Vergleichsbasis, also die herkömmliche Planungsmethode, in keiner Weise standardisiert ist und deshalb sehr variable Ergebnisse aufweist. Forschungsarbeiten weisen zudem darauf hin, dass unterschiedliche Projektbeteiligte (Bauherr/in, Planer/in, Bauunternehmen) bezüglich der BIM-Vorteile zu sehr unterschiedlichen Einschätzungen kommen können (Bryde et al. 2013; CAO et al. 2017). Insgesamt drängt sich also der Schluss auf, dass der BIM-Nutzen nicht pauschal zu beurteilen, sondern stark von individuellen Gegebenheiten abgängig ist. Ein Hinweis dafür sind auch die in Fallstudienanalysen ermittelten exorbitant variierenden BIM-Investitionsrenditen (Azhar 2011; Giel/Issa 2013).

3.5 Fazit und Handlungsfelder

In BIM wird die Hoffnung gesetzt, durch einen integrierten Planungsprozess anhand eines digitalen Bauwerksmodells die Anzahl der Schnittstellen und Medienbrüche im Bauprozess reduzieren und so potenzielle Fehlerquellen und bestehende Ineffizienzen minimieren zu können. Voraussetzung für die Anwendung der BIM-Methodik ist die Vorverlegung von Planungsleistungen, da das Bauwerk erst komplett virtuell geplant und optimiert wird, bevor mit der Bauausführung begonnen wird. Neben dem Aufbau eines 3-D-Modells lassen sich mit BIM u. a. auch die zeitlichen Abläufe (4-D) simulieren und kostenbezogene Projektinformationen in die Planung integrieren. Davon verspricht man sich eine Reduktion der Planungs- und Ausführungszeiten (durch effizientere Steuerung der Prozesse), eine Erhöhung der Planungs- und Ausführungsqualität (u. a. durch genauere Planung und Vermeidung von Planungsfehlern mittels automatisierter Kollisionsprüfungen) sowie die Sicherung der kalkulierten Planungs- und Ausführungskosten (durch Ermöglichung einer detaillierteren Kostenplanung). Speziell mit Blick auf den Wohnungsbau sind zusätzlich die folgenden Potenziale hervorzuheben:

- › Indem theoretisch Informationen zu Fragen der *Nachhaltigkeit* hinterlegt und lebenszyklusorientiert analysiert werden können (z. B. Recyclingmöglichkeiten und Energieverbrauch von Bauteilen), könnte BIM perspektivisch eine verbesserte Ökobilanzierung bis hin zu einer automatisierten Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden ermöglichen (Kap. 7.2). Voraussetzung dafür ist das Vorliegen ausreichend verlässlicher und normierter Nachhaltigkeitsdaten von Bauprodukten (Wischniewski 2018).
- › BIM entfaltet seine Potenziale vor allem dann, wenn es auf den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes angewandt wird (z. B. Kostenoptimierung und Nachhaltigkeit). Insbesondere können im Modell bereits alle relevanten Informationen abgelegt werden, die für den *Betrieb des Gebäudes* benötigt werden. Dies ermöglicht passgenaue Wartungs- und Instandhaltungspläne und einen effizienteren Gebäudebetrieb (Díaz et al. 2019, S. 160). Außerdem können Umnutzungsmöglichkeiten bereits in der Entwurfsphase durch entsprechende Alternativplanungen vorbereitet werden. Dadurch kann BIM auch zu einer effizienteren Flächennutzung beitragen.
- › BIM eröffnet nicht nur neue Perspektiven für den Neubau, auch beim *Planen und Bauen im Bestand* ergeben sich Potenziale. So können bei der Betrachtung von Sanierungs- oder Modernisierungsmöglichkeiten eines Gebäudes unterschiedliche Varianten simuliert werden, um die optimalen Maßnahmen zu bestimmen (Díaz et al. 2019, S. 117). Angesichts der steigenden Bedeutung der Sanierungstätigkeit im Wohnungsbau ist dies eine attraktive Perspektive, die jedoch eine in der Regel relativ aufwendige Modellierung von Bestandsgebäuden voraussetzt (Westphal 2018).
- › BIM kann dazu beitragen, *serielles und modulares Bauen* voranzutreiben, das durch die weitreichende Automatisierung der Prozesse als besonders effizient gilt (Kap. 5). Bislang konnte diese Bauweise im Geschossbau in Deutschland nicht ausreichend Fuß fassen, was u. a. mit den hiesigen regulatorischen Beschränkungen, aber auch der relativ strikten Arbeitsteilung zwischen planenden und bauausführenden Unternehmen zu tun hat (Kurmman 2018). Genau beim letzten Punkt setzt BIM an, da die modellorientierte Arbeitsweise die frühzeitige Zusammenarbeit möglichst aller Beteiligten erfordert und damit eine der Hürden beseitigen hilft, die der seriellen/modularen Bauweise entgegenstehen (Lu/Korman 2010). Auch der Aufbau von umfangreichen Bauteilbibliotheken, wie bei BIM vorgesehen, kommt der modularen Bauweise entgegen (KLEUSBERG 2019).

- › Schließlich könnte BIM auch die *Digitalisierung der Baugenehmigungsverfahren* befördern helfen. Der wichtigste Punkt dabei ist die Etablierung der durchgängigen digitalen Baugenehmigung, die laut Beschluss auf dem »Wohngipfel« zusammen mit der »konsequente[n] Digitalisierung planungsrechtlicher und bauaufsichtlicher Verfahren« bundesweit gefördert werden soll (Bundesregierung 2018c, S. 11). Davon erhofft man sich beschleunigte und kostenoptimierte Genehmigungsverfahren besonders im Wohnungsbau (Díaz et al. 2019, S. 180 f.). BIM als digitale Planungsmethode könnte dabei eine zentrale Rolle spielen, da aus dem digitalen Gebäudemodell relevante Daten für die bauordnungsrechtliche Prüfung (Abstandsflächen, Brandschutzkonzept, Rettungswege, Öffnungen, Umwehrungen) weitgehend automatisiert abgeleitet werden können (Terfehr 2019).⁵⁴

Die erfolgreiche Anwendung der BIM-Methodik ist an diverse Voraussetzungen geknüpft: Dazu gehören standardisierte Schnittstellen und Datenaustauschformate wie IFC, um einen reibungslosen Datenverkehr zwischen den verschiedenen Beteiligten zu ermöglichen (»open BIM«). Da die neue Planungsmethode eine ganz neue, stärker kollaborativ ausgerichtete Herangehensweise an die Planung und Realisierung von Bauwerken bedingt, bedarf es vor allem möglichst verbindlicher Normen und Richtlinien, um die Prozesse zu harmonisieren und die Anwendung von BIM zu unterstützen. Aufseiten der einstiegswilligen Unternehmen ist zudem der Aufbau einer digitalen Infrastruktur nötig (Hard- und Software), vor allem aber die intensive Schulung des Personals zum Erwerb der erforderlichen BIM-Expertise, was mit erheblichen Investitionskosten einhergehen kann. Schließlich wird von allen Beteiligten die Bereitschaft verlangt, sich auf die Methodik und das kooperative Miteinander einzulassen (Jung-Lundberg 2019, S. 92; Pacher 2018). Die Umstellung auf BIM ist alles in allem weniger als ein technischer, sondern vielmehr als ein organisatorischer und kultureller Anpassungsprozess zu sehen, der Zeit braucht und angesichts der begrenzten Ressourcen vieler Unternehmen der Baubranche möglichst stufenweise erfolgen sollte.

Die vorliegenden Daten zeigen, dass Deutschland bei der BIM-Umsetzung anderen Industrieländern hinterhinkt. Verantwortlich dafür sind im Wesentlichen zwei Gründe:

- › Hinderlich ist die kleinteilige, mittelständisch geprägte Struktur des deutschen Bauwesens, bei der Kleinunternehmen mit rund 90 % den größten Anteil ausmachen und in den letzten Jahren den Löwenanteil des Branchenumsatzes erwirtschaftet haben. Erhebungen legen nahe, dass BIM bislang vor allem in Großprojekten eingesetzt wird und größere Unternehmen eine höhere Implementierungsbereitschaft haben;
- › Erschwerend wirkt zudem die strikte Trennung von Planung und Ausführung durch eine Vergabeordnung, welche verlangt, dass klar definierte Bauleistungen in Fach- und Teillose getrennt vergeben werden. Diese Vorgehensweise bedingt, dass die ausführenden Bauunternehmen in der Regel erst nach Abschluss des Planungsprozesses ins Spiel kommen (mit der Vergabe der Bauleistungen), was zu der eigentlichen BIM-Idee im Widerspruch steht, die einen *integralen Planungsprozess* unter Einbezug aller Projektbeteiligten vorsieht.

Im Vergleich zu anderen Ländern setzte die staatliche BIM-Förderung in Deutschland außerdem erst vergleichsweise spät ein, seit dem Start des BMVI-Stufenplans wurden mittlerweile aber zahlreiche Maßnahmen initiiert – darunter der »Branchendialog Digitaler Hochbau« (BMU/BMWi 2017), das BMI-Innovationsprogramm »ZukunftBau«⁵⁵ sowie die Gründung des Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrums Planen und Bauen⁵⁶ durch das BMWi und von BIM Deutschland⁵⁷ durch das BMVI und BMI. Alles in allem scheint sich die Bundesregierung förderpolitisch gleichwohl für eine eher vorsichtige Herangehensweise entschieden zu haben, um die mittelständische Planungs- und Bauwirtschaft nicht zu überfordern. Das zeigt sich etwa daran, dass im öffentlichen Hochbau im Unterschied zum Infrastrukturbau bislang keine verpflichtende Einführung der BIM-Methodik vorgesehen ist (Bundesregierung 2018a) – bei öffentlichen Bauvorhaben mit einem Volumen größer als 5 Mio. Euro ist der BIM-Einsatz lediglich zu prüfen.

Doch die Entwicklung eines Stufenplans für die schrittweise BIM-Einführung im Bundeshochbau – analog zum Infrastrukturbau, jedoch mit modifizierten Zielniveaus und Einführungsphasen – erscheint durchaus sinnvoll, nicht nur wegen der Vorbildfunktion des Bundes, sondern auch, um ein strategisches Vorgehen zu ermöglichen

⁵⁴ Siehe hierzu die Ergebnisse des 2020 abgeschlossenen Forschungsprojekts »BIM-basierter Bauantrag« (www.bimbauantrag.de/; 12.3.2021), in welchem sich mit der »Nutzung von BIM Modellen im Rahmen von bauordnungsrechtlichen Verwaltungsverfahren, insb. dem Bauantragsverfahren« befasst wurde (gefördert durch das BMU; BBSR/Zukunft Bau 2020).

⁵⁵ <https://www.bmi.bund.de/DE/themen/bauen-wohnen/bauen/bauwesen/innovationsprogramm-zukunft-bau/innovationsprogramm-zukunft-bau-node.html> (12.3.2021)

⁵⁶ <https://www.kompetenzzentrum-planen-und-bauen.digital/> (12.3.2021)

⁵⁷ <https://bimdeutschland.de/> (12.3.2021)

und KMU verlässliche Perspektiven zu geben. Angesichts der mittelständischen Struktur der deutschen Bauwirtschaft und der Tatsache, dass viele KMU noch nicht über die erforderlichen BIM-Kompetenzen verfügen, sollte eine BIM-Pflicht im Bundeshochbau allerdings mit ausreichendem Vorlauf vorbereitet werden. Andernfalls besteht die Gefahr, dass der Großteil der Unternehmen von der öffentlichen Vergabe ausgeschlossen ist und sich die digitale Spaltung der Unternehmenslandschaft vertieft. Wichtig ist deshalb, heute schon das Hauptaugenmerk der Unterstützungsaktivitäten auf die kleinen und mittleren Unternehmen zu legen, da diese letztlich der Schlüssel dafür sind, um BIM in Deutschland in die breite Praxis zu bringen. Dafür sind insbesondere folgende Handlungsfelder von Bedeutung (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 208 ff.):

- › *Standardisierung*: Der Einstieg in BIM ist außerordentlich anforderungsreich und erfordert von den Beteiligten nicht nur digitales Know-how, sondern vor allem umfangreiches Prozesswissen, da detaillierte Festlegungen von Arbeitsabläufen und Verantwortlichkeiten zu leisten sind. Offene Standards (z. B. Datenformate und Schnittstellen wie IFC), öffentliche Bauteilbibliotheken sowie klare Vorgaben bezüglich der Arbeitsabläufe senken die Einstiegshürden und sind deshalb für KMU von größter Bedeutung. Seit 2013 ist beim VDI die nationale Richtlinienreihe VDI 2552 in Arbeit, die »einen strukturierten Ansatz für die effektive Implementierung von BIM« liefern soll.⁵⁸ Ihre Entwicklung steht kurz vor dem Abschluss. Um sicherzustellen, dass die nationalen Festlegungen und somit die Interessen der deutschen Baubranche auch in internationale Normungsprozesse eingehen, finden parallel dazu auch im Deutschen Institut für Normung (DIN) Standardisierungsaktivitäten statt. So wurde eine DIN BIM Cloud⁵⁹ eingerichtet und Mitte 2020 mit der Erarbeitung einer Normungsroadmap BIM begonnen (in Zusammenarbeit mit VDI, buildingSMART Deutschland und BIM Deutschland), mit dem Ziel, weiteren Normungsbedarf zu identifizieren (DIN 2020). Aufgrund der zentralen Bedeutung standardisierter Verfahren für die BIM-Praxis sollten diese Bemühungen staatlicherseits wo immer möglich unterstützt werden, wobei besonders darauf zu achten wäre, dass die Stimme der KMU ausreichend in den Normungsgremien vertreten ist.
- › *Wissensvermittlung und Beratung*: Die BIM-Einführung erfordert von Betrieben ein individuell abgestimmtes Change-Management und geht mit entsprechend großem Beratungsbedarf einher. Viele KMU sind hierbei auf professionelle externe Unterstützung angewiesen. Da diese mit erheblichen Kosten verbunden sein kann, wäre zu überlegen, inwiefern die Inanspruchnahme derartiger Beratungsleistungen gefördert werden könnte (etwa analog zur Bundesförderung für Energieberatung im Mittelstand⁶⁰). Von Bedeutung ist zudem der Aufbau einer möglichst kostenfreien, leistungsfähigen öffentlichen Beratungsinfrastruktur in der Fläche, die den regionalen Wissenstransfer stärkt – in Form von Informationsveranstaltungen, Schulungsangeboten, Onlineinfoportalen und Vernetzungsmöglichkeiten etc. Mit der Gründung des Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrums Planen und Bauen im Jahr 2017 ist diesbezüglich ein wichtiger erster Schritt erfolgt. Das vom BMWi geförderte Kompetenzzentrum hat konkret die Unterstützung der KMU bei der Digitalisierung und beim Einstieg in BIM zum Ziel.⁶¹ Zusätzlich wurden regional verschiedene BIM-Cluster gegründet, um den Erfahrungsaustausch und die Vernetzung der Interessengruppen rund um das Thema BIM zu unterstützen. Derartige Strukturen und Angebote sollten verstetigt, ausgebaut und stärker regionalisiert werden, wofür es in allererster Linie langfristige Förderzusagen braucht. Um Synergieeffekte zu nutzen und Parallelstrukturen zu vermeiden, wäre eine engere Koordinierung der Aktivitäten der zuständigen Ministerien (BMI, BMVI, BMWi) sowie der Länder – möglichst unter Beteiligung der Verbände und Kammern – sinnvoll.
- › Erfolgreiche Pilotprojekte können nicht nur als Best-Practice-Beispiele und Anschauungsmaterial für KMU dienen, sondern sind auch eine wichtige Ressource für die Wissensgenerierung. Eine adäquate Begleitforschung vorausgesetzt, lässt sich mithilfe von Pilotprojekten beispielsweise den Implementierungshürden sowie den spezifischen Unterstützungsbedarfen von KMU auf den Grund gehen. Ein wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang betrifft die Ermittlung von Kosten-Nutzen-Effekten eines BIM-Einsatzes. Hierfür bietet sich die parallele Durchführung eines Projekts in herkömmlicher und in modellorientierter Arbeitsweise an. Das erhöht zwar den Aufwand substantiell, kann aber gerade KMU dabei helfen, die mit der BIM-Einführung verbundenen Kostenrisiken besser abzuschätzen.

⁵⁸ <https://www.vdi.de/richtlinien/unsere-richtlinien-highlights/vdi-2552> (12.3.2021)

⁵⁹ Bei der DIN-BIM Cloud handelt es sich um eine Datenbank für standardisierte Bauteileigenschaften in maschinenlesbarem Format. Sie dient primär als »Wissensbasis für die Recherche und Abstimmung standardisierter Bauteileigenschaften sowie deren Vernetzung mit der internationalen und nationalen Baunormenwelt« (<https://www.din-bim-cloud.de/>; 12.3.2021).

⁶⁰ <https://www.deutschland-machts-effizient.de/KAENEF/Redaktion/DE/Foerderprogramme/C-energieberatung-im-mittelstand.html> (12.3.2021)

⁶¹ <https://www.kompetenzzentrum-planen-und-bauen.digital/> (12.3.2021)

4 Additive Fertigungsverfahren

Prinzipiell haben sich die Baustellen in den letzten Jahrzehnten kaum verändert. Bauwerke werden seit über 100 Jahren mit weitgehend unveränderten traditionellen Baustoffen errichtet und die heutigen Anforderungen an Baustoffe, wie z. B. Wärmedämmung, werden nur durch additive, nachgeschaltete Baustofftechnologien erreicht (Stemmermann/Achternbosch 2013). Ähnliches gilt auch für die Bauweisen (sequenzielle monolithische Bauweisen) und die Bautechnologien (Mauerwerk und Beton), deren Grundprinzipien seit Jahrzehnten im Wesentlichen gleichgeblieben sind.

Ändern könnte sich dies mit additiven Fertigungsverfahren (auch als 3-D-Druck bezeichnet), in die in Verbindung mit neuen Verbundwerkstoffen große Erwartungen gesetzt werden, die vergleichsweise niedrige Produktivität und Wertschöpfung in der Baubranche zu erhöhen. Unter anderem wird mit diesen Ansätzen erhofft, die Fertigstellung von Bauwerken unter Einsatz digitaler Technologien leichter und schneller bewältigen zu können.

In diesem Kapitel werden auf Basis des Gutachtens von Mechtcherine (2019) die Grundlagen, Potenziale und Herausforderungen eines Einsatzes von additiven Fertigungsverfahren für den Wohnungsbau dargestellt.⁶² Da die wichtigsten Massenbaustoffe mineralisch gebundene Baustoffe sind, steht bei der additiven Fertigung im Bauwesen die Verwendung von Beton im Mittelpunkt des Interesses. Entsprechend nimmt im Folgenden, nach einer Klassifizierung von additiven Verfahren (Kap. 4.1), der 3-D-Betondruck den größten Raum ein (Kap. 4.2). Aber auch die Perspektiven alternativer Materialien (Stahl, Kunststoffe, Holz etc.) werden kurz besprochen (Kap. 4.3).

4.1 Klassifizierung von additiven Verfahren

Die fortschreitende Digitalisierung und Automatisierung ermöglichen neue Wege der industriellen Fertigung von Prototypen, Werkzeugen, Zwischen- und Endprodukten. Grundsätzlich stehen heute subtraktive, formative und additive Fertigungsverfahren zur Verfügung (Mechtcherine 2019, S. 11). Als additives Fertigungsverfahren wird die Herstellung dreidimensionaler Bauteile mithilfe eines *automatisierten Schichtaufbaus* bezeichnet (Gibson et al. 2015, S. 1). Das gewünschte Bauteil wird auf der Grundlage eines digitalen 3-D-Modells durch gezieltes schichtweises Auftragen des Ausgangsmaterials sukzessive und maßgeschneidert aufgebaut. Das Aneinanderfügen kleinerer Volumenelemente ermöglicht die Entstehung eines mehrfach größeren Elements mit einer komplexen Form (Mechtcherine 2019, S. 13 f.). Da der Baubereich sich durch seine Unikatfertigung auszeichnet, ist er für additive Fertigungsverfahren im Prinzip prädestiniert. Die Präzision der Formgebung hängt von der gewählten Auflösung der Fertigung ab. Mit zunehmender Auflösung steigen jedoch die Produktionszeiten und -kosten.

Subtraktive und formative Fertigungsverfahren werden in der Praxis oft als Nebenverfahren in Kombination mit der additiven Fertigung eingesetzt, wobei moderne Robotersysteme ein Multitasking dieser Herstellungsverfahren ermöglichen:

- › Bei der subtraktiven Fertigung entsteht das Bauteil durch *Abtragen* von Material. Mit Werkzeugen, wie z. B. Fräsen und Bohren, wird ein großer Materialblock bis zur gewünschten Geometrie bearbeitet.
- › Formative Fertigung sieht die *Umformung* eines gegebenen Materialvolumens in eine neue geometrische Form vor. Typische Beispiele für dieses Verfahren sind durch Pressen hergestellte Bauteile oder das Gießen von Frischbeton, Metallschmelze oder Flüssigkunststoff in eine Form.

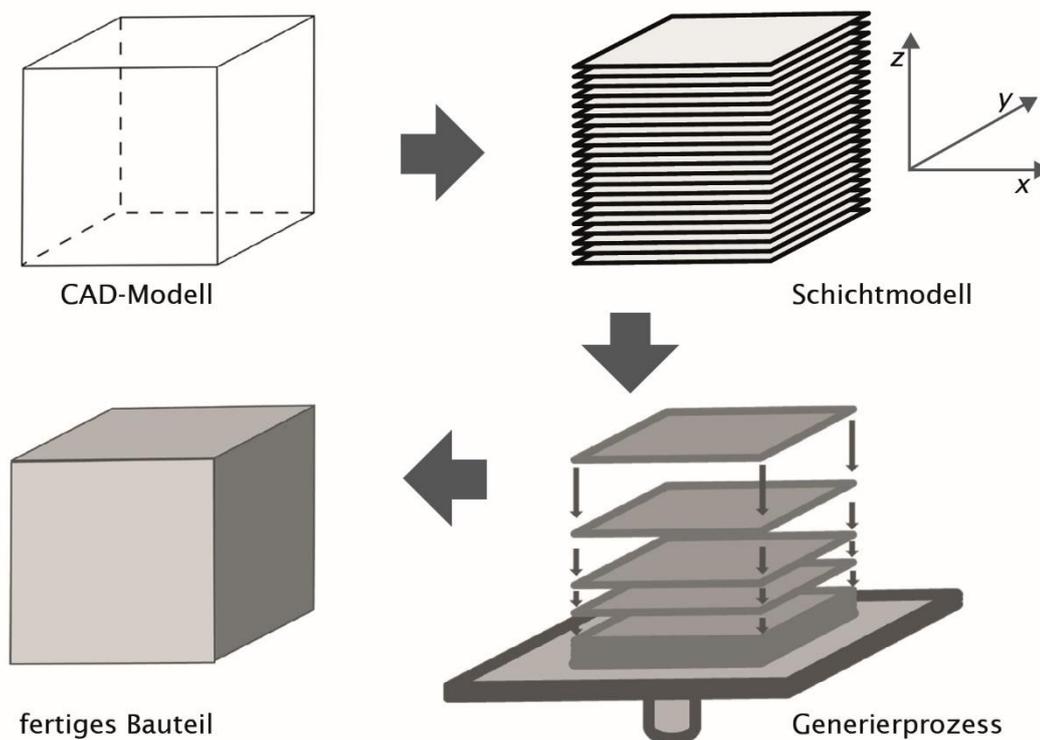
Die erste Anwendung der additiven Fertigung im Bauwesen geht auf den 3-D-Kunststoffdruck von *Architekturmodellen* zurück. Nach und nach wurden auch andere Werkstoffe (z. B. Portlandzement) auf potenzielle bauliche Anwendungen getestet (Pegna 1995), wobei vor allem auf die Erfahrungen aus anderen Branchen (z. B. Medizintechnik, Maschinenbau) aufgebaut wurde und wird (Witt/Anton 2020).

Alle additiven Verfahren beruhen auf demselben Prinzip, welches in Abbildung 4.1 veranschaulicht wird (Mechtcherine 2019, S. 13 f.). Die Fertigung der dreidimensionalen Bauteile geschieht zunächst meist in der Ho-

⁶² Potenziale, Stand der Technik und Herausforderungen für industrielle Anwendungen im Allgemeinen wurden in TAB (2017) dargelegt. Im vorliegenden Bericht stehen ausschließlich additive Fertigungsverfahren im Kontext Bauwesen im Fokus.

horizontalen (x-y-Ebene), anschließend wächst das Bauteil durch den sequenziellen Aufbau von aufeinanderfolgenden Schichten in der Höhe (z-Achse). Der Fertigungsprozess basiert auf einem im Vorfeld erstellten digitalen 3-D-CAD-Modell, welches dann in gleichmäßigen Schichten aufgeteilt ist. Ein feinerer Schichtenaufbau (höhere Auflösung) ermöglicht präzisere Formen bzw. Strukturen. Die Druckgeschwindigkeit in der x-y-Ebene wird von den eingesetzten Materialien und der Maschinenteknik für den 3-D-Druck bestimmt. Die aufzutragende Schicht wird inkrementell durch schrittweise Materialablage erzeugt. Der Zuwachs in der Höhe (z-Achse) erfolgt meistens in einem Schritt und entspricht der gewählten Schichtdicke.

Abb. 4.1 Prinzip der additiven Fertigung



Eigene Darstellung nach Schmidt 2015

Auf diese Weise transformiert man das digitale Modell in ein gleichartiges physisches Objekt. Die zur Verfügung stehende Auswahl an additiv verarbeitbaren Materialien ist von Kunststoff bis zu Beton breit gefächert, jedoch sind die Härtingszeiten recht unterschiedlich. Der 3-D-Kunststoffdruck liefert ein für den Einsatz oder für die Weiterbearbeitung unmittelbar fertiges Produkt. Das abgelegte Filament erstarrt und erhärtet z.B. durch Abkühlung innerhalb kürzester Zeit zum festen Werkstoff. Bei Verwendung von Beton als Druckmaterial erfolgen das Erstarren und die Festigkeitsentwicklung des gedruckten Bauteils materialbedingt deutlich länger, was den Druck vor große Herausforderungen stellt. Während die Erstarrung und die Aushärtung des (konventionellen) Frischbetons Stunden bis Tage in Anspruch nehmen, muss die Formstabilität des 3-D-Frischbetons in wenigen Minuten gewährleistet sein.

Die additiven Verfahren basieren auf einer schichtweisen Ablage des Materials, die eingesetzten Materialien und die Konzeption der Verfahren können unterschiedlich sein. In Abhängigkeit von der Art, mit der das eingesetzte Material chemisch oder physikalisch beim Druck umgewandelt wird, werden die Verfahren der additiven Fertigung üblicherweise in drei Klassen aufgeteilt (Mechtcherine 2019, S. 14 f.):

- › Beim Schichtaufbau durch *Polymerisation* werden flüssige organische Photopolymere durch UV-Strahlung lokal ausgehärtet (Witt/Anton 2020). Nach jeder Belichtung des Photopolymers erfolgt eine Bewegung des Druckobjekts um eine Schicht. Da das Photopolymerverfahren für die Massenapplication im Bauwesen kaum eine Bedeutung spielt, wird es in diesem Kapitel nicht weiter behandelt.

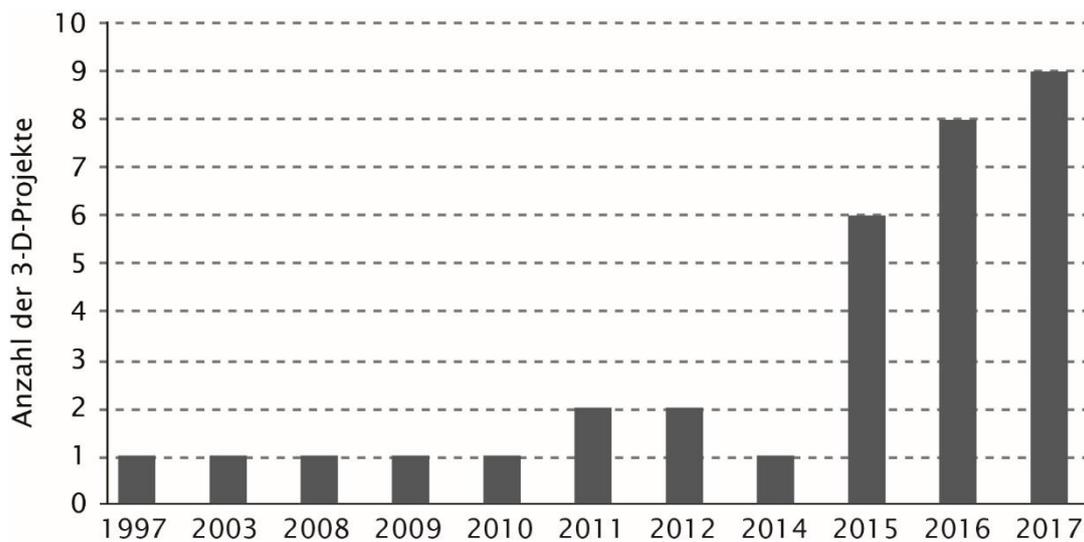
- › Im *Binder-Jetting-Verfahren* erfolgt der Schichtaufbau durch *Verkleben* (Witt/Anton 2020). Hier werden dünne Schichten pulverförmiger oder gekörnter Werkstoffe (z. B. Gesteinskörnung, Kunststoffgranulat, Gipspulver) mit einem flüssigen Binder an vorprogrammierten Stellen oder am definierten Kontor verklebt. Zur Verfestigung des losen Materials können sowohl organische als auch anorganische Bindemittel verwendet werden. Bei Verwendung anorganischer Pulverschichten kann Wasser als Bindemittel dienen. Nach Verfestigung der gewünschten Kontur wird eine neue Schicht aufgetragen und der Prozess setzt sich fort, bis das Endprodukt entstanden ist.
- › Beim Schichtaufbau durch *Verschmelzen* wird zwischen *Pulverbettverfahren* und *Extrusion* unterschieden. Beim Pulverbettverfahren wird das pulverige Material durch einen externen Energieeintrag verschmolzen (Laser Melting, Lasersintern, Elektronenstrahlschmelzen/Electron Beam Melting). Bauteile werden dabei Schicht um Schicht in einem Pulverbett aufgebaut. Bei der Extrusion schmilzt man das Material, extrudiert es durch eine Düse und baut das Bauteil so Schicht für Schicht auf. Oftmals werden dazu Thermoplaste verwendet (Fused Deposition Modeling) (Ning et al. 2015; Witt/Anton 2020). Diese werden durch die beheizte Düse vor dem Austreten verflüssigt.

Für die additive Fertigung im Bauwesen kommen vor allem Verfahren zum Einsatz, welche auf den Prinzipien des Verklebens und Verschmelzens beruhen. Beim 3-D-Druck mit Keramik und Beton ist der Begriff Verschmelzen allerdings nur bedingt zutreffend, denn keramische Erzeugnisse werden erst durch das anschließende Sintern im Brennofen verschmolzen, wohingegen Beton durch chemische Reaktionen des Zementleims als Kleber erhärtet (Mechtcherine 2019, S. 15).

4.2 Additive Fertigung mit Beton

Für das Bauwesen sind additive Fertigungen von Bauteilen und Bauwerken von besonderem Interesse, wenn es gelingt, diese in Masse herzustellen. Aufgrund der überragenden Bedeutung von Beton als Baustoff steht der 3-D-Betondruck im Mittelpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Die neue 3-D-Technologie müsste allerdings, um konkurrenzfähig gegenüber der herkömmlichen Betonbautechnologie zu sein, Vorteile bieten, insbesondere in Bezug auf Kosten- und Zeiteinsparung bei der Bauausführung. Erste Konzepte additiver Fertigung mit zementbasierenden Mischungen wurden in den 1990er Jahren entwickelt (Khoshnevis 1999; Pegna 1995). Verschiedene Forschungsgruppen (Buswell et al. 2007; Wangler et al. 2016) hatten die Vision, dass der 3-D-Druck mit Beton ein hohes Potenzial bei der Lösung bestehender Herausforderungen (Kapazitätsprobleme, lange Bauzeiten bei der Ausführung) im Bauwesen aufweisen könnte. In vielen Fällen wurde diese Entwicklung auch von Architekt/innen vorangetrieben, die nach neuen Fertigungstechniken zur Umsetzung ihrer kühnen Ideen suchten. Aktuell wird weltweit eine wachsende Zahl von Forschungs- und Entwicklungsprojekten durchgeführt, wie Abbildung 4.2 zeigt.

Abb. 4.2 Entwicklung der Projekte auf dem Gebiet des 3-D-Drucks mit Beton



Eigene Darstellung nach Buswell et al. 2018

4.2.1 Verfahren im 3-D-Betondruck

Für den 3-D-Betondruck sind zwei wesentliche additive Fertigungsansätze mit schichtweiser Arbeitsweise zu unterscheiden: die *selektive Betonablage* und die *selektive Bindung* fester Bestandteile durch gezieltes Einbringen einer reaktiven Flüssigkeit oder Dispersion (Wasser oder Zementleim). Als weiteres Druckverfahren muss daneben das adaptive *Gleitschalungsverfahren* mit aufgeführt werden, bei dem die Struktur des Bauteils durch eine robotergesteuerte dynamische 3-D-Schalungsform aufgebaut wird, die kontinuierlich mit Beton verfüllt und weiterbewegt wird.

3-D-Betonfertigung auf Basis selektiver Ablage

Eine selektive Materialablage, d.h. Schicht für Schicht, kann bei Beton durch Extrudieren oder Spritzen bzw. Sprühen erfolgen:

- › Beim *Extrudieren* wird Frischbeton durch eine Düse bzw. einen Druckkopf entsprechend der eingestellten Druckgeschwindigkeit schichtweise abgelegt (Mechtcherine 2019, S.20 f.). Während beim konventionellen Extrudieren (z. B. mit Kunststoffen) die Düsengeometrie die endgültige Bauteilgeometrie vorgibt, muss beim 3-D-Betondruck die Düse so konzipiert sein, dass Verformungen oder ein Zerfließen des Betonfilaments nach Verlassen der Düse aufgrund der häufig relativ weichen Betonkonsistenz mitberücksichtigt sind (Mechtcherine et al. 2020a). Beim Drucken verläuft die Materialablage in der Regel kontinuierlich mit möglichst nur wenigen Unterbrechungen. Der Druck von kantenhaften geometrischen Formen ist ungünstig, deshalb werden beim 3-D-Druck echte Winkel meist vermieden. Dennoch gibt es auch Verfahren, wie das an der Technischen Universität Dresden entwickelte »Concrete ON-site 3D-Printing« (CONPrint3D), welche explizit für die Abbildung von echten Winkeln konzipiert sind (Mechtcherine et al. 2019b). Die Freiheit der Formgebung wird vor allem durch die Breite und die Höhe des abgelegten Filaments bestimmt. Der Aufbau in der Höhe geschieht durch die zunehmende Anzahl der abgelegten Schichten (Filamente). Während die Errichtung von vertikalen Bauteilen beim 3-D-Druck ein natürlicher Vorgang ist, stellt die Herstellung von geneigten und vor allem horizontalen Elementen eine besondere Herausforderung dar. Geneigte Elemente können durch einen stufenweisen Versatz der Filamentablage relativ zur Vertikalachse erzeugt werden. Dies bedingt jedoch besonders hohe Anforderungen an die Formstabilität sowohl des frisch abgelegten Filaments als auch der vorangegangenen Schichten. Die Extrusion wird aus Sicht der Entwickler/innen aktuell als klarer

Favorit unter allen 3-D-Techniken mit Beton angesehen, sowohl in Bezug auf die technologische Realisierbarkeit als auch hinsichtlich der wirtschaftlichen Rentabilität (Mechtcherine 2019, S. 20).

- › Das *3-D-Spritzverfahren* basiert auf der konventionellen Spritzbetontechnologie (Witt/Anton 2020). Bei dieser Spezialanwendung des Betonbaus, die z. B. im Tunnelbau eingesetzt wird, wird der Beton mit hohem Druck in einer Schlauch- oder Rohrleitung zur Einbaustelle gefördert und dort durch eine Spritzdüse mit hoher Geschwindigkeit gegen die Auftragsfläche geschleudert (VDZ 2008). Ein entsprechendes 3-D-Betondruckverfahren wurde von Forscher/innen der Technischen Universität Braunschweig unter dem Namen »Sprayed Concrete Printing 3D« (SC3PD) () entwickelt (DBZ 2019). Der Vorteil des Spritzverfahrens ist, dass der Materialauftrag durch die Änderung des Neigungswinkels der Düse in beliebiger Raumrichtung erfolgen kann (Lindemann et al. 2018). Das Spritzgut erfährt eine Verdichtung beim Aufprall am Untergrund. Erhärtet wird meist durch Zugabe eines chemischen Beschleunigers. Mit der Spritzbetontechnologie lässt sich z. B. eine Ummantelung bzw. Beschichtung von 3-D-Körben aus Bewehrungsstahl unterschiedlicher Geometrien realisieren. Die Technologie setzt in der Regel eine Gesteinskörnung kleiner als 4 mm ein und ermöglicht die Verteilung des Betons zwischen Bewehrungsstäben. Nachteilig ist, dass sich durch den Spritzvorgang keine hohen Maßgenauigkeiten, klare Geometrien und auch keine ebenen Oberflächen erreichen lassen (Mechtcherine 2019, S. 33). Durch die Multifunktionalität des verwendeten Roboterarms kann jedoch eine Nachbehandlung der Oberfläche, z. B. Glättung, erfolgen (DBZ 2019).

3-D-Druck auf Basis selektiver Materialbindung

Im Fall der selektiven Bindung werden die trockenen Materialien zuerst als dünne Schicht auf einer Plattform (Bett) vorgelegt und ein Bindemittel oder Aktivator an spezifische Ortskoordinaten im Bett hinzugegeben (Lowke et al. 2018). Dadurch verfestigt sich das Material an diesem Ort. Anschließend wird darauf die nächste Schicht von trockenem Material aufgebracht und die folgende Portion an Bindemittel/Aktivator zugefügt. Das gedruckte Element wächst von unten nach oben und wird dabei von dem nicht verfestigten trockenen Material stabilisiert. Nach Abschluss des Herstellungsprozesses entfernt man das nicht umgesetzte Trockenmaterial. Das Wort selektiv verdeutlicht, dass das Trockenmaterial lediglich an den Stellen verfestigt wird, an denen der Aktivator bzw. das Bindemittel zugeführt wird, d. h. nur an den für das gewünschte Druckobjekt notwendigen Orten gemäß dem digitalen Druckplan (Mechtcherine/Nerella 2018a).

Die Technik der selektiven Bindung lässt sich in drei unterschiedliche Ansätze unterteilen (Mechtcherine 2019, S. 35 f.):

- › *Selektive Bindemittelaktivierung* (auch selektive Zementaktivierung): Beim Verfahren der selektiven Bindemittelaktivierung wird über die trockene, feinpulverige Mischung von Zement und Gesteinskörnung eine zur Aktivierung der Verfestigung notwendige Substanz gesprüht. Üblicherweise sind die Korngrößen der trockenen Mischung kleiner als 1 mm. Bei zementbasierten Materialien besteht der Aktivator aus Wasser. Bei Geopolymeren ist das eine wässrige Lösung alkalischer Substanzen.
- › *Selektive Zementleim-Intrusion*: Bei diesem Verfahren enthält die Grundmischung keine reaktiven Komponenten. Das Binden der Gesteinskörnung erfolgt durch die selektive Einbringung einer Bindemittelsuspension. Im Regelfall besteht diese aus Zement, Wasser und Betonzusatzmitteln. Die typische Größe der Gesteinskörnung der trockenen Mischung ist kleiner als 5 mm.
- › *Binder Jetting*: Das Verfahren des Binder Jetting ist ähnlich dem Verfahren der selektiven Zementleimintrusion. Beim Binder Jetting wird ein flüssiger Kleber (Harz) für die Befestigung der dünnen Feststoffschichten verwendet. Durch das Zusammenkleben der Feststoffpartikel entsteht nach und nach das Bauteil. Dieses Verfahren dürfte nur für Nischenanwendungen interessant sein.

Auch bei den Verfahren mit selektiver Bindung stehen bestimmte Anforderungen einander gegensätzlich gegenüber: Höhere Anforderungen an Maßgenauigkeit schließen die Anwendung von grober Gesteinskörnung als trockenes Bettmaterial aus, die Verwendung eines feineren Bettmaterials würde jedoch eine sehr hohe Anzahl an Drucklagen bedingen. Damit steigt mit zunehmendem Bauvolumen auch die Menge an Bett- bzw. Stützmaterial, was nach Beendigung der Arbeiten zu entfernen ist (Mechtcherine/Nerella 2018a). Hinzu kommt, dass die Bauelementgröße durch den Arbeitsraum des Druckers begrenzt wird und dessen Ausmaße somit das geplante Druckobjekt übersteigen müssen. Das gleichmäßige Austragen von zu bindenden Schichten und der bindenden

Substanz ist bei Dimensionen realer Bauelemente technisch äußerst aufwendig und in der Praxis kaum umzusetzen (Mechtcherine 2019, S. 41).

Gleitschalungsverfahren für adaptive Geometrien

Die bisher vorgestellten digitalen 3-D-Fertigungsverfahren eignen sich insbesondere zur Herstellung von Wandbauteilen. Stützen, Säulen und andere Bauelemente mit relativ kleinen Querschnitten und großer Ausdehnung in vertikaler Richtung, wie z. B. Treppenhaustürme, lassen sich zwar mit diesen Methoden prinzipiell auch herstellen, deutlich effizienter sind hier jedoch Gleitschalungsverfahren (Mechtcherine 2019, S. 42 f.). Hierbei handelt es sich um eine langsam gleitende Schalungsform, die für einen kontinuierlichen Baufortschritt mit Beton befüllt wird. Dieses Verfahren ist auch in der konventionellen Bautechnik schon länger etabliert, nicht jedoch unter Verwendung digitaler Technologien. Hier stehen adaptive Geometrien im Vordergrund. Ein derartiges System ist das an der ETH Zürich entwickelte »Smart Dynamic Casting« (SDC): ein kontinuierliches, robotergesteuertes Gleitschalungsverfahren, welches der Vorfabrikation von tragenden Betonstrukturen dient (Lloret F. 2016). Zum Einsatz kommt eine Schalung, die signifikant kleiner ist als die herzustellende Struktur. Bei dem automatisierten Verfahren wird ein Schalungssegment kontinuierlich mit Beton befüllt und in die Höhe gezogen. Dies geschieht in einer Geschwindigkeit, bei welcher der Beton in der Phase, während er sich vom weichen zum harten Material wandelt, geformt werden kann. Das SDC-Verfahren ermöglicht es, die Schalung beim Hochziehen sowohl zu verdrehen als auch ihren Querschnitt durch die Verjüngung bzw. Aufweitung der Gleitschalung zu verändern. Neben rechteckigen Querschnitten mit geraden Seiten können außerdem andere geometrische Formen gestaltet werden.

4.2.2 Anforderungen an den 3-D-Beton

Die Anforderungen, die der Frischbeton beim 3-D-Druck erfüllen muss, gehen deutlich über die von konventionellem Beton hinaus. So kommt der Steuerung des Verformungs-, Fließ- und Erstarrungsverhaltens (rheologische Eigenschaften) des druckbaren Betons eine entscheidende Bedeutung zu (Mechtcherine 2019, S. 23 f.). Frischbeton ist im konventionellen Betonbau so konzipiert (Kasten 4.1), dass für das Befördern/Verarbeiten in verschaltete Bauteilformen Stunden zur Verfügung stehen und die (erste) Verfestigungsphase des Normalbetons bis zu einer Weiterverarbeitung 2 bis 4 Tage beträgt. Völlig andere Rahmenbedingungen, insbesondere für die Verarbeitung und Verfestigung, gelten für den 3-D-Beton. Für die Verfestigung stehen eventuell nur Minuten zur Verfügung. Die größten Herausforderungen an den Frischbeton hinsichtlich seiner Verarbeitung und entsprechend seines Verformungs- und Fließverhaltens sind nach Mechtcherine (2019, S. 23 f.):

- › Problemloses Fördern des Betons an den Druckkopf: Daher muss die *Pumpbarkeit des Frischbetons* gewährleistet werden. In Forschungsarbeiten wird z. B. eine gute Pumpbarkeit von 90 Minuten nach dem Vormischen des 3-D-Frischbetons angestrebt (Näther et al. 2017).
- › Kontinuierliche Materialablage durch den Druckkopf: Entscheidend ist ein stetiges und homogenes Austreten des Frischbetons aus der Düse, und zwar mit einem exakt vorgegebenen Volumen pro Zeiteinheit. Dies wird unter dem Begriff *Extrudierbarkeit* zusammengefasst.
- › Frühe Belastbarkeit des frisch abgelegten Betons durch die darauffolgenden Betonschichten zur Gewährleistung eines zügigen Baufortschritts: Die zunächst platzierten Filamente dürfen durch die Ablage neuer Filamente nach einem im Druckplan vorgegebenen Mindestzeitintervall (möglicherweise wenige Minuten) keine signifikante Verformung erfahren und müssen gleichzeitig mit dem abzulegenden Filament optimal binden. Die schon abgelegten Schichten müssen die neuen Filamente tragen, was umso kritischer wird, je höher das Bauteil wächst. Diese Eigenschaft des Frischbetons, die Formstabilität unter zunehmender Last zu behalten, wird als *Verbaubarkeit* bezeichnet.

Kasten 4.1 Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton

Beton ist ein künstlicher Verbundbaustoff, bestehend aus den Ausgangsstoffen Zement, Wasser, Gesteinskörnung (in der Regel Sand, Kies) sowie Zusatzstoffen und Zusatzmitteln. Betonzusatzstoffe sind fein verteilte organische (z. B. Kunststoffdispersionen) oder anorganische Stoffe (z. B. Steinkohleflugasche). Betonzusatzmittel wie Fließmittel, Erstarrungsregler etc. werden dem Beton in kleinen Mengen zugesetzt, um die Eigenschaften von Beton chemisch und/oder physikalisch zu beeinflussen (VDZ 2008). So verändern Fließmittel etwa die Konsistenz des Frischbetons und damit dessen Pumpfähigkeit bei der Verarbeitung. Erstarrungsregler verzögern oder beschleunigen die Aushärtung des Betons.

Beton wird dadurch fest, dass der Zementleim (Zement und Wasser) erhärtet und dabei die Gesteinskörnung (Zuschlag) zu einer festen Matrix verbindet. Solange der Beton beliebig verformbar, d. h. verarbeitbar ist, bezeichnet man ihn als Frischbeton. Nach dem Erhärten des Leims nennt man ihn Festbeton. Mörtel unterscheidet sich von Beton nur durch das Größtkorn der Gesteinskörnung, das für Mörtel ≤ 4 mm, für Beton ≤ 32 mm beträgt.

Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons werden entscheidend von seiner Zusammensetzung bestimmt, für die entsprechend festgelegter Eigenschaften die DIN EN 206 Teil 1 bzw. die DIN 1045 Teil 2 als deutsche Anwendungsregel maßgebend ist. Die für 1 m^3 Beton erforderlichen Zugabemengen von Zement, Gesteinskörnung, Wasser sowie Zusätzen sind jeweils durch eine Mischungsberechnung aus dem Volumen der Ausgangsstoffe zu ermitteln. In den Mindestanforderungen an übliche Konstruktionsbetone nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 ist der Mindestzementgehalt für Innenräume auf 240 kg/m^3 Beton und für Außenbauteile auf 280 kg/m^3 Beton bestimmt (Biscop/Kampen 2017). Für einen Normalbeton sind beispielsweise 300 kg Zement, 1.900 kg Gesteinskörnung und rd. 170 kg Wasser je m^3 Beton erforderlich.

Die wichtigsten Frischbetoneigenschaften sind die Konsistenz als Maß für die Verarbeitbarkeit und die Verarbeitbarkeitszeit nach Ankunft auf der Baustelle. Der antransportierte Frischbeton sollte spätestens nach 90 Minuten (bei steifer Konsistenz und dem Transport ohne Fahrmischer nach 45 Minuten) vollständig entladen sein (Holcim 2009). Während der Verarbeitbarkeitszeit durchläuft der Frischbeton von der Herstellung über das Befördern, Verarbeiten und Nachbehandeln alle Verfahrensschritte, die notwendig sind, damit schließlich aus dem in Form gebrachten Baustoff während der Erhärtung das Bauteil entsteht. Die Übergangsphase des Erstarrens normaler Betone erstreckt sich über viele Stunden. Für die in Festigkeitsklassen eingeteilten Betone sind Mindestwerte für die Anfangs- sowie die 28-Tage-Festigkeit (Normfestigkeit) festgeschrieben. Die Festigkeitsentwicklung, insbesondere die Anfangsfestigkeit nach 2 Tagen, hat baupraktische Bedeutung (z. B. für die Ausschalung). In dieser Zeit kann ein Beton mittlerer Festigkeitsentwicklung 30 bis 50% der Normfestigkeit erreichen, ein schneller Beton sogar schon mehr als 50%. Der Nachbehandlungsphase kommt eine große Bedeutung zu, da verschiedene Maßnahmen, wie z. B. der Schutz vor zu schneller Austrocknung, den frisch verarbeiteten und jungen Beton bis zur ausreichenden Festigkeit schützt. Die Festigkeitsentwicklung hängt u. a. auch von den Außentemperaturen ab. Unter normalen Witterungsverhältnissen ist etwa 2 bis 4 Tage nach Beginn des Einbringens/Verarbeitens normal abbindender Frischbeton für Außenbauteile in der Regel so weit erhärtet und nachbehandelt, dass mit dem nächsten Bauabschnitt begonnen werden kann (Holcim 2009).

Quelle: VDZ 2008

Eine der großen Herausforderungen im 3-D-Betondruck besteht in der Entwicklung eines Betons, der die drei Kerneigenschaften Pumpbarkeit, Extrudierbarkeit, Verbaubarkeit gleich gut erfüllt. Während für eine gute Pumpbarkeit eine weichere Konsistenz vorteilhaft ist, haben die für die Extrusion verwendeten Betone üblicherweise eine knetartige Konsistenz und lassen sich nicht bzw. nur schwer pumpen. Eine weichere Konsistenz führt jedoch zum Verlust der Formstabilität. Letzteres gilt umso mehr im Hinblick auf die Verbaubarkeit. Diese Eigenschaft kann am besten bei einem steifen, erdfeuchten Beton erreicht werden. Solche Betone lassen sich jedoch weder pumpen noch ohne Weiteres extrudieren. Somit stellt die Entwicklung eines druckbaren Betons eine komplexe Optimierungsaufgabe dar, und zwar immer im Kontext einer konkreten Drucktechnik und eines Druckszenarios, wie z. B. bei bestimmten Wetter- und Temperaturbedingungen (Mechtcherine 2019, S.25). Dies hat zur Konsequenz, dass aufgrund unterschiedlicher technischer und umweltbezogener Rahmenbedingungen abgestimmte Rezepturen benötigt werden, was die Komplexität der Technologie deutlich erhöht.

Bei den meisten Betondruckprojekten wird bislang ein feinkörniger Mörtel verwendet, der im Vergleich zu den Abmessungen des zu bedruckenden Teils in Schichten mit einem relativ kleinen Querschnitt von etwa 30 bis 50 mm Breite ausgetragen wird und 10 bis 30 mm hoch ist (Mechtcherine 2019, S. 30). Je feinkörniger der Frischbeton ist, desto mehr ist jedoch mit betontechnischen Nachteilen zu rechnen (Mechtcherine 2019, S. 22). Aufzuführen sind insbesondere das Problem der Verkürzung bzw. Volumenänderung des Bauteils (sogenanntes Schwinden), der plastischen Verformungen durch Lasteinwirkung (Kriechen) und die höhere Rissanfälligkeit. Zum Schwinden oder Bruchverhalten des mit selektiver Bindung hergestellten 3-D-Betons liegen bisher noch keine Untersuchungsergebnisse vor (Mechtcherine 2019, S. 39). Bei feinkörnigem Frischbeton sind somit höhere Gehalte an Zement erforderlich, um die betontechnischen Eigenschaften zu erfüllen, was ökonomisch und ökologisch ungünstig ist.

Für den wirtschaftlichen und umweltschonenden Bau großer, massiver Strukturen sind solche Feinbetone ungeeignet. Daher ist die Verwendung von Betonrezepturen mit groben Gesteinskörnungen vorzuziehen. Jedoch steigen mit gröber werdender Gesteinskörnung die Anforderungen bezüglich der Gestaltung des Druckkopfes und -vorgangs. Die Technische Universität Dresden verfolgt mit ihrer Entwicklung des CONPrint3D das Ziel, massive, monolithische Wandstrukturen mit Beton zu drucken, der grobe Gesteinskörnungen enthält (Mechtcherine 2019, S. 31; Mechtcherine et al. 2019b). Die Realisierung dieses Ziels stellt für die Forschung eine große Herausforderung dar.

Obwohl auf bestehendes Wissen zum konventionellen Frischbeton zurückgegriffen werden kann, sind für die Entwicklung von 3-D-Betonen neue Lösungsansätze erforderlich (Mechtcherine 2019, S. 25). Die notwendige Zunahme der Steifigkeit und Festigkeit des Materials in der Zeit wird zunächst durch die spezifische Zusammensetzung (struktureller Aufbau) des Materials und schließlich durch die Zementaushärtung erreicht. Hier kommt es auf den intelligenten Mix von besonders reaktivem Zement und von speziell ausgesuchten Zementzusatzstoffen an, wie z. B. Mikrosilika und Flugasche, um Fließverhalten, Pumpbarkeit, Dauerhaftigkeit, Oberflächenqualität und Schwinden, Temperaturspannungen sowie Porosität zu beeinflussen (Näther et al. 2017).

Die Anforderungen an das Material hängen auch stark vom gewählten Verfahren ab. So werden z. B. bei der Technologie der selektiven Bindung die mechanischen Eigenschaften der hergestellten Bauteile nicht nur von der verwendeten Zementsorte, sondern auch von den prozessbezogenen Parametern wie Schichtdicke, Flüssigkeitsstrahlendruck und Nachbehandlung beeinflusst (Lowke et al. 2018). Die erreichten Festigkeiten der mittels selektiver Zementaktivierung hergestellten Bauteile liegen im Bereich der üblichen Festigkeitsparameter von Porenbeton, Leichtbeton oder Mauerwerksstein und damit deutlich niedriger als von üblichem Normalbeton, was deren potenziellen Einsatzbereich einschränkt.

Bei der Methode der selektiven Zement-Leimintrusion wiederum liegt die größte Herausforderung in der Kontrolle des ausreichenden Eindringens von Zementleim in die Gesteinskörnung. Der Grad des Eindringens des Zementleims (Zementpaste) beeinflusst sowohl die Festigkeit als auch die Formgenauigkeit von 3-D-gedruckten Elementen (Lowke et al. 2018). Das Eindringverhalten des Zementleims beeinflusst neben der Verbundfestigkeit auch die Dauerhaftigkeit, mechanische Eigenschaft und Formtreue des Bauteils.

Konkrete Angaben zu erforderlichen Erstarrungszeiten liegen kaum vor. Näther et al. (2017) gaben in ihren Versuchen als Erstarrungszeit für das gerade abgelegte Filament z. B. ca. 3 Minuten an – ein Wert, der plausibel erscheint. Ein solches Zeitverhalten lässt sich durch Beimischen von speziellen Betonzusatzmitteln (Erstarrungsbeschleunigern) direkt im Druckkopf realisieren. Dies ermöglicht ein schlagartiges Erstarren des abgelegten Filaments. Der zuvor flüssige, gut pumpbare und gut extrudierbare Beton wird dadurch zu einem einfach verbaubaren Beton. Möglicherweise werden relativ große Mengen an Erstarrungsbeschleunigern gebraucht, um das extrem schnelle Erstarren der 3-D-Betone zu ermöglichen (Näther et al. 2017). Höhere Gehalte an organischen Zusatzstoffen in 3-D-Betonen könnten allerdings durch späteres Ausgasen aus Beton möglicherweise für die Luftqualität in Innenräumen problematisch werden (Keppner et al. 2018). Alternativ werden auch Ansätze angedacht, bei denen durch eine äußere physikalische Anregung⁶³ im Druckkopf das Fließ- und Verformungsverhalten von Beton modifiziert werden kann (Schutter et al. 2018). Die Überwachung des zeitlichen Verhaltens solcher Eigenschaften stellt die Prüfmethode vor Herausforderungen: Mit den traditionell eingesetzten empirischen Methoden ist dies nicht leistbar (Mechtcherine 2019, S. 25).

Der 3-D-Betondruck von großformatigen Bauteilen hat derzeit noch reinen Demonstrationscharakter. Aus diesem Grund sind die aktuell verwendeten Mixrezepturen für 3-D-Frischbeton nur Schnappschüsse auf dem Weg

⁶³ Beispielsweise kann die Beimischung von speziellen Polymeren mit magnetischen Eigenschaften in einem angelegten äußeren Magnetfeld die Fließigenschaften des Betons verändern.

zur Optimierung. Es existieren noch keine Standardprotokolle für die Zusammensetzung von druckfähigem Beton (Panda et al. 2017). Chen (2017) von der Technischen Universität in Delft weist in seinem Übersichtsartikel zum weltweiten Stand der 3-D-Betontechnologien auf diesen Umstand hin. Mixturen für den 3-D-Beton haben dort mit 540 bis 579 kg/m³ Beton einen deutlich höheren Zementgehalt als solche von herkömmlichem hochfestem Beton (Zementgehalt: 471 bis 495 kg/m³ Beton), der unter den Normalbetonen eher ein Nischenprodukt darstellt. In Näther et al. (2017) werden auch Rezepturen mit 628 kg Zement/m³ Beton untersucht. Gewöhnlicher Normalbeton hat in den meisten Bauanwendungen Zementgehalte unter 300 kg/m³ Beton. Der Zementgehalt in den 3-D-Rezepturen wäre wahrscheinlich eventuell noch höher, wenn nicht durch Zumischung von Betonzusatzstoffen, wie z. B. Mikrosilikat und Flugasche, der Zementgehalt gesenkt werden könnte (Chen 2017). Mikrosilikat, auch Silikastaub genannt, ist ein Nebenprodukt der Siliziumherstellung und ermöglicht die Herstellung von hochdichten Betonen (VDZ 2008). Silikastaub erfordert jedoch mehr Wasser im Frischbeton, was im Allgemeinen durch Zugabe von chemischem Fließmittel oder Verflüssiger ausgeglichen werden muss und damit die Zusatzmittelkonzentration in Betonen erhöht. Es steht als Ressource nur in begrenzten Mengen zur Verfügung, ist zudem teuer und lohnt sich nur für Spezialprodukte. Aufgrund der politisch beschlossenen Stilllegung von Kohlekraftwerken ist auch Flugasche als Sekundärressource zunehmend begrenzt (Dehn et al. 2020).

All dies weist darauf hin, dass die Anforderungen an den 3-D-Druck sich auf der Basis des derzeitigen Wissens zur Zement- und Betonchemie meist nur mit hohen Gehalten an Normalzementen hoher Festigkeitsklasse in den Mixrezepturen für 3-D-Beton erreichen lassen. Der hohe Zementgehalt in den diskutierten 3-D-Betonrezepturen steht im Gegensatz zu Bestrebungen, den Zementgehalt in Betonen aus Klimaschutzgründen zu reduzieren (zur Klimaproblematik des konventionellen Zements Kap. 7.3.1).

4.2.3 3-D-Maschinenkonzept

Der 3-D-Drucker besteht im Allgemeinen aus zwei Maschinenteilen: einem Druckkopf, der das Druckmaterial ausgibt, und einem Positionierungssystem (Manipulator), das den Druckkopf trägt und diesen präzise nach digitaler Planungsvorlage entlang der Druckpfade bewegt (Abb. 4.3). In den meisten bekannten 3-D-Betondruckern werden leichte Druckköpfe mit einfachen Düsengeometrien und vertikaler Ausrichtung der Düse verwendet. Das Design der Düsen reicht von einfachen, runden Öffnungen bis hin zu drehbaren Düsen mit rechteckigen Querschnitten,⁶⁴ einige mit Schließmechanismen⁶⁵ und Vorrichtungen zum Einführen von Verstärkungsdraht.⁶⁶ Art und Größe des Manipulators bestimmen maßgeblich die möglichen Abmessungen des zu erstellenden Druckobjekts. Der Manipulator hat auch die Aufgabe, die Versorgung des Druckkopfs mit Beton über Schläuche oder Rohre sicherzustellen.

Einige der bekannten Betondruckdemonstrationsprojekte verwenden herkömmliche Industrieroboter, um den Druckkopf zu bewegen. Diese haben jedoch eine begrenzte Arbeitsreichweite von max. 4 m,⁶⁷ wodurch sie sich besser zum Drucken von Objekten mit einer Größe von wenigen Metern und einer begrenzten Höhe eignen. In Anbetracht dieser Arbeitsplatzbeschränkung und der Tatsache, dass die Industrieroboter normalerweise nicht für raue Baustellenbedingungen geeignet sind, scheint dieser Manipulatortyp vor allem für Fertigungen im Werk geeignet.

Die meisten der bisherigen Demonstrationsprojekte verwenden einen Portalroboter, der mindestens über drei translatorische Hauptachsen verfügt, die kartesisch aufgebaut sind, um den Druckkopf zu bewegen. Diese Portalbauweise zeichnet sich durch einfache Steuerung der Achsen und durch hohe Präzision aus. Nachteilig am Arbeitsraum ist, dass das Bewegungssystem immer den gesamten Druckbereich überspannt und damit viel Platz in Anspruch nimmt. Noch kritischer als die große Grundfläche ist die Höhe des Portalroboters. Der Portalroboter muss immer größer sein als das zu bedruckende Objekt. Das bedeutet, dass vor dem Drucken eines kompletten Gebäudes zunächst eine noch größere Maschine vor Ort gebaut werden müsste. Vor diesem Hintergrund ist das Verhältnis von Aufwand und Nutzen kritisch zu bewerten. Die meisten Portalroboter sind als stationäre Systeme anzusehen, sodass die Herstellung ganzer Gebäude vor Ort mit einem hohen Aufwand für die Montage und Demontage des Roboters verbunden ist.

⁶⁴ <https://cobod.com/bod2-specifications/> (12.3.2021)

⁶⁵ <https://www.apis-cor.com/> (12.3.2021)

⁶⁶ <https://3dprintedhouse.nl/en/> (12.3.2021)

⁶⁷ <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industrieroboter> (12.3.2021)

Abb. 4.3 3-D-Maschine: Manipulator und Druckkopf



Quelle: ICON Technology, Inc.

Aufgrund der aufgeführten Nachteile wurden verschiedene Lösungsansätze vorgeschlagen: Das dänische Unternehmen COBOD z. B. bietet Portalsysteme an, die aus einzelnen Modulen zusammengesetzt sind und so kundenspezifisch dimensioniert werden können. Auf dieser Basis lassen sich Arbeitsräume bis $45,0 \times 12,0 \times 9,1 \text{ m}^3$ realisieren.⁶⁸ Auch die US-amerikanische Contour Crafting Corporation⁶⁹ hat ein Konzept für einen mobilen, standortkompatiblen Portalroboter vorgestellt, von dem allerdings bisher keine Umsetzung bekannt ist. Wie viele Demonstrationsprojekte zeigen, eignet sich das Konzept mit Portalrobotern nur zur Herstellung von individuell bedruckten Betonfertigteilen in Werken, weniger zum Drucken auf der Baustelle. Die 3-D-Fertigteile werden vor Ort an der Baustelle montiert. Die Vorteile der individuell gestalteten Betonteile bleiben erhalten, jedoch müssen zusätzliche Kosten für den Transport und die Montage der Elemente berechnet werden. Dies wirkt sich möglicherweise negativ auf die Rentabilität des gesamten Prozesses aus (Mechtcherine 2019, S. 27).

Die Robotikkonzepte für den großflächigen Druck von Gebäuden direkt auf der Baustelle unterliegen anderen Bedingungen wie diejenigen von Industrierobotern in Produktionshallen. Folgende Kriterien sind von Bedeutung:

- › raue Umgebung, Schmutz, Wetter;
- › erforderliche Maschinenmobilität für schnellen Baustellenwechsel;
- › häufige Montage und Demontage;
- › Notwendigkeit einer einfachen Handhabung für Reinigung und Wartung.

Ein anderer Ansatz ist deshalb, gängige Baumaschinen, wie z. B. Turmdreh- oder Mobilkrane, Mobilbagger, Lader oder Autobetonpumpen, als Betondruckmanipulator zu verwenden (Mechtcherine 2019, S. 29). Diese Baumaschinen wurden speziell für dieses raue Arbeitsumfeld entwickelt und haben sich über viele Jahre bewährt (Kap. 6). Da die meisten Baumaschinen nicht über die für den Betondruck erforderliche Präzision verfügen, müssen sie entsprechend modifiziert werden.

Ziel der Anpassungsarbeiten an solchen Baumaschinen ist es, möglichst wenige bauliche Veränderungen vorzunehmen und durch gezielte Modifikationen des Antriebs- und Steuerungssystems oder einzelner Kompo-

⁶⁸ <https://cobod.com/bod2-specifications/> (06.11.2019)

⁶⁹ <https://www.contourcrafting.com/building-construction> (22.3.2021)

nenen die Baumaschinen für den Betondruck umzurüsten. Beim CONPrint3D der Technischen Universität Dresden wird eine Autobetonpumpe als großflächiger Manipulator für den Druckkopf verwendet (Mechtcherine et al. 2019b; Mechtcherine/Nerella 2019). Einerseits verfügt die Autobetonpumpe über die erforderliche Betonförder-technik und andererseits über einen langen, klappbaren Ausleger, dessen Reichweite (Gesamtlänge bis zu 70 m) groß genug ist, um mehrstöckige Gebäude zu drucken.

Bei fast allen auf Extrusion basierenden Druckverfahren mit Beton befindet sich die Pumpe zum Fördern des Betons außerhalb des Druckbereichs (Mechtcherine 2019, S. 29 f.). Der Frischbeton wird meist über einen relativ großen Abstand zum Druckkopf durch einen Schlauch gepumpt. Die Gleichmäßigkeit des Materialflusses, das Einhalten des vorgegebenen Bewegungsgeschwindigkeitsprofils des Druckkopfes sowie die Maßgenauigkeit und Formstabilität der abgelegten Filamente sind entscheidend für die präzise Umsetzung des digitalen Bauplans.

Die Größe (Querschnittsfläche und Breite-zur-Höhe-Verhältnis) des abgelegten Filaments bestimmt die Druckauflösung. Mit zunehmender Feinheit der Filamente können zwar auch komplexere Geometrien und feinere Details realisiert werden, die Druckgeschwindigkeit nimmt jedoch ab, und die Betonzusammensetzung wird immer feinkörniger. Die Synchronisation zwischen der aktuellen Druckgeschwindigkeit, dem gewünschten Schichtquerschnitt und der konkreten Förderrate stellt eine große Herausforderung für den Druckprozess dar. Unzureichende Förderraten führen zu Lücken in der Druckschicht und im schlimmsten Fall zum Versagen des gesamten Betonelements. Im Internet werden Druckgeschwindigkeiten von bis zu 1 m/s für die Filamentablage aufgeführt,⁷⁰ in wissenschaftlichen Arbeiten z. B. der Technischen Universität Dresden werden realisierbare Druckgeschwindigkeiten von 0,15 m/s für 5 cm hohe Filamente angegeben. In der Praxis dürfte nicht nur die Druckgeschwindigkeit die Bauzeit (Kasten 4.2) bestimmen, da möglicherweise zyklisch Pausen zum Nachhärten notwendig sind, um die Formstabilität der unteren verbauten Filamente nicht zu gefährden.

Kasten 4.2 Vergleich der Bauzeit von konventioneller zu 3-D-Betontechnologie

Im Folgenden wird für ein einstöckiges Modellgebäude mit 10 m x 10 m Grundfläche die Bauzeit für konventionell errichtete Außenwände (Höhe 2,5 m) aus Ortsbeton ermittelt. Die Abschätzung beruht auf einem vom TAB durchgeführten Experteninterview und Plausibilitätsüberlegungen. Darüber hinaus wird versucht, die entsprechende Bauzeit in 3-D-Technologie grob zu berechnen – basierend auf Angaben aus Nerella et al. (2020) und ergänzt durch eigene Abschätzungen. In beiden Fällen ist eine Betonbodenplatte schon vorhanden.

Im konventionellen Bau müssen die vom Bauhof zur Baustelle angelieferten und entladenen Schalungs- und Kleinteile per Kran ferngesteuert zuerst zu einer äußeren Schalung zusammengefügt, die Abstandshalter angebracht und die innere Schalung errichtet werden. Die Schalung muss ausgerichtet und korrigiert, danach das Schalungsöl auf die Innenflächen aufgespritzt werden. Für diese Arbeitsschritte können insgesamt ca. 20 Stunden angesetzt werden. Die Verfüllung der Schalung mit Transportbeton ist nach 3 Stunden beendet. Am nächsten Tag kann die Schalung gelöst und je nach Verhältnissen am 3. oder 4. Tag die Schalung abgebaut werden, wofür ca. 2 Stunden notwendig sind. Die Außenwände sind nach Entfernung der Schalung somit in ca. 3,5 bis 4,5 Tagen errichtet.

Mit der 3-D-Betontechnologie werden bedeutend kürzere Bauzeiten erwartet. Überträgt man die Angaben aus Näther et al. (2017) zu einer modellierten Etage auf das hier diskutierte einstöckige Modellhaus, so sind für die Errichtung der Außenwände einschließlich der notwendigen Rüstzeiten (Positionierung, Kalibrierung, Justierung etc.) und Reinigungszeiten in etwa 1 Tag anzusetzen. Doch wie realistisch ist diese Angabe?

In der Abschätzung wird angenommen, dass eine stabile sechs- oder achtbeinige Spinne als Gerüst verwendet wird – ein Portalkran mit Schienen wird vom TAB als zu aufwendig eingeschätzt. Die Teile des Gerüsts müssen an die Baustelle antransportiert, entladen und mit einem Kran, das angehende Geschoss im Volumen umfassend, zusammengesetzt werden. Anschließend erfolgt das Anbringen des Düsenkopfs in den Manipulator; die Schläuche für die Beton- und eventuell die Chemikalienzufuhr müssen angeschlossen werden. Abschließend ist das Gesamtsystem zu prüfen und die Digitaltechnik zu initialisieren. Der angelieferte Frischbeton muss möglicherweise auf die örtlichen Witterungsverhältnisse hin konfektioniert werden, bevor mit dem Druck begonnen werden kann. Für Anlieferung und Aufbau werden 7 Stunden angesetzt, der eigentliche Betondruck erfolgt dann in weniger als 6 Stunden. Im Modell werden Pausen/Unterbrechungen von insgesamt

⁷⁰ https://www.bft-international.com/de/artikel/bft_Flexible_Formen_bei_Betonbauwerken_dank_3D-Druck_moeglich_3242360.html (12.3.2021)

1 Stunde sowie eine Ruhezeit über Nacht angenommen, bevor mit der Nacharbeitung der Betonflächen (innen wie außen) am nächsten Tag begonnen werden kann, für die insgesamt in erster Näherung 8 Stunden berechnet werden. Derweil kann der Abbau des Manipulators/Gerüsts stattfinden. Die reine Bauzeit der 3-D-Technologie bis zum Ende der Nacharbeiten ohne Ruhephasen beträgt danach ca. 22 Stunden. Bei Berücksichtigung der Ruhephasen dürften Gesamtzeiten für die Errichtung von 1,5 bis 2 Tagen realistisch sein.

Auf der Basis der Modellrechnungen ergeben sich für die 3-D-Technologie somit Einsparungen in der Errichtungszeit der reinen Betonstrukturen von ca. 50%. Dies darf aber nicht mit einer entsprechenden Verkürzung der Gesamtbauzeit für ein Bauwerk gleichgesetzt werden (wie teilweise in den Medien propagiert; 3Dnatives 2018), da der Rohbau in der Regel bei Massivbau nur einen Anteil von ca. 10 bis 20% der gesamten Bauzeit von der Planung bis zum Innenausbau einnimmt.⁷¹

4.2.4 Die Bewehrung (Verstärkung) von 3-D-Beton

In der konventionellen Betontechnologie spielen mit Stahl verstärkte Bauteile für die Herstellung tragfähiger Baukonstruktionen eine maßgebliche Rolle. Der Grund ist, dass Beton zwar eine relativ hohe Druckfestigkeit besitzt, jedoch nur eine vergleichsweise niedrige Festigkeit auf Zug. Stahl weist dagegen eine hohe Zugfestigkeit auf. Bei auf Zug beanspruchten Stellen eines Bauteils aus Stahlbeton nimmt der Stahl die entsprechenden Kräfte auf, während in den übrigen Bereichen des Bauteils die Druckfestigkeitseigenschaften des Betons überwiegen. Da die meisten der bisher vorgestellten 3-D-Betonansätze auf dem herkömmlichen Bindemittelparadigma (Portlandzementklinker) beruhen, wird für konstruktive Anwendungen mit 3-D-Beton eine Bewehrung unerlässlich sein. Daher ist es erforderlich, die Entwicklung von Technologien für bewehrten 3-D-Beton zu intensivieren (Mechtcherine 2019, S. 44 ff.). Die Mehrzahl der bisher bekannten 3-D-Betonverfahren bezieht sich jedoch auf den unbewehrten Beton, während die vorgeschlagenen Lösungen für bewehrten 3-D-Beton noch deutlich dahinter zurückbleiben (Mechtcherine/Nerella 2018b). Eine aktuelle Übersicht zum Thema Bewehrungsintegration sowie einen darauf basierenden Klassifizierungsvorschlag der einschlägigen Ansätze ist in Mechtcherine et al. (2021) zu finden.

Integration konventioneller Stahlbewehrung

Der offensichtlichste und auch am häufigsten in Demonstrationsprojekten praktizierte Ansatz ist die Integration einer Stahlbewehrung in die gedruckte 3-D-Struktur, wie sie im konventionellen Betonbau üblich ist (Mechtcherine 2019, S. 44 f.). Dies kann gemäß den heutigen Regeln der Technik (z. B. DIN 488; DIN EN 1992-1) erfolgen. Damit hat diese Art der Bewehrungsintegration den Vorteil, dass im Hinblick auf die Bemessung, d. h. die Festlegung von Maßen, direkt an das bestehende Regelwerk angelehnt werden kann.

Horizontale Stahlstäbe können bei den 3-D-Druckverfahren, die auf Extrusion basieren, zwischen die einzelnen Betonschichten gelegt werden. Dies kann diskontinuierlich nach Fertigstellung der entsprechenden Abschnitte erfolgen oder kontinuierlich, indem ein Stahldraht durch den Druckkopf direkt während der Ablage des Betonfilaments platziert wird. In beiden Fällen soll der Durchmesser des Stabes bzw. Drahtes in passendem Größenverhältnis zur Breite und Höhe des Betonfilaments sein.

Zur Integration einer vertikalen Stahlbewehrung lassen sich Hohlräume, Öffnungen oder Aussparungen nutzen (Mechtcherine 2019, S. 45 f.). Öffnungen und Kanäle für Bewehrung können diskret durch die 3-D-Extrusion abgebildet werden. Beispielsweise können vertikale (aber natürlich auch horizontale) Bewehrungsstäbe in die durch die gedruckten Konturen entstandene Schalung positioniert werden, bevor diese mit (konventionellem) Beton befüllt wird. Anstatt der schlaffen Bewehrung kann auch Spannbewehrung eingesetzt werden. Eine ähnliche Strategie kann auch bei der Herstellung der Bauteile durch selektive Bindung verfolgt werden. Die Öffnungen und Durchlässe zur nachträglichen Unterbringung der Bewehrung lassen sich mit diesem Verfahren sehr gut abbilden.

Ein Verfahren zur Ablage von 3-D-Betonfilamenten mit gleichzeitigem Umschließen der Bewehrung wurde von der chinesischen HuaShang Tengda Ltd. entwickelt und umgesetzt (Mechtcherine 2019, S. 46). Es dient der

⁷¹ <https://www.weissenseer.com/stressfrei-haus-bauen-dieser-zeitplan-ist-realistisch/> (12.3.2021)

Herstellung monolithischer Bauelemente mit vertikaler und horizontaler Bewehrung. In einem ersten Schritt werden Stahlmatten montiert. Anschließend wird die Bewehrung beidseitig durch eine schichtweise Ablage von Beton umschlossen. Derzeit weist dieser Ansatz noch Einschränkungen auf. Die Höhe einzelner Stahlmatten ist durch die Größe der Düse begrenzt. Auch können maximal nur eine oder zwei Bewehrungslagen integriert sowie ausschließlich vertikale Wände realisiert werden.

Ein Umschließen der zuvor positionierten Stahlbewehrung ist auch bei der Anwendung adaptiver Gleitschälungsverfahren möglich.

Integration von Kurzfasern zur Bewehrung von 3-D-Beton

Statt der Bewehrung mit langen Stäben oder Matten kann eine Verstärkung bis zu einem bestimmten Grad auch mithilfe von homogen in die Betonmatrix verteilten Kurzfasern aus Polymeren, wie z.B. Polyethylen hoher Dichte, Hochleistungspolymeren, wie z.B. Poly(p-phenylen-2,6-benzobisoxazol) (PPBO, PBO), oder Carbonkurzfasern realisiert werden. Ein solcher Ansatz kann am einfachsten mit dem 3-D-Druckprozess verknüpft werden, indem kurzfaserbewehrter Beton anstelle von einfachem Beton für den 3-D-Druck verwendet wird (z.B. Nematollahi et al. 2018; Ogura et al. 2018). Die erheblichen Fortschritte auf dem Gebiet der Entwicklung von faserverstärktem Beton und dessen zunehmendes Leistungsvermögen machen diesen Ansatz für 3-D-Anwendungen interessant, wo eine höhere Festigkeit bei geringem Bauteilvolumen gefordert werden. Hochleistungspolymere und Carbonfasern sind jedoch sehr aufwendig in ihrer Herstellung, erfordern nichtregenerative Ressourcen (Erdöl) als Rohstoffe und haben z. T. einen sehr hohen energetischen Rucksack (Kap. 7.3.2). Für den Einsatz von Carbonkurzfasern im Beton kommen damit eigentlich nur Faserabfälle infrage, die jedoch mengenmäßig sehr begrenzt sind. Weltweit werden jährlich ca. 300 Mio. t Kunststoffe hergestellt, davon ca. 700.000 t Hochleistungspolymere (Grasmeder 2019). Je leistungsfähiger der Kunststoff als Werkstoff ist, desto aufwendiger ist dessen Herstellung mit in der Regel komplexeren Monomeren als Ausgangsverbindungen. Die Herstellungskosten sind somit hoch und lohnen sich nur für Produkte hoher Wertschöpfung. Des Weiteren stellt sich die Frage, was am Ende der Nutzungsphase eines Bauwerks mit dem Betonbruch aus Faserbeton geschehen soll. Aus heutiger Sicht ist das Recycling dieser Materialien weitgehend ungeklärt (Kap. 7.3.2). Dieser Betonbruch kann nicht ohne Weiteres wiederverwendet werden und muss aufwendig behandelt werden (Rehbock 2018). Im Vergleich zu den Massenstoffen im Bauwesen sind solche Produkte somit nur für Spezialanwendungen vertretbar.

Zudem gibt es einige betontechnische Besonderheiten zu beachten, die das potenzielle Spektrum dieses Ansatzes auch begrenzen. Zum einen ist man selbst mit Hochleistungsfasern – bei realistischen Faserkonzentrationen in Betonmischung – nicht in der Lage, die Stahlstabbewehrung in den meisten heutigen Konstruktionen im Hinblick auf ihre Tragfähigkeit zu ersetzen (Mechtcherine 2019, S. 48). Zum anderen steigt mit Faserzugabe die Gefahr von Fugen zwischen den einzelnen Betonschichten, die die Festigkeit sowie die Frost- und Feuchtigkeitsbeständigkeit negativ beeinflussen.

Neuartige, generative Bewehrungssysteme

An der ETH Zürich wurde ein Netzschalungsverfahren (Mesh Mould) entwickelt, mit dem vollautomatisch komplexe Bewehrungsstrukturen aus Stahldraht gefertigt werden können.⁷² Ein Spezialroboter kann den Draht ziehen, schneiden, biegen sowie schweißen und sich dabei autonom bewegen (Hack et al. 2017). Hierbei kreiert der Roboter automatisch ein dichtes komplexes und räumliches Netz. Nach der Fertigstellung der Netzschalung wird Beton entweder von oben oder von den Seiten (in diesem Fall durch das Netz) zugeführt. Im Rahmen des Forschungsbaus »DFAB HOUSE«⁷³ der ETH Zürich zur Erprobung digitaler Bauprozesse in Dübendorf (Schweiz), wurde diese Technologie demonstriert. Derzeit gilt die Einschränkung, dass die Herstellung der Bewehrung durch Spezialroboter noch sehr langsam ist und sich diese Technik aus wirtschaftlicher Sicht nur bei sehr komplexen Geometrien lohnt (García de Soto et al. 2018).

Es gibt Forschungsansätze, die Stahlbewehrung beliebiger Form durch 3-D-Druck anzufertigen (Mechtcherine/Nerella 2018a). Eine solche Technologie könnte speziell für geometrische komplexe Konfigurationen der Bewehrung einschließlich der Integration von Befestigungs- und Installationselementen interessant sein.

⁷² <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/324.html> (12.3.2021)

⁷³ <https://dfabhouse.ch/de/dfab-house/> (12.3.2021)

Dass mit ähnlichen Ansätzen auch große Bewehrungsstrukturen gefertigt werden können, wurde durch die niederländische Firma MX3D demonstriert, die eine bewehrungsnetzartige Struktur für architektonische Zwecke aus Edelstahl additiv herstellte.⁷⁴ Zwar sind die technischen Möglichkeiten des Verfahrens beeindruckend, die hohen Kosten, der Energieverbrauch und die relativ geringe Druckgeschwindigkeit schränken die praktische Nutzung jedoch ein. Der Einsatz des 3-D-Drucks von Stahl für Bewehrungen im Bauwesen erscheint aus heutiger Sicht nur für bestimmte Spezialanwendungen sinnvoll, nicht für die Massenanwendung (Mechtcherine 2019, S. 49).

Die vor Kurzem entwickelte mineralisch gebundene Carbonfaserbewehrung, bei dem Endlosfasern (Garne) eingesetzt werden, weist im Vergleich zu Stahlbewehrung oder bestehenden, kunststoffgebundenen Carbonbewehrungen beträchtliche Vorteile sowohl in Bezug auf die Verarbeitung als auch die mechanischen und dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften auf (Mechtcherine et al. 2019a u. 2020b). Der an der Technischen Universität Dresden entwickelte und zum Patent angemeldete Ansatz besteht darin, ein mineralisch imprägniertes Carbonfasergarn während des Druckprozesses in die Betonfilamente zu integrieren (Mechtcherine et al. 2019a). Zum einen kann die Bewehrung bereits in der Betondruckdüse in das Betonfilament integriert werden. Zum anderen ist es möglich, die Bewehrung auf einem zuvor gedruckten Betonfilament abzulegen und direkt mit einem weiteren zu überdecken. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass die Bewehrungsablage unabhängig von der Betonage durchgeführt werden kann und so die Überlappung verschiedener Bewehrungsstränge möglich ist. Derzeit arbeiten die Forscher/innen am Institut für Baustoffe der Technischen Universität Dresden an einem Druckverfahren, bei dem die Bewehrung auch vertikal abgelegt werden kann (Mechtcherine 2019, S. 50).

Die mineralisch gebundene Carbonfaserbewehrung (Mineral-Impregnated Carbon Fiber Reinforcement – MCF) kann auch zur automatisierten Herstellung von komplexen Bewehrungselementen genutzt werden, die erst in einem weiteren Schritt (digital) mit Beton umschlossen werden. Wissenschaftliche Untersuchungen zu MCF deuten auf eine Reihe von Vorteilen (bessere Korrosionsbeständigkeit, Haftung zur Betonmatrix, Gewicht) von Bewehrungen aus MCF gegenüber Stahl hin (Mechtcherine et al. 2019a). Es konnte z. B. durch die Verwendung mineralisch getränkter Carbonfasern anstelle von Stahl eine Gewichtsreduzierung bei Balkonbewehrungen von über 90% erreicht werden (Mechtcherine 2019, S. 50).

4.2.5 Anwendungspotenziale und -perspektiven des 3-D-Betondrucks

Vom Prinzip her ermöglicht der 3-D-Betondruck große architektonische Gestaltungsmöglichkeiten und eine schnelle Bauwerkerrichtung, wie in vielen internationalen Pressemitteilungen zu Demonstrationsobjekten propagiert wird. Zweifelsohne hat der 3-D-Betondruck von großformatigen Bauteilen in den vergangenen Jahren beachtliche Fortschritte erzielt. Auch wenn momentan 3-D-gedruckte Konstruktionen selbst kleineren Formats immer noch zu einer Nischenanwendung gehören und meistens dekorative, gestalterische Aufgaben zur Anwendung kommen, hat die Anzahl der großformatigen Demonstrationsprojekte, die auch statische Funktionen übernehmen, in den letzten Jahren rapide zugenommen. Bis ein praxistaugliches und erprobtes Verfahren auf Baustellen eingesetzt werden kann, ist es jedoch noch ein längerer Weg.

Aus der Betrachtung der rasanten Entwicklung des wissenschaftlichen Kenntnisstands und der praktischen Erfahrungen mit dem 3-D-Betondruck im Demonstrationsbereich gehen Fachleute davon aus, dass die bestehenden *technischen* Einschränkungen und Herausforderungen durch weitere gezielte Bemühungen zur Verbesserung der gesamten Prozesskette einschließlich Maschinenteknik und Material überwunden werden können. Andere Aspekte betreffen die ökonomischen Realisierungsbedingungen, das Potenzial zur Marktdurchdringung sowie die Einordnung der Technologie unter dem Gesichtspunkt Nachhaltigkeit. Zu welchem Zeitpunkt der 3-D-Betondruck über die bereits bestehenden Nischenanwendungen hinaus eine echte Alternative sowohl in technischer als auch wirtschaftlicher Hinsicht zu den konventionellen Bauverfahren sein wird, lässt sich nicht genau vorhersagen (Mechtcherine 2019, S. 52).

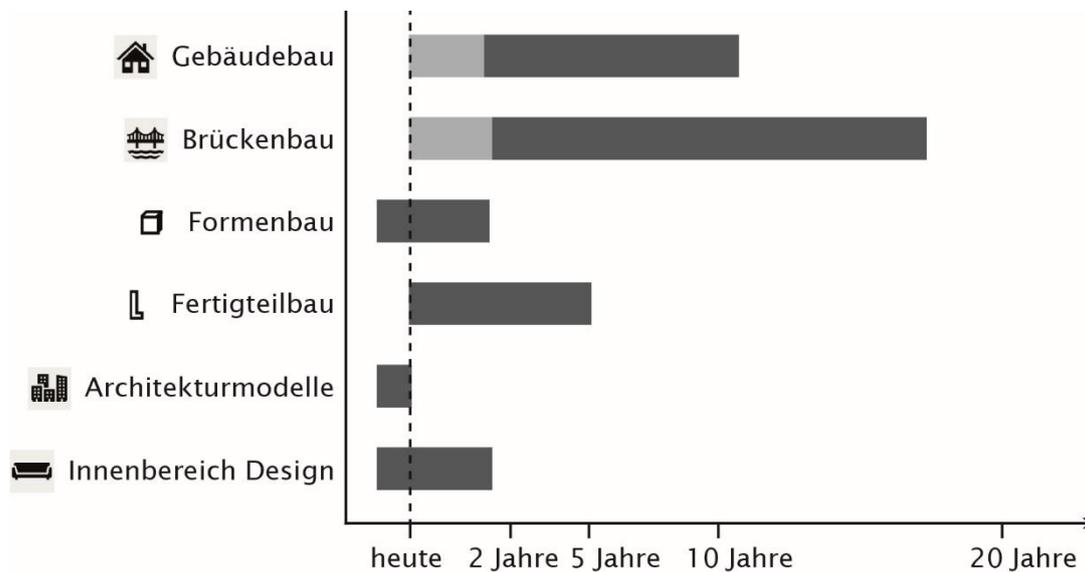
Die Boston Consulting Group (Laubier et al. 2018) stellte 2018 eine Studie über den 3-D-Druck in der Bauindustrie im globalen Kontext vor. Für sechs Hauptanwendungen (Gebäude, Brücken, Schalungen, Bauteile, Architekturmodelle und Innendesignelemente) wurden Einschätzungen zur wirtschaftlichen Umsetzbarkeit des 3-D-Drucks eingeholt. Erwartet wurde, dass ab 2020 die ersten Gebäude im 3-D-Druck kommerziell errichtet werden und spätestens ab 2030 der 3-D-Druck sein volles Potenzial für eine wirtschaftliche Umsetzbarkeit erreicht (Abb. 4.4). Bei Brücken wäre ab 2024 mit ersten konkreten Projekten zu rechnen. Auf welche Länder und auf

⁷⁴ <https://mx3d.com/projects/dragon-bench/> (12.3.2021)

welche Typen von Gebäuden bzw. Brücken sich die Einschätzung bezieht, wird nicht erläutert. Es sei auch angemerkt, dass sich Laubier et al. (2018) in ihrem Bericht nicht auf 3-D-Druck mit Beton beschränken.

Vor dem Hintergrund der zuvor aufgeführten Herausforderungen und vorhandenen Einschränkungen erscheinen diese Zeithorizonte für 3-D-Beton wenigstens für Deutschland kaum haltbar, auch wenn derzeit einzelne Pilotprojekte für zwei- und sogar dreigeschossige Musterhäuser in Beckum (Straßmann 2020) in Nordrhein-Westfalen und im schwäbischen Weißendorn (Fuchs 2020) laufen, bei denen angedacht ist, dass sie zu einem späteren Zeitpunkt bewohnt werden. Es stellt sich die Frage, inwieweit die notwendigen Prüf- und Zulassungsverfahren bei unregelmäßigen Bauprodukten (3-D-Beton) und Bauarten (3-D-Druck) in diesen Einschätzungen berücksichtigt wurden. Um in Deutschland nicht geregelte Bauprodukte verwenden zu können, wird entweder ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis, eine Zustimmung im Einzelfall oder die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung benötigt. Ähnliches gilt für die Bauarten. Die Zuständigkeit für die Erteilung nationaler Zulassungen für Bauprodukte und Bauarten haben die obersten Bauaufsichtsbehörden der Länder dem Deutschen Institut für Bautechnik in Berlin übertragen. Bis zur allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, die relevante Eigenschaften des Bauprodukts, die Verwendungsbereiche sowie Aspekte der Verarbeitung, Transport, Lagerung etc. regelt, dürften im Fall des 3-D-Betons in Deutschland realistisch von Zeiträumen auszugehen sein, die 2030 deutlich überschreiten. Bis zu einer Normung dürfte es dann noch deutlich länger dauern,⁷⁵ denn in Normen werden im Allgemeinen nur solche Regeln aufgenommen, die allgemein gebräuchliche und bewährte Produkte oder Verfahren beschreiben, wogegen technische Regeln in den Zulassungen neues, bislang Ungeregeltes behandeln.⁷⁶ Für alle außerhalb der Norm liegenden Baustoffe und Bauverfahren gilt, dass Nachweise zu den geforderten bautechnischen Eigenschaften an konkreten Prototypbauteilen erbracht werden müssen. Das macht den gesamten Prozess langsam und teuer.

Abb. 4.4 Einschätzung zur Umsetzbarkeit des 3-D-Drucks in der Bauindustrie



hellgraue Balkenteile: Zeitraum von Prototypen und Demonstrationsprojekten
 dunkelgraue Balken: Zeitpunkte der kommerziellen Übernahme (linker Rand),
 Entfaltung des vollen Potenzials (rechter Rand)

Einige Anwendungsfelder haben die wirtschaftliche Umsetzbarkeit erreicht.

Eigene Darstellung nach Laubier et al. 2018

⁷⁵ Sind doch schon für inkrementelle Innovationen von Baustoffen für die Normung 10 bis 12 Jahren anzusetzen, wie am Beispiel der Einführung von Kalksteinportlandzementen gezeigt werden kann.

⁷⁶ https://www.secupedia.info/wiki/Zulassung,_allgemeine_bauaufsichtliche (12.3.2021)

Laubier et al. (2018) zufolge beschränken sich die Unternehmen weltweit auf den 3-D-Druck von eher kleineren Gebäuden, vor allem auf kompakte, einstöckige Häuser. In den Medien stießen Gebäude des chinesischen Unternehmens WinSun auf großes Interesse (u. a. wurde auch ein 5-stöckiges Wohngebäude errichtet). Bei diesen Demonstrationsbauwerken handelt es sich allerdings um Bauwerke, die auf dem Firmengelände aus gelieferten 3-D-Fertigbauteilen konventionell zusammengesetzt wurden. Auch die Decken waren konventionell hergestellt. Laut Mechtcherine (2019, S. 53) halten die Angaben von WinSun zu möglichen Einsparungen an Bauzeit (50 bis 70%), Personal (50 bis 80%) und Ressourcen (30 bis 60%) einer näheren Prüfung nicht stand. Diese Problematik gilt für die allermeisten Pressemitteilungen und Internetauftritte zu Demonstrationsprojekten. Das erschwert den Versuch einer objektiven Einordnung der vorgestellten Ergebnisse. Des Weiteren existieren bislang kaum Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit des 3-D-Drucks.

4.3 Additive Fertigung mit anderen Materialien

Im Bauwesen werden auch andere Werkstoffe wie Metalle, Kunststoffe, Keramik, Glas und Holz breit verwendet. Die meisten grundlegenden Entwicklungen zur additiven Fertigung mit diesen Werkstoffen fanden und finden in anderen Industriebereichen als dem Bauwesen statt (TAB 2017). Jedoch sind in den letzten Jahren zahlreiche Versuche unternommen worden, die Potenziale dieser 3-D-Technologien für das Bauwesen zu demonstrieren. Dabei steht vor allem die Herausforderung auf der Agenda, Bauteile großen Maßstabs zu angemessenen Kosten zu realisieren.

4.3.1 Metalle

Die additiven Verfahren ermöglichen es, komplexe Metallteile zu einem niedrigeren Preis im Vergleich zu traditionellen Fertigungstechniken der Metallverarbeitung (wie dem Zerspanen, Fräsen oder dem Vakuumgießen) herzustellen. Insbesondere der Bereich Maschinenbau kann davon in hohem Maße profitieren. In der additiven Fertigung wird häufig Aluminium eingesetzt, insbesondere in Form von Knetlegierungen. Der am meisten verwendete Werkstoff in der additiven Metallfertigung ist jedoch Stahl, dessen Potenzial für das Bauwesen hier ausgeführt werden soll.

Auf dem Gebiet des 3-D-Metalldrucks sind hauptsächlich zwei Verfahren von Bedeutung: das selektive Sintern oder Schmelzen in Dünnbettverfahren und das Auftragsschweißen.

- › Beim Selective Laser Melting bzw. Lasersintern (SLS) entsteht ein physisches 3-D-Objekt infolge des Schmelzens eines metallischen Pulvers (Grieser 2019). Das virtuelle Objekt wird digital in einzelne Schichten geschnitten und entsprechend den Konturen der digitalen Datei aufgebaut. Nach dem Drucken wird das 3-D-Modell vorgehärtet und infiltriert, danach in einem Hochofen auf über 1.000 °C erhitzt und abschließend aufpoliert. Dieser Prozess dauert in der Regel mehrere Arbeitstage. Infrage kommt das Verfahren u. a. für die Bereiche Mode und Design, Architektur und industrielle Fertigung. Da es teuer, langsam und auf relativ kleine Produktabmessungen beschränkt ist, dürften die realen Anwendungen im Bauwesen eine Ausnahme sein.
- › Bei den auf dem Auftragsschweißen basierenden Verfahren erfolgt der Metalldruck in der Regel unter Verwendung der Lichtbogentechnik (Nördinger 2018). Während der klassische 3-D-Metalldruck per Laser auf Pulverbasis relativ langsam und teuer ist, bietet Metalldruck per Lichtbogen eine höhere Produktivität zu geringen Kosten. Die Abschmelzleistungen sind größer, und es können relativ hohe Schichtdicken aufgetragen werden. Außerdem können Roboter eingesetzt werden, was im Vergleich zu Pulverbettverfahren mehr Freiheitsgrade und Flexibilität ermöglicht. Das Verfahren gilt als geeignet für Prototyping und Kleinserien, um teure Spritzgusstechnologien zu umgehen (Mechtcherine 2019, S. 87).

Lichtbogenverfahren lassen sich bereits jetzt grundsätzlich zur Herstellung von ganzen Bauteilen und sogar Bauwerken durch 3-D-Metalldruck heranziehen. Im Herbst 2019 wurde der Beleg für die technische Anwendbarkeit der Lichtbogenverfahren zur Fertigung von großformatigen Bauelementen und sogar kleinen Bauwerken erbracht. So hat das niederländische Unternehmen MX3D auf der »Dutch Design Week« die erste 3-D-gedruckte Edelstahlbrücke vorgestellt.⁷⁷ Die Brücke erhielt den Namen »The Bridge« und zeigt mit einer Länge von 12 m ein

⁷⁷ <https://mx3d.com/projects/mx3d-bridge/> (12.3.2021)

geschwungenes Design. Mit den entwickelten 3-D-Druckern will MX3D mit Unternehmen wie Heijmans und Joris Laarman Labor weitere Brücken aus Stahl im 3-D-Druck bauen.⁷⁸

Wie Untersuchungen der Technischen Universität Darmstadt zu einer 3 m langen 3-D-Stahlbrücke gezeigt haben, verursacht der 3-D-Metalldruck einen hohen Energieverbrauch und benötigt eine lange Herstellungszeit (Feucht et al. 2019). Das Verfahren ist deshalb vor allem für ausgefallene Bauwerke mit einem hohen ästhetischen Anspruch relevant, bei denen Kosten lediglich eine untergeordnete Rolle spielen (Mechtcherine 2019, S. 90). Voraussichtlich werden auch in Zukunft ganze Bauwerke nur dann im 3-D-Verfahren hergestellt werden, wenn äußerst komplexe Geometrien angestrebt werden.

Ein größeres Potenzial des 3-D-Metalldrucks wird komplexen, maßgeschneiderten, topologisch optimierten Verbindungselementen für den Stahlbau nachgesagt. Hier stehen die Kosten bereits in einem guten Verhältnis zum Nutzen, denn die Herstellung komplexer Knotenelemente mit konventionellen Techniken ist ohnedies aufwendig und teuer. In Deutschland forscht z. B. die Technische Universität Darmstadt auf diesem Gebiet (Feucht et al. 2019). Während im konventionellen Stahlbau beispielsweise für die Verbindung zweier Träger zunächst Laschen aus Stahl ausgeschnitten werden müssten, die dann auf die zu verbindenden Teile geschweißt und mit Schrauben verbunden würden, könnte mit der neuen Technik ein optimiertes Verbindungselement direkt auf den Träger aufgedruckt werden. Aber auch hier befindet man sich noch in der Untersuchungs- und Demonstrationsphase.

4.3.2 Kunststoffe

Zu den sehr häufig eingesetzten Kunststoffen für den industriellen 3-D-Druck gehören Polyamidkunststoffe. Diese werden von SLS-3-D-Druckern verarbeitet und eignen sich besonders gut für leichte, bewegliche Bauteile. Acrylnitril-Butadien-Styrol ist das Material der Wahl im »Fused Deposition Modeling«⁷⁹ (auch als FDM-3-D-Druck bekannt) und zeichnet sich besonders durch große Härte und gute Kratzfestigkeit aus.

Während sich der 3-D-Druck mit Kunststoffen in vielen Industrien und sogar im Hobby- bzw. Bastlerbereich inzwischen etabliert hat, sind die Anwendungen im Bauwesen noch rar; eine Ausnahme ist der 3-D-Druck von Architekturmodellen. Im Gegensatz dazu spielen beim Polymerdruck von realen Bauwerken die erforderliche Größe der Bauteile (und entsprechend des 3-D-Druckers), Materialkosten und Produktivität in Bezug auf die Herstellung eine zentrale Rolle. Dazu kommen die Anforderungen an bestimmte mechanische Eigenschaften und die Sicherung der Dauerhaftigkeit. Schließlich ist die Frage der Nachhaltigkeit desstoffeinsatzes bei großmaßstäblichen Anwendungen überaus wichtig.

Ein Highspeed-3-D-Drucker für Hochleistungskunststoffe wurde z. B. von Forscher/innen des Fraunhofer Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in Chemnitz entwickelt (Winkelmann 2019). Es werden verschiedene Kunststoffe verarbeitet, von thermoplastischen Elastomeren bis hin zu Hochleistungskunststoffen mit 40 % Kohlenstofffaseranteil. Diese Materialien sind auch für die Bauindustrie relevant, lassen sich bisher jedoch mit klassischen 3-D-Druckern nicht verarbeiten. Ihr Anwendungspotenzial liegt z. B. in der Herstellung von Bewehrungs- und Einbauteilen sowie Verankerungssystemen.

4.3.3 Sonstige Materialien

Die additive Fertigung mit *Glas* ist ein potenzieller Weg zur Herstellung von kundenspezifischen Glasobjekten, die über hochkomplexe Geometrien verfügen (Jacqueline O. 2019). Benötigt wird dafür ein Ofen, der als Extrusionseinheit dient.⁸⁰ Die Technologie steckt noch in den Kinderschuhen, und es gibt kaum Drucker, die Bauteile in der für das Bauwesen relevanten Größe herstellen können (Mechtcherine 2019, S. 100). Die prinzipielle Machbarkeit wurde jedoch bereits punktuell anhand von hochwertig gestalteterischen Objekten demonstriert (Klein et al. 2015; Kotz et al. 2017). Prinzipiell können auch topologisch optimierte tragende Stützen aus Glas hergestellt

⁷⁸ <https://mx3d.com/dragon-bench/> (12.3.2021)

⁷⁹ Unter FDM wird ein 3-D-Fertigungsverfahren verstanden, mit dem ein Bauteil Schicht für Schicht aus einem schmelzfähigen Kunststoff oder aus geschmolzenem Metall aufgebaut wird.

⁸⁰ <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/3d-druck-glas/> (12.3.2021)

werden, was aber bisher noch nicht ausgeführt wurde. Selbstredend würde es sich in diesem Fall um ganz besondere, seltene und teure Anwendungsfälle handeln.

Das italienische Unternehmen WASP s.r.l. hat den bisher weltweit größten 3-D-Drucker BigDelta mit 6 m Höhe gebaut, mit dem sich Häuser auf der Basis von *Lehm* errichten lassen.⁸¹ Aus einer Mischung aus Lehm, Naturfasern und Schlamm werden die Strukturen schichtweise aufgebaut. Im Oktober 2014 wurde das Konzept für gedruckte Lehmarchitektur auf der »Rome MakerFaire« in Rom präsentiert.⁸² Ziele sind die Erprobung der Technologie und die Vorstellung alternativer Konzepte in Bezug auf Bautechnologien. Mit der neuen Bauweise soll perspektivisch insbesondere für Entwicklungsländer kostengünstig Wohnraum mit den Ressourcen, die vor Ort vorhanden sind, hergestellt werden können.

Konventionell bestehen *Mauerziegel* aus Tonmaterialien. An der Technischen Universität Darmstadt wird zusammen mit der Unipor-Ziegel-Gruppe (Verbund mittelständischer Ziegelunternehmen) ein Forschungsprojekt durchgeführt, das den 3-D-Druck für die Herstellung von Mauerziegeln nutzbar machen soll (Grimm 2019). Perspektivisch sollen so Ziegel bzw. einzelne Gebäudebausteine, deren Serienproduktion auf einer konventionellen Fertigungsanlage unwirtschaftlich wäre, im 3-D-Druckverfahren produziert werden können. Die 3-D-Drucktechnik kann potenziell bei kleineren Serien oder Unikaten eingesetzt werden. So sollen baukeramische Erzeugnisse mit besonderem Design, die mit heutigen Verfahren nicht möglich sind, sowie auch die bauklimatische Optimierung von Mauerziegeln realisiert werden.

Die Verwendung von *Holz* in der additiven Fertigung eröffnet die Möglichkeit, einen nachwachsenden Rohstoff einzusetzen. Erste positive Ergebnisse wurden 2010 gemeldet, als die chinesische Northeast Forestry University eine Studie über die Verwendung von Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffen in einem Extrusionsverfahren veröffentlichte (Kai et al. 2010). Heute sind zahlreiche Aktivitäten zur additiven Herstellung von Holz zu beobachten (Kohl et al. 2018). So sind bereits Werkstoffe auf dem Markt erhältlich, die typischerweise etwa 40 % Holzpartikel enthalten. Die Kunststoffkomponente von Technologien wie »Fused Filament Fabrication«⁸³ mit »Wood Plastic Composites« kann auch auf Holz oder anderen pflanzlichen Rohstoffen basieren (Dong et al. 2018). Die wesentliche Herausforderung liegt in der Wahl eines geeigneten Bindemittels, da die üblichen Duroplaste der Holzwerkstoffproduktion aus prozesstechnischen Gründen nicht eingesetzt werden können. Die Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Entwicklung von Holzpartikeln, die im Verbund mit Polymeren eingesetzt werden können und bis zu 90 % Holzanteil im Verbundwerkstoff ausmachen. Das zugrunde liegende Verfahren lässt sich dabei in die Kategorie selektive Bindung einordnen.

Inzwischen gibt es bereits kommerzielle Anbieter für den 3-D-Druck mit Holz oder Holzverbundstoffen im Kleinformat. Im Fokus der Forschung und Entwicklung stehen die Bereiche Möbel und Innenausbau. Nur wenige der Aktivitäten zur additiven Herstellung von Holz beziehen sich ausdrücklich auf Anwendungen im Bauwesen (Cepeda 2012; Henke et al. 2016; Kaufhold et al. 2019). Zwar steht die Anwendung in der Bauindustrie bisher noch aus, Anwendungspotenziale, wie z. B. temporäre und vollständig rezyklierbare Stützstrukturen für auskragende Betonstrukturen (Kaufhold et al. 2019), scheinen aber grundsätzlich durchaus vorhanden.

4.4 Fazit und Handlungsfelder

In additive 3-D-Fertigungsverfahren für konstruktive und nichtkonstruktive Bauteile sowie in neue Verbundwerkstoffe für die Erstellung von Gebäuden werden große Erwartungen gesetzt, um die vergleichsweise niedrige Produktivität und Wertschöpfung in der Baubranche zu verbessern. So wird u. a. erhofft, mit diesen digitalen Ansätzen die Fertigstellung von Bauwerken effizienter und schneller bewältigen zu können.

Die 3-D-Druck-Aktivitäten konzentrieren sich vornehmlich auf Beton als etablierten Baustoff. So ist international eine rapide Zunahme an Demonstrationsprojekten zum 3-D-Betondruck von meist kleinen Gebäuden festzustellen, auch in Deutschland werden erste Pilotprojekte umgesetzt (Fuchs 2020; Mechtcherine 2019, S. 64 ff.; Straßmann 2020). In der Forschung zum 3-D-Druck mit Beton ist Deutschland gut aufgestellt und in manchen Bereichen sogar international führend. Medienwirksame Auftritte der 3-D-Entwickler/innen und involvierten Unternehmen im In- und Ausland implizieren eine schon sehr fortgeschrittene Technologie im Bauwesen

⁸¹ <https://www.3dwasp.com/en/ceramic-3d-printing-wasp-clay/> (12.3.2021)

⁸² <https://www.3dwasp.com/en/wasp-presents-the-maker-economy-starter-kit-at-rome-maker-faire-2016/> (12.3.2021)

⁸³ 3-D-Druckverfahren, bei dem kontinuierlich ein Filament aus einem thermoplastischen Material erzeugt wird.

jenseits der Proof-of-Principle-Phase. Die Einschätzung, dass eine industrielle Umsetzung unmittelbar bevorsteht, wird teilweise auch von einschlägigen Unternehmensberatungen geteilt (Laubier et al. 2018).

Allerdings halten diese Einschätzungen und Medienberichte einer näheren Prüfung nicht stand (Mechtcherine 2019, S. 53 f.). Der Überblick über den Stand der Technik sowie die Anwendungsperspektiven (Mechtcherine 2019, S. 70 ff.) und die Auswertung aktueller Fachliteratur führen zu dem Schluss, dass vor einer Massenanwendung der 3-D-Betontechnologie im Bauwesen noch große Herausforderungen und Hürden zu bewältigen sind. Neben ungelösten technologischen Fragen gehören dazu auch die Realisierungsbedingungen, wie Kosten- und Nachhaltigkeitsaspekte, sowie das Zulassungsprozedere. Folgende Aspekte sind von Bedeutung:

- › Als große technologische Herausforderungen an den 3-D-Frischbeton erweisen sich die z. T. gegensätzlichen Anforderungen an das zu druckende Material hinsichtlich guter Pumpbarkeit, der Realisierbarkeit einer kontinuierlichen und zügigen Materialablage sowie der sofortigen Verformungsstabilität (Robustheit) auch unter Last. Die Entwicklung von druckbarem Beton mit ausreichender Formstabilität und Dauerhaftigkeit ist für die verbreitete Anwendung der additiven Fertigung perspektivisch unerlässlich. Einige Einflussfaktoren, insbesondere Schwankungen der Umgebungsbedingungen, der Qualität der Rohstoffe sowie der Zusammensetzung der Mischungen, wirken sich entscheidend auf das Druckergebnis aus. Es existieren kaum Ergebnisse zur Robustheit von druckbaren Betonen (Mechtcherine 2019, S. 32). Die Auswirkungen des extrem schnellen Festigkeitsverlaufs auf Robustheit und Dauerhaftigkeit sind wenig erforscht (Mechtcherine 2019, S. 31 f.). Er stellt betontechnisch eine große Herausforderung dar, da im jungen und erhärteten Beton durch Eigenspannungen und äußere Belastung Risse entstehen können (Bosold/Grünewald 2020).
- › Untersuchungen zum 3-D-Beton wurden meist unter Labor- oder Technikumsbedingungen durchgeführt, jedoch nicht unter den Praxisverhältnissen einer Baustelle. Dies gilt auch für die verwendeten Druckköpfe, die in erster Linie für einen Laborbetrieb ausgelegt sind. Somit besteht die große Herausforderung, den 3-D-Druck in großem Maßstab auf Baustellen praxistauglich und prozessstabil zu implementieren. Dies betrifft insbesondere das Arbeiten unter den unterschiedlichsten Umweltbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind, Regen), Standortbeschränkungen (Zugänglichkeit, Abstand zu Transportanlagen usw.) und prozessbedingte Effekte (z. B. durch Fernpumpen, Hochdruckpumpen). Außerdem stellen Prozessunterbrechungen besondere Anforderungen an das Material-, das Maschinen- und das Baumanagement. Zu diesen Aspekten gibt es kaum Daten.
- › Ein wesentlicher Punkt ist das Fehlen von praxisgerechten Lösungen zur Bewehrung von 3-D-Beton zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Bauteilen. Zwar existieren als Ideen bereits zahlreiche Methoden zur Integration von Bewehrungen in den digitalen Betonbau. Aber keiner dieser Ansätze vermag das gesamte Spektrum relevanter Anforderungen, wie z. B. horizontale/vertikale bzw. schlaffe/vorgespannte Bewehrung, abzudecken. Es besteht ein erheblicher Forschungsbedarf vor allem in Bezug auf eine direkte Integration der Bewehrung in die additive Fertigung. Alternativen zur Stahlbewehrung wie neuartige Faser- und Textilbewehrungen (z. B. aus Carbongarnen) sind teuer und sehr energieintensiv in der Herstellung und erschweren das Rückführen von Altfaserbetonen in den Stoffkreislauf.
- › Derzeit ist in vielen Vorzeigeprojekten die 3-D-Technologie meist nur als Hybridtechnologie, d. h. nur in Kombination mit herkömmlicher Technologie, realistisch umsetzbar, weil z. B. die Decken als Fertigbetonteile oder konventionell über Schalung/Ortsbeton eingebracht werden müssen. Ein Gebäude mit all seinen tragenden, funktionalen Bestandteilen in einem Schuss zu drucken, ist aktuell kaum möglich. Außerdem ergeben sich hinsichtlich der geometrischen Gestaltung Beschränkungen, da sich mit 3-D-Druck bisher keine scharfen Ecken und Kanten im Gebäude fertigen lassen.

Vor dem Hintergrund der dargestellten ungelösten Probleme und vorhandenen Einschränkungen lässt sich festhalten, dass der 3-D-Druck mit Beton derzeit noch deutlich von einem praxistauglichen und erprobten Verfahren für den Masseneinsatz auf Baustellen entfernt ist, was sich mit der Einschätzung der Leopoldina deckt (Witt/Anton 2020). Für andere Werkstoffe, die ebenfalls für das 3-D-Druckverfahren geeignet sind (Metalle, Kunststoffe, Holz etc.), gilt diese Bewertung in noch stärkerem Maße. Dabei darf aber nicht außer Acht gelassen werden, dass es sich bei der additiven Fertigung – gemessen an den üblichen Innovationsspannen im Bauwesen – noch um eine sehr junge Technologie handelt, die in den letzten Jahren große Entwicklungssprünge gemacht hat (Mechtcherine 2019, S. 166). Prognosen zu den weiteren Anwendungsperspektiven sind folglich schwierig zu treffen. Voraussichtlich ist der 3-D-Druck auf der Baustelle nicht als Entweder-oder-Alternative zum modularen oder konventionellen Bauen zu sehen, sondern als weitere Komponente einer effizienteren Gestaltung diverser Baumaßnahmen. Das wahrscheinlichste Szenario für die Zukunft ist, dass für viele Anwendungen eine hybride

Bauweise die wirtschaftlichste Variante sein wird. Das heißt, bestimmte Bauwerkselemente werden auf der Baustelle gedruckt, während andere Elemente im Werk vorgefertigt und auf der Baustelle lediglich montiert werden.

Zweifelsohne bedarf es insgesamt noch intensiver Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, bevor additive Fertigungsverfahren im Bauwesen praxistauglich werden. Dabei sind die Materialforschung und -entwicklung von besonderer Bedeutung, wobei sich die Inkompatibilität mit den bestehenden Baunormen als eine besondere Anwendungshürde erweist. Im Einzelnen zeigen sich die beiden folgenden zentralen Handlungsfelder (dazu und zum Folgenden Mechtcherine 2019, S. 167 f. u. 171 f.):

- › *Forschung und Entwicklung*: Die Weiterentwicklung der datengeprägten additiven Fertigungstechnologien erfordert nicht nur ein kardinales Umdenken in Bezug auf bestehende Baukonzepte und -praktiken, sondern auch Innovationen im Bereich der Forschungsmethoden, vor allem hinsichtlich der Datenerfassung und -analyse (z. B. Erhebung und Auswertung digitaler Materialdaten durch Einsatz von Sensorik und KI. Insgesamt handelt es sich hier um eine interdisziplinäre Forschungs- und Entwicklungsaufgabe, die Expertise in den Bereichen Maschinenbau, Baustofftechnologie, Bauchemie sowie KI und Datenanalyse verlangt. Damit Innovationshürden abgebaut werden und substanzielle Erfahrungen mit vielversprechenden Ansätzen gesammelt werden können, sollte die Überführung neuer Baustoffe und konstruktiver Lösungen in die Praxis unterstützt werden. Zwei Bereiche sind hierbei angesichts der Bedeutung des 3-D-Betondrucks besonders hervorzuheben: neue mineralisch gebundene Baustoffe (vor allem Binde- und Zusatzmittel) für Massenanwendungen sowie innovative Bewehrungssysteme für Beton. Dem Aspekt Nachhaltigkeit sollte dabei besondere Aufmerksamkeit gelten, damit künftig verstärkt Baustoffe zum Einsatz kommen, die eine günstigere Klimabilanz aufweisen und kreislauffähig sind (dazu im Detail Kap. 7.3). Für den großmaßstäblichen Einsatz des 3-D-Betondrucks werden zudem Maschinenkonzepte benötigt, die auch den Druck größerer Bauteile bewerkstelligen können – auch hier besteht noch erheblicher Entwicklungsbedarf.
- › *Normung*: Beim Einsatz neuer Materialien in der Praxis entsteht fast immer das Problem, dass sie den bestehenden Baunormen nicht entsprechen. Erschwerend kommt hinzu, dass eine effiziente Ausnutzung der Leistungsfähigkeit neuer Baustoffe nur in Kombination mit neuen konstruktiven und statischen Lösungen möglich ist, die meist ebenfalls außerhalb des Geltungsbereichs bestehender Normen liegen. Um solche nicht geregelten Bauprodukte verwenden zu können, muss eine Zustimmung im Einzelfall oder eine (zeitlich begrenzte) allgemeine bauaufsichtliche Zulassung beantragt werden. So ist es auch bei der 3-D-Technologie. Das Zulassungsverfahren ist jedoch aufwendig und teuer, was die Anwendung in der Praxis erschwert und Innovationen ausbremst. Deshalb bedarf es einer zügigen Weiterentwicklung der Normung, welche die Besonderheiten der additiven Fertigung berücksichtigt, wobei alle an der Normungsarbeit beteiligten Akteure gefordert sind (Industrieverbände, Ingenieurkammern, staatliche Einrichtungen, Fachleute aus dem akademischen Bereich). Eine kardinale Verbesserung der Situation würde eine neue Normengeneration mit sich bringen, die konsequent auf leistungsbezogenen Nachweisverfahren der Materialeignung und Bauteilbemessung anstatt auf den derzeit dominierenden deskriptiven Vorgaben aufbaut.

5 Serielles und modulares Bauen

Dem seriellen und modularen Bauen wird großes Potenzial in Bezug auf Kostenreduzierung und Beschleunigung der Bauzeit nachgesagt (Memmler et al. 2017; Schwerdtner et al. 2018). Beim seriellen Bauen (Grimm 2018a) werden Gebäude nicht als Unikate geplant und errichtet, sondern in industriellen Fertigungsprozessen, wie man sie z. B. vom Automobilbau kennt, seriellement gefertigt. Das serielle Bauen kann somit als ein typologisches Programm verstanden werden, bei dem – unabhängig von der Bauweise – eine große Anzahl von Wohnungen nach gleichem Standard erstellt wird (Memmler et al. 2017). Beim modularen Bauen werden Teile des Bauwerks wie etwa die Gebäudehülle aus industriell vorgefertigten Bauteilen, den Modulen, nach dem Baukastenprinzip zusammengesetzt. Da serielles Bauen ebenfalls oft auf vorgefertigte Bauelemente zurückgreift, sind die Grenzen zwischen seriellem und modularem Bauen fließend.

Die Anfänge dieser Bauweisen lassen sich auf das in den 1910er bis 1930er Jahren in Deutschland entwickelte »Neue Bauen« zurückführen, das im Kontext mit der sich gleichzeitig entwickelnden Bewegung der »Neuen Sachlichkeit« zu betrachten ist (Palzer et al. 2015). Durch Rationalisierung und Typisierung sollte durch die Verwendung neuer Baustoffe und Materialien eine völlig neue Form des Bauens entwickelt werden. Dabei fanden Materialien wie Glas, Stahl, Beton und Backsteine eine konsequente und kostengünstige Umsetzung. Verstärkt wurde diese Entwicklung durch die Bauhausbewegung von Walter Gropius, die »ein Haus für alle« (Gesellschaftsschichten) forderte. Die Vorfabrikation wurde zu einem der Leitthemen der Moderne: Bei der von Gropius geplanten und Ende der 1920er Jahre errichteten Bauhaussiedlung in Dessau-Törten wurde maximale Effizienz angestrebt, indem vorgefertigte Bauteile (Module) zum Einsatz kamen (Müller 2019). Die Außenwände, Decken und die Innengestaltung wurden nicht vor Ort, sondern in Fertigungswerken nach dem Fließbandprinzip hergestellt, an die Baustelle transportiert und dort montiert.

Experimentelles Bauen in Großplattenbauweise wurde erstmals in den 1920er Jahren umgesetzt; in Berlin-Lichtenberg entstanden 1926/1927 die ersten aus Betonfertigteilen hergestellten Plattenbauten Deutschlands. Auch nach dem Zweiten Weltkrieg, in der beginnenden Hochphase des sozialen Massenwohnungsbaus, wurde vor allem auf den Betonbau gesetzt. Inbegriff der ultimativ-seriellen Bauweise war die Wohnbauserie WBS 70, die Plattenbauten in der DDR. Mit der Rationalisierung der Baureihen konnte der Vorfertigungsgrad erhöht und der Arbeitsaufwand pro Wohneinheit gesenkt werden (Palzer et al. 2015). Die Trabantenstädte der 1970er Jahre wecken noch heute bei vielen Architekt/innen in Deutschland aufgrund ihrer Eintönigkeit negative Assoziationen und haben zu einem Skeptizismus gegenüber dem seriellen bzw. modularen Bauen geführt (Müller 2019).

Allerdings werden serielle und modulare Bauweisen in der Diskussion um die Zukunft des Bauens in den letzten Jahren wieder verstärkt ins Spiel gebracht (Memmler et al. 2017; Schwerdtner et al. 2018). Der Wunsch nach Zeit- und Kostenersparnis bei der Fertigstellung von Gebäuden im Wohnungsbau gewinnt an Bedeutung in der öffentlichen Diskussion (Barankay 2016). Ein bedeutender Vorteil ist zudem die Sicherstellung einer hohen Ausführungsqualität. Neue Fertigungsmethoden bei der Vorfertigung erlauben höhere Qualitätsstandards. Dabei sind Vorproduktion und ästhetische Gestaltung heute keine unüberbrückbaren Gegensätze mehr. Die Standardisierung und Typisierung ermöglichen dringend benötigten Wohnraum bei kurzen Bauzeiten.

Im Rahmen der Baukostensenkungskommission wurde Ende 2015 bereits die Empfehlung formuliert, dass Wohnungs- und Bauwirtschaft »zeitgemäße Formen des industriellen Bauens« entwickeln sollen (BMUB 2015). Auch im 10-Punkte-Programm der Bundesregierung (BMU 2016b), das als Follow-up der Baukostensenkungskommission im Rahmen der im Frühjahr 2016 beschlossenen Wohnungsbauoffensive vorgelegt wurde, wird gefordert, das serielle Bauen zur Errichtung von ansprechendem und günstigem Wohnraum zu forcieren. Es wurde eine Bund-Länder-Arbeitsgruppe »Serielles Bauen« ins Leben gerufen, in der Fragen der Unterstützung des modularen und seriellen Wohnungsbaus thematisiert werden. Dabei geht es z. B. um Typengenehmigungen, die Harmonisierung der Landesbauordnungen sowie die Weiterentwicklung der Förderprogramme (Memmler et al. 2017, S. 23 ff.).

In diesem Kontext ist auch die »Charta für Holz 2.0«⁸⁴ zu sehen, mit der die »Waldstrategie 2020« der Bundesregierung weiterentwickelt und konkretisiert wird (BMEL 2018; Purkus et al. 2020). In dem »Klimaschutzplan 2050« der Bundesregierung vom November 2016 wird die »Charta für Holz 2.0« als Meilenstein zur Erreichung der Klimaschutzziele genannt. Der Klimaschutzplan fordert dazu auf, Holzverwendung intelligent mit den Erfordernissen der Ressourcen- und Materialeffizienz zu verzahnen (BMU 2016a). Hierbei kommt dem (modularen) Holzbau besondere Bedeutung zu, denn das Bauwesen ist der wichtigste Einsatzort für Holzprodukte (BMEL 2018, S. 18).

Die serielle und die modulare Bauweise scheinen besonders geeignet, das Bauwesen nachhaltiger zu gestalten. Ziel ist es, Bauwerke mit qualitativ hochwertigen Baufertigteilen zu errichten, die mit digitalen Verfahren vorgefertigt werden, wobei verstärkt nachhaltige Baustoffe, wie z. B. Holz, eingesetzt werden sollen. Im Folgenden werden auf Basis des Gutachtens von Mechtcherine (2019) Grundlagen des Modul- und Fertigteilbaus (insbesondere Marktverbreitung; Kap. 5.1), spezifische Aspekte der Vorfertigung mit den Baustoffen Beton und Holz (Kap. 5.2) sowie schließlich die Herausforderungen und Potenziale der seriellen und modularen Bauweise im Kontext Digitalisierung näher untersucht (Kap. 5.3).

5.1 Grundlagen

Der Begriff Vorfertigung wird »meist pauschal für das Bauen in Serie, für elementiertes oder modulares Bauen verwendet«, obwohl strenggenommen unter diesem Ausdruck nur das »Fertigen einzelner Elemente an einem wettergeschützten Ort« verstanden wird und zwar unabhängig davon, ob die Vorfertigung handwerklich oder maschinell durchgeführt wird (Hintersteininger 2015, S. 5). Die weiteren Ausführungen beziehen sich auf die industrielle Vorfertigung, die die Produktion von Bauteilen mit industriellen Fertigungstechnologien bezeichnet. Hierbei steht die Rationalisierung von Arbeitsprozessen mit dem Ziel einer höheren Kosteneffizienz und Qualität im Mittelpunkt.

Bei Fertigbauteilen können verschiedene Grade der Vorfertigung realisiert werden. Grundsätzlich lassen sich entsprechend zunehmender Funktionalität Bauelemente, Halbfertigteile, Fertigteile und Raumzellen unterscheiden (Mechtcherine 2019, S. 116 f.):

- › Bauelemente bestehen aus standardisierten, meist kleinen Bauteilen ohne statische Funktion, wie z. B. Fenster, Türen und Treppen.
- › Halbfertigteile werden erst durch eine Ergänzung auf der Baustelle zum Bauteil komplettiert. Dazu gehören z. B. Elemente aus Beton, die nach Ablage an Ort und Stelle durch weitere Bewehrungselemente und Ortbeton fertiggestellt werden (z. B. Doppelschalenwände [Bögl/Gierer 2012] oder Stützen, Dachbinder, Wandelemente und Fassadenplatten).
- › Raumzellen haben den höchsten Grad der Vorfertigung, da sie in der Regel auch sämtliche Anschlüsse und Medienleitungen, Öffnungen und technische Gebäudeausstattungen enthalten. Schlüsselfertige Raumzellen haben bereits die Bodenbeläge, Wandverkleidungen, Fenster, Türen und die elektrische Installation integriert (Bögl/Gierer 2012). Obwohl einige Beispiele für die Verwendung von Stahlbetonraummodulen im Wohnungsbau existieren (Albus 2017; Dupraz 2013; Liese 2015), besitzt diese Bauform im Wohnungsbau bisher kaum Bedeutung. Die Gründe hierfür sind die schlechten bauklimatischen Eigenschaften von Beton und das sehr hohe Gewicht der einzelnen Raumzellen (Mechtcherine 2019, S. 117).

Im Wohnungsbau finden sich Fertigteile je nach Bauart im Gebäudeskelett als Stützen und Träger oder im Kern als vollflächige Wandelemente. Auch Halbfertigteile werden hier eingesetzt, vor allem zur Erstellung der Etagenabschlüsse. In kleineren Gebäuden wie Einfamilien- oder Reihenhäusern kommen Betonfertigteile für Keller und Deckenkonstruktionen zum Einsatz. Das Portfolio umfasst zunehmend auch komplette Wandelemente und Raummodule, die dank heute möglicher Fertigungspräzision und Flexibilität immer mehr an Bedeutung gewinnen (Kap. 5.2). Nach einer Studie der USP Marketing Consultancy (BauInfoConsult 2019b) sind die Niederlande und das Vereinigte Königreich in Europa Vorreiter bei der Verwendung von Fertigteilen und Modulen, wohingegen Deutschland aktuell nur zum Mittelfeld gehört.

⁸⁴ Mit der »Charta für Holz 2.0« wird das Ziel verfolgt, den Klimaschutzbeitrag der Forst- und Holzwirtschaft durch nachhaltige Waldbewirtschaftung und Holzverwendung zu stärken, die Wertschöpfung und Wettbewerbsfähigkeit des Clusters Forst und Holz zu erhalten sowie durch nachhaltige und effiziente Nutzung von Wäldern und Holz endliche Ressourcen zu schonen.

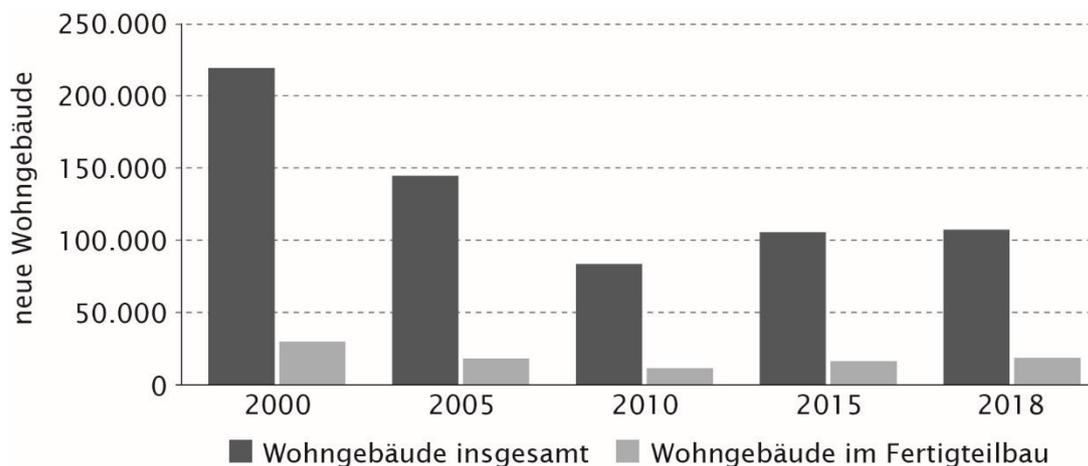
Der Bau öffentlicher Gebäude weist starke Analogien zum großmaßstäblichen Wohnungsbau auf, bei dem die Errichtung des Gebäudes häufig in Skelettbauweise erfolgt (Mechtcherine 2019, S. 118). Vor allem Decken, Stützen, Träger, Fahrstuhlschächte und Treppenhäuser werden in Fertigteilbauweise erstellt, was jedoch nicht bedeutet, dass Bauwerke vollständig vorgefertigt sind. Da auch bei der konventionellen Bauweise vorgefertigte Bauteile eingesetzt werden, gelten laut Statistischem Bundesamt nur Gebäude als Fertigteilbau, »wenn überwiegend Module wie auch ganze Räume (beispielsweise Bäder) und/oder geschosshohe oder raumbreite Fertigteile, z. B. großformatige Wandtafeln, für Fassaden, Außen- oder Innenwände verwendet werden« (Statistisches Bundesamt 2020c, S. 5). Die vorgefertigten Bauteile müssen also überwiegen. Dies ist bei der Interpretation von Statistiken der Fertigteilindustrie zu berücksichtigen.

Für die Montage und Fügung der Fertigteile am Ort der Baustelle sind formschlüssige,⁸⁵ selbstzentrierende und auf Schwerkraft basierende Verbindungen besonders geeignet. Auf die Kippsicherheit ist hierbei zu achten (Moro 2019). Um die Zahl der Fügstellen zu reduzieren, können einige Strukturen bereits im Werk vereinigt werden. Dies gilt z. B. für Deckenplatten mit integriertem Unterzug (Moro 2019). Auch kraftschlüssige Verbindungen, bei der die Bewegung der Bindungspartner durch Reibung verhindert wird, sind realisierbar, bedeuten aber zugleich einen erheblichen Mehraufwand.

Marktdurchdringung im Wohnungs- und Nichtwohnungsbau

Im Wohnungsbau hat die modulare Bauweise in Deutschland bisher noch einen geringen Marktanteil (Abb. 5.1). Von 108.071 im Jahr 2019 fertiggestellten neuen Wohngebäuden wurden bei 19.217 Gebäuden überwiegend vorgefertigte Bauteile eingesetzt (Statistisches Bundesamt 2021a). Damit hatte der Fertigteilbau einen Anteil von 17,8%.

Abb. 5.1 Fertigstellung neuer Wohngebäude in Deutschland insgesamt und im Fertigteilbau errichtet



Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt 2020b

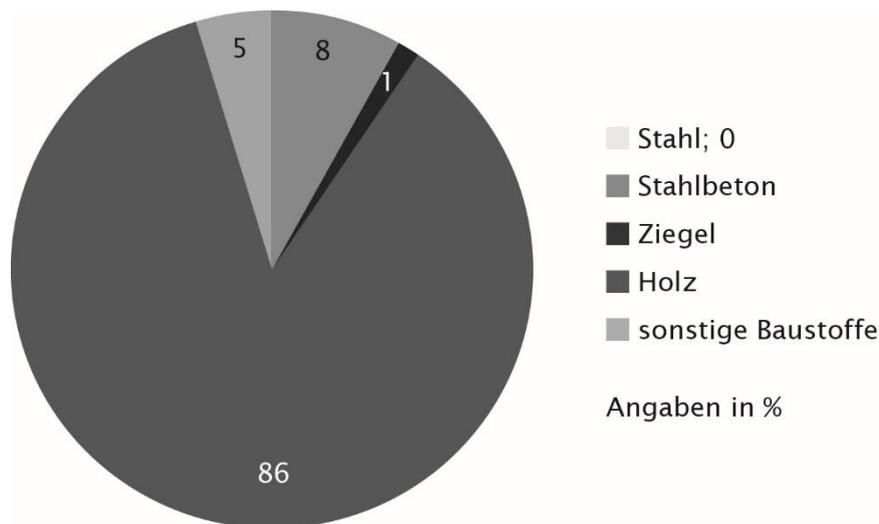
Bemerkenswert ist, dass überwiegend Einfamilienhäuser in dieser Bauweise errichtet werden (89%), wohingegen Zweifamilienhäuser mit 7,8% und insbesondere Mehrfamilienhäuser mit 3,1% nur einen verhältnismäßig kleinen Anteil stellen (Statistisches Bundesamt 2021a). Im Nichtwohnungsbau hat der Fertigteilbau eine deutlich größere Bedeutung: Von den 23.624 fertiggestellten Nichtwohngebäuden des Jahres 2019 wurde ein Drittel überwiegend aus vorgefertigten Bauteilen errichtet; das umbaute Volumen betrug 91,4 Mio. m³, im Vergleich zu 17,1 Mio. m³ im Wohnungsbau (Statistisches Bundesamt 2021b).

⁸⁵ Unter formschlüssigen Verbindungen versteht man einfache Verbindungen von Bauteilen durch Verbindungselemente wie beispielsweise Stifte, Bolzen oder Passfedern.

Die überwiegend aus vorgefertigten Bauteilen errichteten Wohngebäude sind zu 86% Holzkonstruktionen (Abb. 5.2), wohingegen solche aus Stahlbeton nur einen Anteil von 8% haben (Statistisches Bundesamt 2020c). 2018 wurden ca. 15% aller neuen Wohngebäude in Deutschland im Holzfertigbau errichtet. Da der Fertigbaumarktanteil an den genehmigten Ein- und Zweifamilienhäusern 2019 auf 20,8% stieg (BDF o. J.), dürfte der Anteil der Holzfertigbauweise 2019 bei ca. 18% liegen.

Anders ist die Situation im Nichtwohnungsbau: Hier dominieren Konstruktionen aus Stahl- und Stahlbetonfertigteilen, die bei den Baugenehmigungen 2018 Anteile von 49 bzw. 28% hatten. Hingegen kamen die überwiegend aus vorgefertigten Holzbauteilen errichteten Nichtwohngebäude nur auf einen Anteil von 21%.

Abb. 5.2 Fertigstellungen von neuen Wohngebäuden im Fertigteilbau nach verwendetem Baumaterial



Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt 2020c

Ein gesteigertes Interesse an der Verwendung vorgefertigter Bauteile und Modulbauten (im Sinne von Raumzellen) wird durch die Veranstaltung von themenbezogenen Fachmessen (z. B. Modulbau 2020) und die Existenz zahlreicher einschlägiger Verbände, wie z. B. dem Bundesverband Deutscher Fertigbau⁸⁶ und Bundesverband Bausysteme⁸⁷, bestätigt. Es wird prognostiziert, dass die zunehmende Automatisierung und Digitalisierung der Bauprozesse die Herstellung und Montage vorgefertigter Bauteile in Zukunft wirtschaftlich rentabler werden lassen und so ein weiteres Wachstum der Branche begünstigen (Barankay 2016; DBZ 2018; Mechtcherine 2019, S. 113 ff.). In Studien wird für Deutschland mit einem Umsatzwachstum von bis zu 170 Mrd. Euro bis 2050 gerechnet (Grundke/Wildemann 2017). Diese Zahlen beziehen sich jedoch allgemein auf die Nutzung von Betonfertigteilen. Modulare Bauelemente für den Wohnungs- und Nichtwohnungsbau bilden nur ein Branchensegment ab (andere Segmente sind z. B. Mauer-, Pflaster- und Rinnsteine aus Beton oder Betonrohre).

5.2 Baumaterialien im modernen Fertigteilbau

Die industrielle Massenfertigung von Bauelementen und -teilen war früher nur möglich, indem bei der seriellen Fertigung von standardisierten Bauteilen einfache Geometrien und geringe Varianz zugrunde gelegt wurden. Kundenorientierte Lösungen und Abänderungen hatten einen großen Aufwand in der Fertigung zur Folge und waren oft mit zusätzlichen manuell durchgeführten Arbeitsschritten und einem höheren Kostenaufwand verbunden. Dagegen ermöglichen moderne digitale und automatisierte Vorfertigungsmethoden eine Komplexität und Varianz,

⁸⁶ <https://www.fertigbau.de/> (12.3.2021)

⁸⁷ <https://www.bv-bausysteme.de/> (12.3.2021)

die keinen Einfluss auf die Effizienz und Kosten der Vorfertigung haben (Braun et al. 2019). Bereits in der Auslegungs- und Planungsphase sind heute anhand von 3-D-Simulations- und Kalkulationsmodellen verschiedene Szenarien und Abläufe in der Fertigung flexibel möglich. Die Integration von CAD- und CAM-Methoden ermöglicht die Auflösung bislang entgegengesetzter Prinzipien der Massenproduktion und kundenindividueller Fertigung bei hoher Präzision. Dies wird im Folgenden am Beispiel der modernen Betonfertigteileproduktion (Kap. 5.2.1), des modularen Holzbaus (Kap. 5.2.2) sowie der Stahlmodulbauweise (Kap. 5.2.3) genauer ausgeführt.

5.2.1 Betonfertigteileproduktion

Der aktuell relativ geringe Anteil des Stahlbetons und Betons im seriellen und modularen Bauen darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass Betonfertigteile im Bauwesen im großen Umfang verwendet werden und zwar als integrierte Baukomponenten in allen Bereichen der Baubranche (Industrie- und Gewerbebau, Wohnungsbau, öffentliche Gebäude, Anlagenbau sowie Infrastrukturbau). So betrug die Produktion von großformatigen Deckentafeln aus Beton im Jahr 2018 in Deutschland 30,6 Mio. m² und von Wandtafeln 9,7 Mio. m² (VDZ 2019). Diese Produktionsfläche von Deckentafeln entspricht theoretisch der Hälfte aller Decken für neue Wohngebäude, wie eigene Abschätzungen zeigen (auf Basis von Angaben aus Statistisches Bundesamt 2019a u. 2020b).

In Deutschland haben Betonfertigteile einen Anteil von ca. 25 % am gesamten Umsatz des Sektors Baustoff, Steine und Erden. Ortsbeton hat demgegenüber nur einen Anteil von ca. 12 %. Die deutsche Betonfertigteileindustrie beschäftigte im Jahre 2018 etwa 42.000 Mitarbeiter/innen in mehr als 1.000 Unternehmen und erwirtschaftete einen Umsatz von 6,2 Mrd. Euro (Deutsche Betonbauteile 2019). Diese Zahlen beziehen sich jedoch allgemein auf das gesamte Portfolio der Betonfertigteileindustrie, bei dem Decken- und Wandtafeln nur ein Branchensegment abbilden (andere Segmente sind z. B. Mauer-, Pflaster- und Rinnsteine aus Beton oder Betonrohre). Europaweit erzielte diese Industrie 2018 mit rund 100.000 Beschäftigten einen Umsatz von mehr als 25 Mrd. Euro (Betonverbände und Serviceorganisationen aus Baden-Württemberg 2019), was die starke Position Deutschlands in der europäischen Produktion von Betonfertigteilen verdeutlicht.

Beim modernen Hochbau stehen die Forderungen nach schneller und kostengünstiger Bauausführung im Raum.⁸⁸ Dies führt zu einer zunehmenden Rationalisierung durch weitgehende Vorfertigung der Bauelemente. Wichtige Aspekte sind hierbei die Bauzeitverkürzung und die Einsparungen von Schalungs- und Gerüstkosten. Gleichzeitig ermöglicht die hohe Präzision eine von den Witterungsverhältnissen unabhängige Fertigung sowie das gute Controlling im Werk eine gleichbleibend hohe Ausführungsqualität. Die durch digitale Methoden gesteigerten Möglichkeiten im Betonfertigteile werden im Kasten 5.1 näher erläutert.

Kasten 5.1 Die digitale Produktion von Betonfertigteilen

Die Darstellung der auf digitalen und automatisierten Methoden basierenden Herstellung von Betonfertigteilen orientiert sich an den Produktionsbeschreibungen des weltweit zu den Technologie- und Innovationsführern der Betonfertigteilebranche zählenden Unternehmens Vollert Anlagenbau GmbH. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass in der Planungsphase mithilfe der computerunterstützten Konstruktion (CAD) »konstruierende Aufgaben, wie das Erzeugen oder Ändern eines geometrischen Modells in 2D oder 3D« zur Herstellung eines Fertigteils durchgeführt werden (Ensenmeier o. J.). Typische Fertigteile sind flächige Elemente wie Decken (Element- und Hohldecken) und Wände (Massiv- und Doppelwände, Sandwichelemente), aber auch Sonderteile oder andere Betonfertigteile.⁸⁹

Produktionsprozesse und Maschinen im Betonfertigteilwerk werden durch ein Leitsystem durchgängig gesteuert, kontrolliert und optimiert (EBAWE Anlagentechnik 2014). Dies betrifft alle Schritte von der Arbeitsvorbereitung, den Arbeitsstationen bis zu den Lager- und Verladeprozessen. Das Leitsystem hat die Funk-

⁸⁸ <https://www.fdb-fertigteilbau.de/wissen/betonfertigteilbau/> (11.3.2021)

⁸⁹ <https://www.vollert.de/de/produktbereiche/loesungen-fuer-die-betonfertigteilproduktion/betonfertigteil-produktionsloesungen/automatisierte-loesungen-fuer-wand-und-decke/palettenumlaufanlage/> (12.3.2021)

tion einer »zentrale[n] Schnittstelle für die konstruktiv erstellten Daten aus dem BIM-Modell sowie zum vorhandenen ERP-System⁹⁰«. ⁹¹ Durchlaufzeiten werden permanent optimiert, sämtliche Maschinen angesteuert, Daten automatisch verfolgt und aufbereitet, Auslagerreihenfolgen und Aushärtezeiten verwaltet und eine große Anzahl von Statistiken zur Verfügung gestellt.

Im Mittelpunkt eines modernen digitalen Produktionsprozesses steht heute ein hochautomatisiertes Anlagenkonzept. Bei der Vollert Anlagen GmbH ermöglicht moderne Maschinentechologie rationale Arbeitsprozesse »von CAD/CAM-gesteuerten Schalungsrobotern, vollautomatisierten Betonverteilern, innovativen Wendegeräten für die Doppelwandproduktion bis hin zu intelligenter Verlade- und Abhebetchnik«. Die Herstellung der Fertigteile erfolgt mithilfe eines Palettensystems, bei dem die Schalungspaletten umläufig von Station zu Station transportiert werden (Abb. 5.3). Palettenumlaufanlagen ermöglichen einen optimalen Automatisierungsgrad »von einfachen modular aufgebauten Basislösungen bis hin zu hochkomplexen Multifunktionsanlagen«.

Typischerweise besteht der Prozessablauf aus folgenden Stationen (EBAWE Anlagentechnik 2014; Vollert Anlagenbau 2014): Der vollautomatisch arbeitende Schalungsroboter setzt entsprechend den bereitgestellten CAD-Daten die Schalungen mit hoher Präzision auf die Schalungspalette. Die für die spezielle Umlaufanlage festgelegten Schalungstypen und -längen befinden sich in einem Magazin. Der Betonverteiler dient sowohl zum Beschicken von Schalungen oder Formen in stationären Fertigungen als auch für Paletten mit aufgebauter Schalung oder Formen in Umlaufanlagen. Die Paletten werden auf Rollen in die Härtekammer geführt, die zur Lagerung der Paletten während des Abbindevorgangs der frisch betonierten Fertigteile bzw. zur Lagerung von Leerpaletten dient. Zur Herstellung von Doppelwänden ist es erforderlich, die ausgehärtete Oberschale um 180° zu drehen, über die frisch betonierte Unterschale zu positionieren und abzusenken, was ein automatisiertes Palettenwendegerät übernimmt. Es folgen automatisierte Nachbearbeitungen, wie z. B. das Glätten der Betonteiloberflächen. Schalungsreiniger und -öler reinigen und beölen die freigewordenen Schalungen, sodass diese wieder in einem neuen Umlauf manuell oder automatisch gesetzt werden können. Zudem übernehmen heute moderne Magazinierroboter wichtige Aufgaben im Betonfertigteilwerk und sorgen durch die steigende Automatisierung für eine höhere Anlagenproduktivität.

Auch die automatisierte Herstellung von multifunktionalen Hybridstrukturen, wie z. B. mit Holz, sind möglich (Mechtcherine 2019, S. 124). Durch die Fertigungsstraßen sind die Abmessungen beim Stahlbeton in der Regel sehr strikt festgelegt, während bei Holz und Stahl eine größere Varianz möglich ist.

Die Produktion von Betonfertigteilen wird durch die räumlichen Rahmenbedingungen innerhalb des Werkes, vor allem aber durch die Grenzen der Transportfähigkeit eingeschränkt. Insbesondere die Beförderung auf der Straße mittels Lastkraftwagen begrenzt die Dimensionen der Bauteile im Vorfeld (Albus 2017; Moro 2019). Auch die Bauteilmasse ist beim Transport zu beachten, was die Auswahl der Werkstoffe (Stahl, Stahlbeton) einschränkt und besonders für großformatige Betonfertigteile von Bedeutung ist. In diesem Kontext werden textilbewehrte Betone als Lösung vorgeschlagen. Solche Betone mit Hochleistungsfasern, wie z. B. aus Carbon, weisen zwar eine deutlich geringere Masse gegenüber Stahlbeton bei gleicher mechanischer Leistungsfähigkeit auf (und erlauben theoretisch dünnere Konstruktionen), doch erfüllen sie meist nicht die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit (Mechtcherine 2019, S. 120) (dazu Kap. 4.2).

⁹⁰ Ein Enterprise-Resource-Planning-System (ERP-System) hat die Aufgabe, sämtliche in einem Unternehmen ablaufenden Prozesse zu planen, zu steuern und zu verwalten. Ein führender Hersteller von ERP-Systemen ist z. B. SAP.

⁹¹ <https://www.vollert.de/de/produktbereiche/loesungen-fuer-die-betonfertigteilproduktion/produktionsleitsystem/> (12.3.2021)

Abb. 5.3 Herstellung von Betonfertigteilen mit einer automatisierten Palettenumlaufanlage



Quelle: Vollert Anlagenbau

5.2.2 Holzmodulbau

Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen gewinnen in Zeiten knapp werdender Ressourcen und verstärkter, nachhaltiger Kreislaufwirtschaft immer mehr an Bedeutung. Insbesondere wird diskutiert, Holz verstärkt als Baustoff einzusetzen. Die Vorteile von modernen Holzkonstruktionen sind den bauphysikalischen, vor allem aber auch den umweltrelevanten Eigenschaften von Holz zu verdanken (Achenbach/Rüter 2016). Für die Herstellung von Holz wird deutlich weniger fossile Energie benötigt als für die Herstellung von Mauerziegeln, Stahl, Glas oder Beton.⁹² Zudem wird bei der Holzbauweise in Gebäuden langfristig CO₂ gespeichert und auch nach der Nutzungsphase weist Holz bei stofflicher Wiederverwendung eine günstige Ökobilanz auf (Gärtner et al. 2012).

Traditionell wird der Holzbau in durchgängige Konstruktionsmethoden wie Skelett-, Rahmen- bzw. Tafel- und Massivholzbau eingeteilt. Diese Konstruktionsmethoden können wie folgt kurz skizziert werden:

- › Der Holzskelettbau basiert auf einem Tragegerüst aus Holz, das aus senkrechten Stützen und horizontalen Trägern gebildet wird. Diese werden an den Verbindungspunkten miteinander montiert und bilden auf diese Weise ein tragfähiges Skelett aus. Konstruktiv liegt die Bauweise auch dem Fachwerkbau zugrunde.
- › Bei der Holzrahmenkonstruktion bestehen die Wände aus einem rahmenartigen Holzständerwerk, das beidseitig mit Holzwerkstoff- oder Gipskartonplatten beplankt wird. Im Gegensatz zur Skelettbauweise nimmt die Beplankung aus Holzwerkstoff- oder Gipskartonplatten bei dieser Konstruktion auch teilweise Lasten auf. Der Vorteil der Holzrahmenkonstruktion liegt in der schnellen Bauweise. Rahmenkonstruktionen (wie auch die Skelettbauweise) werden überwiegend im Wohnungsbau eingesetzt, sind aber auch für Zweck- und Gewerbebauten sowie generell für Anbauten und Gebäudeerweiterungen geeignet.
- › Vorgefertigte Bauteile können auch aus Massivholz gefertigt werden. Im Unterschied zum Holzrahmenbau sind die neuen flächigen Bausysteme massive Bauteile aus gestapelten oder addierten Querschnitten. Ein

⁹² <https://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/> (12.3.2021)

Vertreter der ersten Gruppe ist Brettstapelholz, das aus hochkant nebeneinanderstehenden Querschnitten zusammengesetzt ist. Additive Systeme wie Brettsperrholz bestehen aus flächigen, mehrschichtigen Holzplatten.

Technische Errungenschaften und der Kompetenzaufbau innerhalb der Unternehmen in den letzten Jahrzehnten haben neue bauliche Möglichkeiten mit dem Baustoff Holz eröffnet (Güdel 2017; Koppelhuber 2017). So wurden mit der Industrialisierung der Holzverarbeitung viele neue Vollholzprodukte und Holzwerkstoffe entwickelt (dazu und zum Folgenden Kaufmann et al. 2017):

- › Vollholzprodukte sind der traditionelle Holzbaustoff. Durch Keilzinken⁹³ und Verleimen der Querschnitte können größere Formate realisiert und größere Lasten aufgenommen werden. Allerdings ist quer zur Faser beanspruchtes Vollholz problematisch. Meist sind Einbauteile aus Stahl zur Überbrückung der Lasten notwendig. Bis zu dreigeschossigen Gebäuden sind im Holztafelbau unproblematisch. Darüber hinaus verlangt die Lastenabtragung einen speziellen Aufbau der Tafeln. Laubholz wie Buche, Eiche und Esche verfügen gegenüber Nadelhölzern über wesentlich höhere Festigkeiten. Sie eignen sich deutlich besser für die Ableitung von Lasten. Da Laubholz aufgrund des Klimawandels als Alternative für Nadelholz immer mehr in den Fokus gerät, könnte dies zukünftig ein großer Pluspunkt für den Einsatz von Laubholz im Mehrgeschossbau sein.
- › Holzwerkstoffe werden aus Holzteilen (Bretter, Platten, Späne, Fasern) im Nass- und Trockenverfahren meist mithilfe von Klebstoffen zusammengefügt. Damit lassen sich Eigenschaften gezielt verstärken. Im Gegensatz zu Vollholz, das aufgrund der Faserstruktur eine Inhomogenität und Richtungsabhängigkeit der Zug- und Druckfestigkeit aufweist und nur in Faserrichtung hohe Festigkeiten besitzt, verfügen moderne Holzwerkstoffe über eine minimierte Inhomogenität und Anisotropie. Wichtige Holzwerkstoffe sind z. B. Brettsperr- und Furnierschichtholz sowie Span- und Faserplatten.

Im modernen Holzbau hat die Vorfertigung großer Elemente an Bedeutung gewonnen (Kaufmann et al. 2017, S. 39). Die Elemente bestehen aus Holzwerkstoffen und sind entweder massiv-stabförmig (Brettstapel) oder stab- und plattenförmig (z. B. Tafelbau, Kastendecke) aufgebaut. Das Fügen unterschiedlicher Bauelemente zu Mischkonstruktionen zum Designen eines bestimmten Bauteils ist gängige Praxis geworden, wobei die Verbundwirkung im Vordergrund steht. Mit CAD-Techniken sind die gewünschten Eigenschaften bereits während der Planungsphase berechenbar. Die Entwicklung hochbeanspruchbarer plattenförmiger Produkte hat wesentlich dazu beigetragen, mehrgeschossiges Bauen mit Holz zu ermöglichen. Nachteilig wirkt sich das geringe spezifische Gewicht von Holz beim Holzhochhausbau aus, wodurch die Anfälligkeit für Gebäudeschwankungen bei Wind bautechnisch kompensiert werden muss (Linner 2019). Genauso sind die Schallisolierung, Empfindlichkeit gegenüber Nässe und natürliches Arbeiten des Werkstoffes Holz besonders zu beachten.

Die Verwendung von Holz bedarf bei der konstruktiven Bauwerksplanung eine dem Werkstoff angepasste Vorbereitung. Dadurch resultiert ein höherer Aufwand in der Planungsphase. Der moderne digitale Prozessablauf im Holzbau basiert auf einer durchgängigen Organisation von Daten, beginnend beim architektonischen Entwurf, der fachplanerisch optimiert wird und schließlich bei der finalen Fertigung im Holzbauunternehmen endet (hierzu und zum Folgenden Kaufmann et al. 2017, S. 135 ff.). Bei der Übernahme der 2-D- oder 3-D-CAD-Daten der Architektenplanung in die CAM-Planung des Holzbauunternehmens werden auch die firmenspezifischen Fertigungsprozesse berücksichtigt. Die CAM-Daten basieren in der Regel auf einem 3-D-Modell und bilden die Grundlage für die Maschinenansteuerung und Werkzeugauswahl von CNC-Fräsmaschinen.⁹⁴

Mittelgroße Betriebe verfügen in aller Regel über leistungsfähige CNC-Maschinen, die die in der 3-D-CAM-Zeichnung definierte Bauelementgeometrie in einen automatisierten Bearbeitungsvorgang übersetzen und selbstständig die Bearbeitungsmethode und den geeigneten Bearbeitungskopf auswählen. Die Mehrachsigkeit der Roboter und die Möglichkeit, im Bearbeitungsvorgang sowohl das Werkstück als auch die Werkzeuge zu bewegen, erlauben es, bei hoher Präzision nahezu jede denkbare Geometrie in einem subtraktiven Verfahren herzustellen. Das anschließende additive Fügen der vorkonfektionierten Stäbe und Platten zu Wand-, Decken- und Dachelementen erfolgt heute weitgehend automatisch. Vereinzelt kommen in den Holzbauunternehmen Portalroboter zum Einsatz, die die beschriebenen subtraktiven und additiven Fertigungsschritte übernehmen können. Fertigungsrelevante Aspekte wie Verschnitt, Materialverbrauch, statische Dimensionierungen, Elementteilungen etc. lassen

⁹³ Als Keilzinkung oder Keilzinkenverbindung wird eine Methode der Längsverbindung zweier Bauteile aus Vollholz oder Holzwerkstoff bezeichnet, deren Enden mit keilförmigen Zinken ineinandergreifen und miteinander verklebt sind.

⁹⁴ CNC ist ein digitales Verfahren zur Steuerung von Werkzeugmaschinen.

sich zu diesem Zeitpunkt bewerten und optimieren. Diese notwendige Vorverlagerung von Planungsentscheidungen in die Vor- bzw. Entwurfsplanung hat der moderne Holzbau mit der BIM-Methode gemein (Kaufmann et al. 2017).

Seit der Jahrtausendwende erfährt der mehrgeschossige Holzmodulbau aufgrund der dargestellten technischen Innovationen und der zunehmenden Berücksichtigung nachhaltiger Aspekte eine Neuausrichtung (Kaufmann et al. 2017; Palzer et al. 2015; Winter 2018). Dennoch spielt er in Deutschland wie auch in den meisten europäischen Staaten derzeit nur eine Nischenrolle (Kap. 5.1), wenngleich sich beispielsweise in skandinavischen Ländern wie Finnland oder auch in der Schweiz und Österreich eine deutliche Zunahme von Holzbauprojekten abzeichnet (Kaufmann et al. 2017; Lazarevic et al. 2020). Während früher dreigeschossige Mehrfamilienhäuser aus Holz die Grenze darstellten, werden seit ca. 10 Jahren deutlich höhere Gebäude realisiert. Beispielsweise entstand 2015 im norwegischen Bergen schon ein 14-geschossiges Gebäude und in Wien wurde in den letzten Jahren ein Holzhybridhochhaus mit 24 Geschossen gebaut (Kaufmann et al. 2017, S. 13). Auf 29 Geschosse und insgesamt 98 m soll es ein Holzhochhaus in Berlin-Kreuzberg bringen, das damit Deutschlands höchstes Holzgebäude werden könnte (Rada 2021). Ein Vorzeigeprojekt, bei dem das Spektrum der Möglichkeiten für den traditionellen Holzbau durch Robotik und neue digitale Bauverfahren erfolgreich erweitert wurde, ist das »DFAB HOUSE« auf dem Forschungs- und Innovationsgebäude »NEST« (Next Evolution in Sustainable Building Technologies) in Dübendorf (Mechtcherine 2019, S. 152; Kasten 5.2).

Kasten 5.2 Robotik und neue digitale Verfahren: Möglichkeiten für den Holzbau – das Beispiel »DFAB HOUSE«

Beim 2019 fertiggestellten »DFAB HOUSE«, das in Zusammenarbeit von neun Professuren der ETH Zürich und zahlreichen Partnern aus der Wirtschaft entstand, wurde ein neues digitales Holzbaufverfahren erstmals von der Forschung in die Praxis überführt. Dabei handelt es sich um das weltweit erste bewohnte Haus, das digital geplant und mit Robotern sowie 3-D-Druckern digital gebaut wurde. Der Fokus des Projekts lag auf der Entwicklung eines innovativen, roboterbasierten Vorfertigungsprozesses für Holzrahmenbaumodule, bei dem bestehende Methoden des Holzrahmenbaus mit der Präzision und der Geschwindigkeit robotischer Fabrikation erweitert wurden. So wurden u. a. mithilfe von Spatial-Timber-Assembly-Robotern maßgeschneiderte Teile produziert (Just-in-time-Produktion) und präzise im Raum platziert. Durch den Einsatz des Roboters konnten die Holzmodule ungeachtet ihrer geometrischen und strukturellen Komplexität weitgehend vorgefertigt werden, wodurch eine schnelle und einfache Montage vor Ort auf der Baustelle möglich war.

Im Rahmen des Projekts wurde ein computergestütztes Entwurfswerkzeug entwickelt, das basierend auf vielen Eingabeparametern eine Geometrie aus Holzbalken generierte. Die resultierenden Balken wurden dann entsprechend der berechneten Lasten dimensioniert und mit Fabrikations- und Montagerahmenbedingungen abgeglichen. Der Entwurf wurde anschließend durch das Multirobotersystem assembliert. Dazu wurde jeder einzelne Balken von einem Roboter gegriffen, in Position gebracht und dann mit einer CNC-gesteuerten Säge zugeschnitten. Danach wurden durch den zweiten Roboterarm alle erforderlichen Schraubkanäle präzise gefräst und diese für die einzelnen Anschlüsse vorgebohrt. Zum Schluss ordneten die beiden kooperierenden Roboter die Balken gemäß dem Computerentwurf genau im Raum an, wo sie im letzten Schritt durch Handwerker manuell verschraubt wurden. Während der Fabrikation wurden Toleranzen registriert und anhand eines internen Referenzsystems sowie optischer Sensoren ausgeglichen. Im Gegensatz zu Standardholzrahmentragwerken können Horizontallasten von der Rahmenstruktur selbst abgetragen werden, wodurch statische Beplanungen nicht mehr zwingend nötig sind und sich das Gesamtgewicht deutlich reduziert.

Quelle: Mechtcherine 2019, S. 152 f.

Während die Vorteile des Holzbaus vor allem in der guten Ökobilanz zu sehen sind, erscheint die kostenmäßige Bewertung gegenüber der herkömmlichen Mauerstein- oder Betonbauweise weniger eindeutig. So gibt es Untersuchungen, nach denen Vollholzkonstruktionen 80 bis 100% höhere Kosten als vergleichbare hochwertige Mauerwerkskonstruktionen aufweisen können, insbesondere dann, wenn zusätzliche Dämmmaßnahmen zur Einhaltung energetischer Vorgaben notwendig sind (Walberg et al. 2015). Allerdings werden die Kosten für den modularen Holzbau aufgrund der heute möglichen digitalen Methoden der Planung und Fertigung gegenüber dem bisherigen Holzfertigteilbau als günstiger beurteilt (Koppelhuber 2017). Auch ist die Produktionszeit kürzer, sofern

die Automatisierungsmöglichkeiten bei der Zuführung der holzbearbeitenden Maschinen ausgeschöpft werden (dazu und zum Folgenden Güdel 2017). Bisher besteht meist nur eine inselartige Automation und keine durchgängige Verkettung der Prozesse durch eine ganze Produktionshalle hindurch. Das heißt, Balken und Platten werden manuell noch bewegt und zwischengepuffert, was viel Zeit in Anspruch nimmt. Mithilfe einer durchgängigen Automation könnte der Durchsatz im Elementbau laut Güdel (2017) um bis zu 44 % erhöht werden. Nach neueren Untersuchungen belaufen sich die Investitionsmehrkosten für Neubauten in Holzbauweise gegenüber Massivbauweisen je nach Dämmstandard auf ca. 4 % (Mahler et al. 2019).

Markt für Holzbauweise

Der zukünftige Markt für die Holzbauweise steht nach einer neuen Studie des Thünen-Instituts zu den Rahmenbedingungen für das Bauen mit Holz in Deutschland vor Herausforderungen (hierzu und zum Folgenden Purkus et al. 2020). Ein wichtiger Grund ist im Marktsegment der Ein- und Zweifamilienhäuser zu sehen, die den Löwenanteil der in Holzbauweise errichteten Gebäude ausmachen (Kap. 5.1), aber zukünftig an Bedeutung verlieren dürften. Insbesondere im städtischen Raum ist jedoch eine zunehmende Knappheit an Baugrundstücken zu beobachten und die Bedeutung des Einfamilienhausbaus bereits gering (Palzer et al. 2015).

Die entscheidende Frage ist, inwieweit der mehrgeschossige Holzbau an Bedeutung gewinnen kann (TAB 2022). Mit Blick auf hohe Grundstückspreise wird mit mehrgeschossigen Bauten in hochpreisigen Städten grundsätzlich eine effizientere Flächennutzung ermöglicht. Aktuell bewegt sich allerdings die Holzbaquote bei Mehrfamilienhäusern auf sehr niedrigem Niveau, wenngleich die Zahl der fertiggestellten Gebäude steigt. 2018 wurden in Deutschland gerade einmal 393 Mehrfamilienhäuser in Holzbauweise erstellt. Der Marktausweitung mehrgeschossiger Holzgebäude steht eine Reihe von Hemmnissen entgegen, wie z. B. fehlende fachliche Kompetenzen im Holzbau bei der Planung von Gebäuden, Kapazitätsprobleme der Unternehmen, die unzureichende Standardisierung und die nicht auf Holzbau optimal angepassten Regelwerke (Näheres dazu in Kap. 5.3).

Eine wichtige Lenkungswirkung kommt dem Bauordnungsrecht zu, da es die Bandbreite ordnungsrechtlich zulässiger Lösungen definiert. Die Grundlage für die Erweiterung des Holzbaueinsatzbereichs über Gebäude geringer Höhe hinaus wurde lange durch die Musterbauordnung (MBO) in Verbindung mit der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hoch feuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFH HolzR) gelegt (sowie der Umsetzung dieser Regelwerke in Landesrecht). Da deren Anforderungen nicht mehr dem Stand der Technik entsprachen, führte dies zu Wettbewerbsnachteilen für den mehrgeschossigen Holzbau. Erst im Juni 2021 wurde die M-HFH HolzR durch die Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL) abgelöst und die brandschutztechnischen Anforderungen an die Holzbauweise damit konkretisiert und aktualisiert.⁹⁵ Zu erwarten ist, dass sich dadurch die Zulassungsverfahren vereinfacht haben und bestehende Wettbewerbsnachteile für den mehrgeschossigen Holzbau zumindest z. T. gemindert werden könnten.

5.2.3 Stahlmodulbau

Innovationen und Entwicklungen im Bereich der Vorfertigung mit Stahlbauelementen sind eng verknüpft mit der Thematik der Energieeinsparung und Nachhaltigkeit. In diesem Zusammenhang spielt vor allem das Teilgebiet des Stahlleichtbaus eine entscheidende Rolle. Aufgrund ständiger Weiterentwicklungen auf Materialebene sowie Systemoptimierungen im Vorfertigungsprozess entwickelt sich die einst nur in Nischenmärkten vertretene Stahlleichtbauweise zunehmend zu einer zukunftsfähigen Systembauweise. Zwar hat sich diese Bauweise in Deutschland noch nicht flächendeckend etabliert, dennoch geht der Trend vor allem bei Gewerbebauten eindeutig in Richtung seriellen Bauens mit Leichtbaumodulen. Im europäischen Ausland – vor allem in Großbritannien, Skandinavien, Belgien und den Niederlanden – betrug der Anteil der Stahlleichtbauweise am Wohnungsbau und bei kleineren gewerblichen Einheiten schon 1999 bis zu 15 %, in Deutschland hingegen nur 1 %. Aktuellere Angaben sind nicht vorhanden, jedoch gab es 2012 Prognosen, die für den Stahlleichtbau bis 2018 ein starkes Wachstum in Europa auswiesen (Seifert 2015).

⁹⁵ <https://hbz-nord.de/2021/08/27/neue-muster-holzbaurichtlinie-m%E2%80%90holzbau-rl-veroeffentlicht/> (27.4.2022)

Im Bereich der Aufstockung und Sanierung von Gebäuden birgt der Stahlleichtbau aufgrund seiner Leichtigkeit und schlanken Bauweise großes Potenzial. Etliche Großstädte haben kaum noch die Möglichkeit zu wachsen, nicht einmal auf Kosten einer weiteren Flächenversiegelung. Hier ist die Nachverdichtung von Geschossbauten durch Aufstockung und Anbau von Stahlleichtbaukonstruktionen eine Option. Mit dem niedrigen Konstruktionsgewicht und dem hohen Grad der Vorfertigung können die Eingriffe in die bestehende Gebäudesubstanz auf ein Minimum reduziert und die Baumaßnahmen mit geringer Beeinträchtigung der Infrastruktur schnell umgesetzt werden (Mechtcherine 2019, S. 142 f.).

Auch im Bereich des Neubaus bietet die Stahlmodulbauweise viele Vorteile gegenüber dem konventionellen Bauen (Chua et al. 2018). Mit dem hohen Grad der Vorfertigung im Werk werden die Qualitätsstandards einer industriellen Fertigung, vergleichbar dem Fahrzeugbau, erreicht. Gegenwärtig liegt der Vorfertigungsgrad bei Konstruktionen mit Stahlrahmenmodulen bei etwa 80 % (DBZ 2018, S. 48; Mechtcherine 2019, S. 143). Allerdings ist in der gegenwärtigen Praxis die Produktivität bei der Herstellung von Stahlfertigteilen noch nicht optimiert, da sowohl im Werk als auch auf der Baustelle noch viele manuelle Arbeiten verrichtet werden müssen. Die Herstellung von modularen Stahleinheiten in der Fabrik umfasst in der Regel noch konventionelles Gießen, gefolgt von der händischen Montage. Dies verursacht häufig Fehler in der Produktion, die zu Ungenauigkeiten und Problemen bei der Montage auf der Baustelle führen (Mechtcherine 2019, S. 143).

Entwicklungsfelder in der Werkstofftechnologie sind die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, wie z. B. Festigkeit sowie Dauerhaftigkeit der Stähle (Mechtcherine 2019, S. 145). Derzeit ist die Anwendung höherfester Stähle auch aus Kostengründen gering. Bei einer stärkeren Marktdurchdringung solcher Stähle könnten je nach Bauprojekt bis zu 50 % und mehr der Stahlmassen eingespart werden (Mechtcherine 2019, S. 146). Mit zunehmender Festigkeit nehmen allerdings auch die Sprödigkeit und die Anforderungen an die Verarbeitung, insbesondere an das Schweißen und die Wärmebehandlung, zu. Hinderlich ist in diesem Zusammenhang, dass technische Regeln sowie Erfahrungen für die Planung, Berechnung und Ausführung von Stahltragwerken aus höherfesten Stählen noch nicht ausreichend vorhanden sind.

5.3 Potenziale und Herausforderungen des Fertigteilbaus

Lange hatten Gebäude mit einem hohen Vorfertigungsgrad (Fertighäuser) mit einer negativen Wahrnehmung zu kämpfen, galten sie doch als monoton und qualitativ minderwertig. Die Integration neuester digitaler und automatisierter Produktionsweisen (Kasten 5.2) ermöglicht eine serielle, flexible Produktion von Bauteilen und Modulen, die individuelle Kundenwünsche erfüllen kann (Emprechtinger 2018). Wesentlich ist, dass durch die neuen Technologien eine durchgängige digitale Prozesskette von der Planung des 2-D- bzw. 3-D-Modells bis zur vollautomatisierten Fertigung des Bauteils möglich ist, in der alle Abläufe und Maschinen automatisiert gesteuert werden können. Durch den Einsatz von Manipulatoren und computergesteuerten Werkzeugmaschinen ist eine schnelle, bedarfsgerechte Anpassung von Form und Gestalt möglich. Fertigungsanlagen mit Industrierobotern und CNC-Fräsen mit zertifizierten Abläufen und stetigem Controlling gewähren hohe Maßgenauigkeiten und ermöglichen anspruchsvolle Oberflächengestaltungen (Albus 2017; Mechtcherine 2019, S. 114 ff.). Moderne Sensortechnik erlaubt die Detektion kleinster Abweichungen, sodass fehlerhafte Bauteile noch vor Auslieferung entsprechend nachbearbeitet oder aussortiert werden können.

Vorteilhaft an einem hohen Vorfertigungsgrad ist auch, dass die Produktion bei gleichbleibenden klimatischen Verhältnissen durchgeführt werden kann (Welpé/Grundke 2017) und witterungsbedingte Unterbrechungen vermieden werden können (Mechtcherine 2019, S. 169). Möglich ist im Prinzip auch eine 24-Stunden-Produktion im Schichtbetrieb (Moro 2019). Aufgrund dieser Faktoren verfügen auf Modulbau spezialisierte Unternehmen über mehr Planungs- und Termintransparenz. Der Baustellenbetrieb kann je nach Grad der Vorfertigung drastisch reduziert werden, wodurch die Errichtung eines Gebäudes bis zu 70 % schneller erfolgen kann (DBZ 2018, S. 28).

Durch konsequente Digitalisierung und Automatisierung serieller Fertigungsverfahren lassen sich die Prinzipien der Modularisierung auf den Hausbau übertragen. Ziel ist es, Gebäude auf eine definierte Zahl von Standardelementen (Modulen) zu reduzieren und mit genau definierten Anschlussstellen für Decke, Außenwand oder Fenster zu versehen. Die Standardmodule lassen durchaus Varianten zu (wie es auch für Autos verschiedene Sitze, Motoren oder sonstige Ausstattungen gibt). Aus diesen Modulvarianten lassen sich dann unterschiedliche Gebäude erstellen. Es wird betont, dass sich durch serielles Bauen, insbesondere wenn das Prinzip der Serie konsequent über den gesamten Prozess eingehalten wird, Kosten von ca. 20 % gegenüber herkömmlichen Bauweisen einsparen lassen (DBZ 2018; Memmler et al. 2017, S. 2).

In einer vom BBSR beauftragten Studie (Palzer et al. 2015) wird im Kontext modulares Bauen insbesondere die Wirtschaftlichkeit der Skelettbauweise mit Holz oder Stahl herausgestellt. Deren Vorteile liegen in der Flexibilität von Grundriss- und Fassadengestaltung sowie der konsequenten Trennung von Trag- und Hüllkonstruktion (Palzer et al. 2015, S. 2). Auch auf eine mögliche Trennung von Tragkonstruktion und technischer Ausrüstungsstruktur wird hingewiesen, da diese Komponenten nach dem Rückbau des Bauwerks unterschiedliche Pfade der Aufbereitung und des Recyclings haben.

Insbesondere durch die Kombination der Werkstoffe lassen sich beim Modulbau die verschiedenen Eigenschaften der Werkstoffe optimal nutzen, wodurch sich neue konstruktive Möglichkeiten eröffnen. Durch die Verbindung mit anderen Baustoffen wie Beton und Stahl als hybride Lösung hat Holz z.B. ein deutlich erweitertes Anwendungspotenzial (Kaufmann et al. 2017, S. 41 ff.). Die Holz-Beton-Verbunddecke als bekanntestes Hybridbauteil besteht aus einer druckbelasteten Betonoberschicht und einer unterseitigen, zugbelasteten Holzschicht. Die Vorteile sind neben der Möglichkeit der Realisierung größerer Spannweiten vor allem das verbesserte Schwingungsverhalten und die Erhöhung der Brandsicherheit. Die Kombination von Holz und Stahl wird favorisiert, wenn hohe Punktlasten im Gebäude abzuleiten sind. Hier werden Stahlteile z.B. als Verbindungselemente im Skelettbau eingesetzt. Die Kombination unterschiedlicher Konstruktionen und Werkstoffe ermöglicht konkurrenzfähige Lösungen im Vergleich zur herkömmlichen monolithischen Bauweise.

Grundsätzlich ermöglicht der moderne Betonfertigteiltbau auch den Einsatz spezieller Beton- und Bewehrungstechnologien (Mechtcherine 2019, S. 169), wie z.B. Faserbeton, Textilbeton, selbstverdichtendem Beton und hochfestem Beton (Borchardt/Schwerm 2000). Diese Betone sind jedoch eher teurere Nischenprodukte und dürften für den Massenmarkt im Wohnungsbau weniger infrage kommen. Im Bereich Stahlbeton ist die Herstellung von vorgespannten Elementen problemlos möglich (Moro 2019).

Der Modul- und Fertigteiltbau verändert auch das Tätigkeitsfeld und Arbeitsumfeld der Beschäftigten (Mechtcherine 2019, S. 115). Die Verlagerung wesentlicher Arbeitsschritte der Gebäudefertigung in die Werkshallen erlaubt gleichbleibende klimatische Arbeitsbedingungen und reduziert die Staub-, Lärm- und Abgasemissionen auf der Baustelle maßgeblich (Dutczak 2018). Durch Förder- und Hebeanlagen in den Fabriken lässt sich zudem der Umfang an körperlich schwerer Arbeit verringern (Albus 2017; Mechtcherine 2019, S. 115). Die zukünftige Entwicklung muss darauf gerichtet sein, Arbeiten auf der Baustelle bei hoher Qualität einfacher, schneller und damit kostengünstiger zu gestalten.

Um diese vielfältigen Potenziale des Fertigteil- und Modulbaus in Deutschland stärker nutzen zu können, muss die modulare/serielle Bauweise vor allem im mehrgeschossigen Wohnungsbau an Verbreitung gewinnen. Dafür sind aber noch einige Herausforderungen und Hemmnisse zu überwinden:

- › Bei bereits hergestellten Fertigteilen und Modulen sind nachträgliche Änderungen nur schwer machbar bzw. mit hohen Kosten verbunden (Mechtcherine 2019, S. 115). Aus diesem Grund kommt der Planungsphase des Bauwerks eine entscheidende Bedeutung zu und erfordert spezifische Kompetenzen, die jedoch oft nicht vorhanden sind. So sind viele Planer/innen mit dem Holzbau nicht ausreichend vertraut (Hafner et al. 2017).
- › Ein grundsätzliches Problem liegt darin, dass es kein spezifisch auf den Fertigteil- und Modulbau ausgelegtes Normungswesen gibt, in dem Regeln für die Ausführung und Qualitätsstandards niedergeschrieben sind (Mechtcherine 2019, S. 144). Wenige spezialisierte Unternehmen definieren ihre eigenen Standards im Rahmen übergeordneter Baunormen, die keinen spezifischen Bezug auf die Modulbauweise nehmen. Somit existieren keine einheitlichen Vorgaben, was Baugenehmigungen für bestimmte Modultypen betrifft, die in jedem Bundesland Deutschlands ohne langes Verfahren umgesetzt werden können.
- › Die MBO bildet die Grundlage für die Landesbauordnungen der Länder. Die uneinheitliche Umsetzung der MBO stellt jedoch ein relevantes Hemmnis für den verstärkten Einsatz des Modulbaus dar, was sich am Beispiel des Holzmodulbaus verdeutlichen lässt: Bezüglich brandschutztechnischer Vorschriften war hier lange für mehrgeschossige Gebäude (Gebäudeklasse 4 und 5) die M-HFH HolzR maßgeblich. Bis diese im Juni 2021 durch die neue MHolzBauRL abgelöst wurde, war die M-HFH HolzR zwar in allen Bundesländern eingeführt worden, allerdings mit teilweise sehr unterschiedlicher Ausgestaltung der Anforderungen (Purkus et al. 2020). Dementsprechend sah die Holzbaubranche das größte Marktpotenzial bis vor Kurzem weniger im Neu- als im Bestandsbau, wie z.B. bei Aufstockungen und energetischen Fassadensanierungen (Holzbau Deutschland 2020).

- › Schließlich fehlt es teilweise an den erforderlichen Baukapazitäten. Insbesondere der mehrgeschossige Holzbau setzt höhere planerische und technische Anforderungen sowie vermehrte Produktionskapazitäten im Fertigungswerk voraus. Da die Holzbaubranche aus einer kleinen und mittelständischen Betriebsstruktur besteht, ist nur eine geringe Anzahl an Holzbaufirmen in der Lage, umfangreiche mehrgeschossige Holzbauprojekte zu realisieren. Die Umsetzung scheitert teilweise auch an fehlenden Fachkräften sowie Nachwuchsproblemen in den Unternehmen.

5.4 Fazit und Handlungsfelder

Seriell hergestellte Bauelemente und -teile werden heute praktisch bei jedem Gebäudebau eingesetzt. Kindertagesstätten, Schulen, Krankenhäuser und Verwaltungsgebäude werden seit vielen Jahren modular gebaut. Im Wohnungsbau hingegen galt seriell und modulares Bauen lange als eintönig, unattraktiv und arm an Varianz. Viele Architekt/innen und auch Bauherren haben bis heute Vorbehalte gegenüber dieser Bauweise. Obwohl sich dadurch maßgebliche Bauzeitverkürzungen und Kostenreduktionen erreichen lassen, ist der moderne Modulbau im Wohnungsbau mit einem Vorfertigungsgrad bis zu 90% in Deutschland noch nicht wirklich etabliert (Koschany 2020) – anders als etwa in Großbritannien oder den Niederlanden, wo modulares und seriell Bauen bereits eine deutlich höhere Bedeutung haben.

Dabei haben sich die planerischen und technologischen Rahmenbedingungen und Möglichkeiten in den letzten Jahren gravierend geändert. Digitale und weitgehend vollautomatisierte Vorfertigungsmethoden ermöglichen eine nie dagewesene Komplexität und Varianz der Fertigteile und Module. In der Auslegungs- und Planungsphase sind in enger Abstimmung mit Kund/innen bzw. Bauherren 3-D-Simulations- und Kalkulationsmodelle für verschiedene Szenarien und Abläufe in der Fertigung möglich. Die Integration moderner CAD-, CAM- und BIM-Methoden erlaubt eine durchgängig automatisierte robotergestützte Massenproduktion von hoher Präzision. Somit ist modulares Bauen eine besondere Option im planerischen und organisatorischen Instrumentenkasten. Mit zunehmender Implementierung digitaler Methoden in der Fertigung werden die Prozesse immer effizienter.

Module und Fertigteile sind in der Regel aus Stahlbeton, Stahl oder Holz oder in Kombination gefertigt. Jedes Material hat seine spezifischen Eigenschaften und damit Vor- und Nachteile:

- › Betonfertigteile, wie z. B. Deckenplatten (gefertigt in computergesteuerten Betonfertigteilverken), werden im Bauwesen im großen Umfang verwendet, und zwar als integrierte Baukomponenten in allen Bereichen der Baubranche. Im seriellen und modularen Wohnungsbau hat Stahlbeton jedoch aktuell eine geringe Bedeutung. Die Gründe hierfür sind die schlechten bauklimatischen Eigenschaften des Werkstoffes, das sehr hohe Gewicht der einzelnen Raumzellen und die kaum mögliche Wiederverwendung der Elemente.
- › Das Maßschneiden von Lösungen mit digitalen Entwurfs- und automatisierten Fertigungstechniken prädestiniert insbesondere den modernen Holzbau für den modularen Gebäudebau. Eingesetzt werden flächige, additiv hergestellte Bauteile aus Vollholz oder Holzwerkstoffen. Das präzise Fügen unterschiedlicher Bauelemente ist gängige Praxis geworden. Zudem gewinnt Holz als Baustoff in der Debatte um nachhaltiges Bauen immer mehr an Bedeutung. Durch das Bauen mit Holz können große Mengen CO₂ langfristig gebunden und energieintensive Baumaterialien wie Ziegel, Zement und Stahl substituiert werden.
- › Aufgrund ständiger Weiterentwicklungen auf Materialebene sowie von Systemoptimierungen im Vorfertigungsprozess entwickelt sich die einst nur in Nischenmärkten vertretene Stahlbauweise zunehmend zu einer zukunftsfähigen Systembauweise. Zwar hat sich diese in Deutschland noch nicht flächendeckend etabliert, dennoch geht der Trend vor allem bei Gewerbebauten eindeutig in Richtung seriell Bauen mit Leichtbaumodulen. Verbesserungsbedarf gibt es hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, wie z. B. Festigkeit sowie Dauerhaftigkeit der Stähle (Mechtcherine 2019, S. 145).

Durch die Kombination der Werkstoffe lassen sich beim Modulbau die unterschiedlichen Eigenschaften der Werkstoffe optimal nutzen, wodurch sich neue konstruktive Möglichkeiten eröffnen. Als hybride Lösung in Verbindung mit Stahl oder Beton hat Holz ein deutlich erweitertes Anwendungspotenzial (erhöhte Brandsicherheit, verbessertes Schwingungsverhalten). Beton hat komplementäre Eigenschaften (niedrige Brennbarkeit, hohe Masse) zu Holz, die z. B. im Deckenbau optimal genutzt werden können. Dagegen wird die Kombination von Holz und Stahl favorisiert, wenn hohe Punktlasten im Gebäude abzuleiten sind. Hier werden Stahlteile z. B. als Verbindungselemente im Skelettbau eingesetzt.

Eine entscheidende Frage ist, wie der – vor allem aus ökologischer Sicht besonders vorteilhafte – mehrgeschossige Holzbau an Bedeutung gewinnen kann (TAB 2022). Mehrgeschossige Bauten ermöglichen vor allem in hochpreisigen Städten grundsätzlich eine effizientere Flächennutzung. Bei Mehrfamilienhäusern bewegt sich die Holzbauquote derzeit allerdings noch auf sehr niedrigem Niveau. Als Hemmnis erweisen sich die fehlenden herstellerübergreifenden Standards, die wichtig wären, um Kompatibilität, Erweiterung sowie Wiederverwendung der Module sicherzustellen. Modulares Bauen – insbesondere mit Holz und im mehrgeschossigen Bereich – bedarf aufgrund des hohen Vorfertigungsgrades einer guten Vorplanung und einer frühen Integration der Hersteller von Fertigbauteilen und Modulen in den gesamten Bauprozess. Viele Architekt/innen sind noch nicht bereit, diesen Mehraufwand zu betreiben, oder verfügen nicht über die erforderlichen Kompetenzen. Erschwerend kommen uneinheitliche Vorgaben (z. B. hinsichtlich der Brandschutzanforderungen) in den einzelnen Landesbauordnungen hinzu.

All das erhöht den Planungs- und Genehmigungsaufwand und ist zwangsläufig mit steigenden Kosten verbunden, was die Wirtschaftlichkeit des Modul- und Fertigteilbaus mindert – insbesondere angesichts des hohen Investitionsbedarfs, der für moderne, automatisierte Produktionsanlagen zu veranschlagen ist. Handlungsbedarfe ergeben sich folglich vor allem im Bereich Standardisierung und Normung, aber auch die Technikentwicklung wäre weiter zu befördern (zum Folgenden Mechtcherine 2019, S. 136 u. 170 f.):

- › Um die Errichtung seriell gefertigter Typenhäuser zu beschleunigen und zu vereinfachen, bedarf es in erster Linie der *Entwicklung standardisierter Lösungen*. Dabei wären vor allem die Verbindungsstellen zwischen den Modulen fokussiert zu betrachten, um sicherzustellen, dass Umnutzung, Erweiterung und Modernisierung von Bauwerken herstellerunabhängig möglich sind. Aufgrund fehlender Normierung benötigen Modulbauten in der Regel eine aufwendige Zustimmung im Einzelfall oder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Richter 2020, S. 15), die besonders beim Bauen mit Holz durch die oft fehlende bundeseinheitliche Regelung wichtiger Bauvorschriften (z. B. Brandschutz) erschwert wird. Ein wichtiger Schritt zur Vereinfachung der Genehmigungsverfahren ist die 2019 auf Beschluss der Bauministerkonferenz in § 72a MBO eingeführte Möglichkeit, eine Typengenehmigung für Gebäude zu erteilen, »die in unterschiedlicher Ausführung, aber nach einem bestimmten System und aus bestimmten Bauteilen an mehreren Stellen errichtet werden sollen«. Wie bei den restlichen Vorschriften der MBO obliegt es allerdings auch hier den Ländern, die Typengenehmigung rechtlich verbindlich in den jeweiligen Landesbauordnungen festzuschreiben. Für die Förderung des modularen/seriellen Bauens wäre eine bundeseinheitliche Bauordnung jedenfalls sehr wünschenswert und könnte auch die Entwicklung herstellerübergreifender Standards befördern. Helfen könnte auch die Straffung der bereits bestehenden freiwilligen Gütezeichen,⁹⁶ mit denen die Qualität von Produkten nach festgelegten Kriterien bewertet wird. Sofern eine unabhängige Vergabe und Kontrolle sichergestellt sind (z. B. durch Kammern oder Fachverbände), könnten sich solche Produktkennzeichnungen nicht nur positiv auf die Qualitätssicherung, sondern auch auf die Kompatibilität und das Lifecyclemanagement modularer Systeme auswirken.
- › Um die Entwicklung der Modulbauweise unter digitalen Rahmenbedingungen technisch voranzutreiben, bedarf es *breitgefächerter Forschungsaktivitäten* in den Bereichen Baukonstruktion, Statik und Materialtechnologie. Dabei sind auch ökologische und wirtschaftliche Aspekte der Modulbauweise zu beachten sowie der Rückbau und das Recycling bei der Wahl der Baustoffe und konstruktiven Gestaltung zu berücksichtigen. Geeignete Konstruktionen und leistungsfähigere Materialien könnten dazu beitragen, den Materialeinsatz zur Herstellung modularer Bauwerke deutlich zu reduzieren. Ein wichtiges Forschungsfeld in diesem Zusammenhang bildet die Entwicklung einer reversiblen, standardisierbaren Fügetechnik. Insgesamt wird hierfür ein integrierter Forschungsansatz unter Beteiligung von Architekt/innen, Tragwerksplaner/innen, Bauphysiker/innen und Gebäudetechniker/innen benötigt. Neben der gezielten Förderung von Forschungsvorhaben wäre die Einrichtung eines Forschungsclusters unter breiter Beteiligung der Industrie besonders geeignet, die Bearbeitung dieser interdisziplinären Aktivitäten anwendungsorientiert voranzutreiben, Modell- und Demonstrationsvorhaben zu entwickeln (analog etwa zum »DFAB HOUSE« der ETH Zürich) sowie auch erste Vorschläge für technische Leitlinien und Standards zu erarbeiten.

⁹⁶ Zu erwähnen sind hier etwa die Aktivitäten des RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V., das für ein breites Spektrum an Produkten und Dienstleistungen, darunter der Holzhausbau (RAL-GZ 422) und die Stahlsystembauweise (RAL-GZ 613), Gütezeichen entwickelt hat.

6 Automatisierte Baumaschinen

Als Baumaschinen werden alle Maschinen und Geräte bezeichnet, die im Bauwesen genutzt werden, was ein sehr vielfältiges Anwendungsspektrum umfasst. Baumaschinen werden bei der Gewinnung, Aufbereitung, Herstellung und Verarbeitung von Erd- und Baustoffen, beim Transportieren und Fördern von Erd-, Bau- und Bauhilfsstoffen sowie beim Herstellen und Instandhalten von Bauwerken aller Art eingesetzt (Will 2019, S. 8).

Entsprechend den vielfältigen Anwendungsszenarien gibt es eine breite Skala an Anforderungen und technischen Ausführungen, von stationären über handgeführte bis zu selbstfahrenden Maschinen. Auch die Größenordnung ist sehr unterschiedlich und reicht von Kleinmaschinen mit einem Eigengewicht von 100 kg bis hin zu Großgeräten, die mehrere Hundert Tonnen wiegen (im Einzelfall bis über 10.000 t) (Will 2019, S. 13 f.).

Aufgrund ihrer Schlüsselrolle in Bauprozessen haben Baumaschinen maßgeblichen Einfluss auf die Effektivität und die Effizienz der Bauausführung. Automatisierte und digitalisierte Baumaschinen bieten demzufolge ein erhebliches Potenzial, die Produktivität auf der Baustelle zu steigern. Was für die Baubranche im Allgemeinen festzustellen ist (Kap. 3.2), nämlich ein bisher nur unzureichender Digitalisierungsgrad, gilt allerdings auch für den Baumaschinensektor. Bisher gibt es nur eine geringe Durchdringung des Marktes mit industriell tauglichen digitalisierten Systemen. Zu beobachten ist, dass zwar zahlreiche Ideen und Ansätze zur Automatisierung und Digitalisierung vorliegen, reale Anwendungen aber vielfach noch fehlen (Will 2019, S. 8).

Das hat wesentlich mit den sehr heterogenen Bedingungen zu tun, unter denen Baumaschinen eingesetzt werden (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 61). Der Großteil leistet mechanische Arbeit durch die gezielte Bewegung der Arbeitsausrüstung oder des Fahrwerks und überträgt Kräfte und Momente auf die Umgebung. Baumaschinen sind geprägt durch ein Zusammenspiel von mechanischen, elektrischen und hydraulischen Komponenten im Einsatz mit wechselnden Umweltbedingungen und hochgradig stochastischen Prozessmedien. Ein Radlader muss sein Ladespiel absolvieren können, egal ob er leichte Holzhackschnitzel in einer Industrieanlage lädt oder ob er große Findlinge im Steinbruch bei Regen transportieren muss. Sowohl die geometrische Form als auch die Zusammensetzung und die stofflichen Eigenschaften der Schüttgüter und Erdstoffe lassen sich unzureichend erfassen und auch schlecht in mathematischen Modellen beschreiben. Aus diesem Grund existieren bisher keine vollautomatisierten und nur eine überschaubare Menge an teilautomatisierten Maschinen.

Das folgende Kapitel basiert auf dem Gutachten von Will (2019) und legt Stand und Perspektiven der Automatisierung und Digitalisierung von Baumaschinen dar. Zuerst werden wichtige Rahmenbedingungen erläutert, die Einfluss auf die Entwicklung und den Betrieb von Baumaschinen nehmen (Kap. 6.1). Anhand von Vermessung, Tiefbau, Straßenbau und Hochbau wird anschließend der Status quo der Maschinenteknik im Bauprozess aufgezeigt (Kap. 6.2), bevor der aktuelle Stand sowie die Entwicklungsperspektiven von wichtigen Grundlagentechnologien für die Automatisierung und Digitalisierung von Baumaschinen (wie Navigation, Personen- und Objekterkennung, Antriebstechnik etc.) beleuchtet werden (Kap. 6.3).

6.1 Rahmenbedingungen für Innovationen im Baumaschinensektor

Nicht jede Technologie, die grundsätzlich bereits verfügbar ist, kommt im realen Baubetrieb auch zum Einsatz (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 17 u. 23 f.). Was zum Stand der Technik zu zählen ist und was nicht, ist deshalb häufig umstritten. So haben einige neuartige Technologien – wie z. B. Robotertechnik und KI-Verfahren – bisher kaum Eingang in die (Bau-)Praxis gefunden, obwohl aus rein technischer Sicht schon vieles möglich wäre und einige Lösungen im Rahmen von Forschungsprojekten bereits umgesetzt sind.

Daher sollen zunächst wesentliche Rahmenbedingungen schlaglichtartig erläutert werden, die für den Einsatz von automatisierten Baumaschinen relevant sind. Dazu gehören insbesondere die Markt- und Wettbewerbssituation sowie die Regulierung, Normung und Standardisierung. Diese Aspekte haben (neben anderen wie Wirtschaftlichkeit, Arbeitsmarkt oder Akzeptanz; Will 2019, S. 17 ff.) maßgeblichen Einfluss darauf, ob und wann eine Technologie im realen Baubetrieb ankommt, und bestimmen daher den Stand der Technik entscheidend mit.

Markt- und Wettbewerbssituation

Die Baumaschinenindustrie zählt mit einem Umsatz von 14,1 Mrd. Euro im Jahr 2018 sowie rund 40.000 Beschäftigten zu den stärksten Sektoren des deutschen Maschinenbaus (VDMA 2018);⁹⁷ der Umsatzanteil am gesamten Maschinenbau liegt bei rund 5 % (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 17 f.). Ein prägendes Merkmal ist die internationale Aufstellung der meisten Unternehmen, sowohl was den Absatzmarkt als auch den Beschaffungsmarkt und die Produktionsstandorte betrifft. Grund dafür sind die – gemessen am Automotive-Bereich – geringen Produktionsstückzahlen, die zur Folge haben, dass es für Baumaschinenhersteller in der Regel nicht wirtschaftlich ist, eine Lösung nur für bestimmte nationale Märkte zu entwickeln. Aufgrund der internationalen Ausrichtung der Baumaschinenindustrie ist es auch kaum möglich, zwischen deutschen und ausländischen Herstellern zu unterscheiden.⁹⁸

International beanspruchen die deutschen Hersteller von Baumaschinen mit rund 11 % einen relevanten Marktanteil (VDMA 2018) – um sich auch zukünftig behaupten zu können, müssen sie sich durch technische Innovationen weiter profilieren (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 17 u. 22). Daher sind die Hersteller an der Weiterentwicklung von Technologien und Maschinen stark interessiert und somit ein wesentlicher Akteur innerhalb der Forschungs- und Entwicklungslandschaft, gemeinsam mit Zulieferern, Engineering-Dienstleistern und Forschungseinrichtungen. Die deutsche Baumaschinenindustrie spürt allerdings zunehmend, ebenso wie andere Industriezweige auch, den Mangel an qualifizierten Fachkräften (Stahn 2019). Angesichts der fortschreitenden Automatisierung und Digitalisierung gilt dies ganz besonders für die Bereiche Forschung, Entwicklung und Konstruktion, in denen Ingenieur/innen der Fachrichtungen Maschinenbau, Mechatronik, Elektrotechnik, Automatisierungstechnik und verwandter Richtungen sowie in steigendem Maße Programmierer/innen benötigt werden. Die meisten Entwickler/innen in den Unternehmen sind für die heutigen interdisziplinären Anforderungen nicht ausgebildet, sondern haben vor 10, 20 oder 30 Jahren ein klassisches Maschinenbau- oder Elektrotechnikstudium absolviert. Gleichzeitig mangelt es den jüngeren, entsprechend ausgebildeten Ingenieur/innen noch an der notwendigen Erfahrung. Diese Problematik lässt sich durch Weiterbildung zumindest mittelfristig nur bedingt auflösen. Neben einer allgemeinen Stärkung der Fächer Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik müssen sich Unternehmen daher neuen Wegen öffnen, um die benötigten personellen Ressourcen für Forschung und Entwicklung zu gewinnen – dazu gehört beispielsweise die Zusammenarbeit mit externen Dienstleistern, die auf Produktentwicklungen in bestimmten Bereichen spezialisiert sind.

Eine Besonderheit mit Einfluss auf die Entwicklung automatisierter Baumaschinen ist der Lebenszyklus der Baumaschinen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 18). Während hochbeanspruchte Baumaschinen in der Rohstoffgewinnung (z. B. Steinbruch) meist sehr hohe Nutzungszeiten haben und nach einigen Jahren durch neuere Maschinen ersetzt werden, weisen andere wie Radlader und Bagger auf allgemeinen Baustellen nur sehr geringe Nutzungszeiten auf (wenige Betriebsstunden pro Tag). Daher sind diese Maschinen oft über sehr lange Zeiträume, teilweise mehrere Jahrzehnte, bei einem Bauunternehmen im Einsatz. Auf nahezu allen Baustellen sind folglich außerordentlich heterogene Maschinenparks in Betrieb. Neben Alter und Ausstattung der Maschinen betrifft dies auch die Fabrikate, da die weit überwiegende Mehrzahl der Bauunternehmen über Maschinen unterschiedlicher Hersteller verfügt. All das sind Gründe dafür, warum Automatisierungslösungen, die in der Regel das Zusammenspiel mehrerer Maschinen auf einer Baustelle erfordern, nur schwer umzusetzen sind.

Bei der Entwicklung von Maschinen haben die Hersteller zudem zu beachten, dass es einen relevanten Zweitmarkt für Baumaschinen gibt (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 18). Manche (meist große) Bauunternehmen verkaufen ihre Baumaschinen nach einigen Jahren Betriebszeit in andere Länder oder an weniger anspruchsvolle Unternehmen, die sie in der Regel mit weniger qualifiziertem Personal betreiben. Hochtechnisierte Maschinen sind deshalb auf dem Zweitmarkt häufig schwerer verkäuflich, was wiederum die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Erstkäufers negativ beeinflusst. Auch dies kann ein Hemmnis für die Entwicklung anspruchsvoller Maschinenteknik sein.

⁹⁷ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/173637/umfrage/branchenumsatz-des-maschinenbaus-in-deutschland-nach-sektoren/> (12.3.2021)

⁹⁸ Unter den zehn größten Herstellern von Baumaschinen findet sich kein Unternehmen mit Stammsitz in Deutschland (Sharry 2018). Die Firma Liebherr, die in Deutschland gegründet wurde und mit zahlreichen deutschen Standorten der größte inländische Hersteller von Baumaschinen ist, hat ihren Konzernsitz inzwischen in der Schweiz. Bedeutende deutsche Hersteller, wenn auch nicht unter den internationalen Top 10, sind beispielweise Bauer, Herrenknecht, Sennebogen und Wacker Neuson. Daneben haben auch zahlreiche internationale Maschinenhersteller deutsche Entwicklungs- und Produktionsstandorte.

Regulierung, Normung und Standardisierung

Entwicklung und Betrieb von Baumaschinen unterliegen einer starken Regulierung sowohl auf EU- als auch nationaler Ebene (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 18 ff.). Oberstes Gebot ist dabei die Sicherheit für alle Personen, die mit der Technologie in Berührung kommen: Dazu gehören Bediener/innen von Maschinen, weitere am Arbeitsprozess Beteiligte, bei Baueinsätzen ohne sichere Angrenzung zum öffentlichen Raum auch Passanten bis hin zu spielenden Kindern. Das Bauwesen zählt generell zu den Wirtschaftszweigen mit den höchsten Unfallzahlen: Während nach Angaben der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung 2018 von 1.000 Beschäftigten in der gewerblichen Wirtschaft rund 23 pro Jahr einen meldepflichtigen Unfall erlitten, werden in der Bauwirtschaft rund 53 Unfälle pro Jahr gemeldet.⁹⁹

Daher ist im Umfeld des Bauwesens eine besonders ausgeprägte Sensibilität für die Einhaltung von Sicherheitsanforderungen festzustellen sowie Zurückhaltung aller Beteiligten beim Einsatz neuer Technologien, soweit diese neue oder veränderte Risiken mit sich bringen. Sicherheitsrelevante Regelungen enthalten insbesondere die Richtlinie 2006/42/EG,¹⁰⁰ das Produkthaftungsgesetz¹⁰¹ für die Hersteller sowie das Arbeitsschutzgesetz¹⁰² und die Richtlinie 89/391/EWG¹⁰³ für die Betreiber von Baumaschinen. Hinzu kommen spezifische Regelwerke beispielsweise aus Normungsgremien, Berufsgenossenschaften und Landesbaubehörden. Außerdem gilt es weitere Vorgaben aus der EU-Emissionsgesetzgebung und, soweit es sich um Fahrzeuge handelt, die sich zeitweise im Straßenverkehr bewegen, aus der Straßenverkehrsordnung zu beachten.

Da ein Hersteller seine Maschinen in der Regel für mehrere internationale Märkte entwickelt, hemmen die teilweise unterschiedlichen gesetzlichen Anforderungen in einzelnen Ländern und Regionen eine effiziente Entwicklung neuer Lösungen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 19). Das gilt selbst für die nationale Ebene, wo die teilweise unterschiedlichen Landesbauvorschriften behindernd wirken können. Diese schreiben zwar in der Regel keine technische Ausführung der Maschinen vor, aber indirekt ergeben sich aus den Vorgaben hinsichtlich der Bauausführung (z. B. Eigenschaften einer zu bauenden Straße wie Ebenheit oder Verdichtung) dennoch spezifische Anforderungen an die Maschinenteknik. Eine stärkere Vereinheitlichung der länderspezifischen Bauvorschriften ist zwar im Rahmen der beständig aktualisierten MBO seit 2002 vorgesehen, findet jedoch bislang in den einzelnen Landesbauordnungen und Landesbauvorschriften noch keinen Niederschlag (BBSR 2017).¹⁰⁴

Die fehlende Harmonisierung von Vorschriften und Normen bringt für Maschinenhersteller erhebliche Mehraufwendungen mit sich und stellt damit ein Hindernis bei der Realisierung und Einführung neuer Technologien dar. Deshalb unterstützen die meisten Baumaschinenfirmen internationale Standardisierungs- und Normierungsbemühungen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 19). Eine wichtige Organisation in diesem Zusammenhang ist das CEN, speziell das Gremium CEN/TC 151 – Bau- und Baustoffmaschinen – Sicherheit,¹⁰⁵ das für die europäische Normung im Bereich der Baumaschinensicherheit verantwortlich ist. Es hat aktuell 91 einschlägige Richtlinien veröffentlicht, 63 Richtlinien sind in Be- oder Überarbeitung.

Weitgehend unreguliert sind bisher die steuerungstechnischen Schnittstellen bei Baumaschinen, was ein erhebliches Problem für die Digitalisierung sowie die maschinenübergreifende Automatisierung darstellt (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 19). Im Bereich der Landmaschinen existiert bereits seit Jahren der ISOBUS-Standard, der physikalische Eigenschaften, Statusdefinitionen, Datenformate und Netzwerkschnittstellen regelt und sich bei Herstellern und Anwender/innen von Landmaschinen weitgehend durchgesetzt hat. Eine erste Übertragung dieses Gedankens auf den Bereich der Baumaschinen bietet die ISO 15143-3 »Erdbaumaschinen und mobile Straßenbaumaschinen – Baustellen-Datenaustausch-Telematikdaten«, die seit 2016 verfügbar ist. Die

⁹⁹ <https://www.dguv.de/de/zahlen-fakten/au-wu-geschehen/au-1000-vollarbeiter/index.jsp> (12.3.2021)

¹⁰⁰ Richtlinie 2006/42/EG über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG

¹⁰¹ Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte (Produkthaftungsgesetz – ProdHaftG)

¹⁰² Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG)

¹⁰³ Richtlinie 89/391/EWG über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit

¹⁰⁴ Für einen Überblick über das zersplitterte öffentliche Baurecht in Deutschland www.bundesbaurecht.de/Demo/laender.php (12.3.2021).

¹⁰⁵ https://standards.cen.eu/dyn/www/?p=204:22:0::: FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:6133,22&cs=12ADC681F6A788AE5F9E1D295AC6F5D4C (12.3.2021)

ISO 15143-3 vereinheitlicht den Austausch von grundlegenden Zustands- und Leistungsdaten wie Position, Verbrauch, Motorstatus etc. Weiterführende Anwendungen wie Predictive Maintenance¹⁰⁶, Produktivitätsmonitoring oder Automatisierungsfunktionen sind damit jedoch nicht realisierbar. Der Standard, dessen Entwicklung maßgeblich durch den VDBUM in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität München vorangetrieben wurde, muss deshalb weiterentwickelt werden.

Mit dieser Aufgabe ist u. a. seit April 2019 die Arbeitsgemeinschaft Machines in Construction – 4.0 MiC 4.0 betraut (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 19), die sich unter dem Dach des VDMA bildete. Sie hat sich zum Ziel gesetzt, hinsichtlich Kommunikation und Bedienung von Baumaschinen herstellerübergreifende Digitalisierungsstandards unter Einbeziehung der vorgenannten ISO 15143-3 zu definieren (VDMA 2019). Es wurden Arbeitskreise gegründet zu den Themen Maschinendaten (als Erweiterung zur ISO 15143-3), Systemarchitektur, Human-Machine-Interface (HMI), Anbaugerätekommunikation und Datenrechte.¹⁰⁷ Ergebnisse wurden bislang nicht veröffentlicht (Stand April 2021).

6.2 Maschinentechnik im Bauprozess

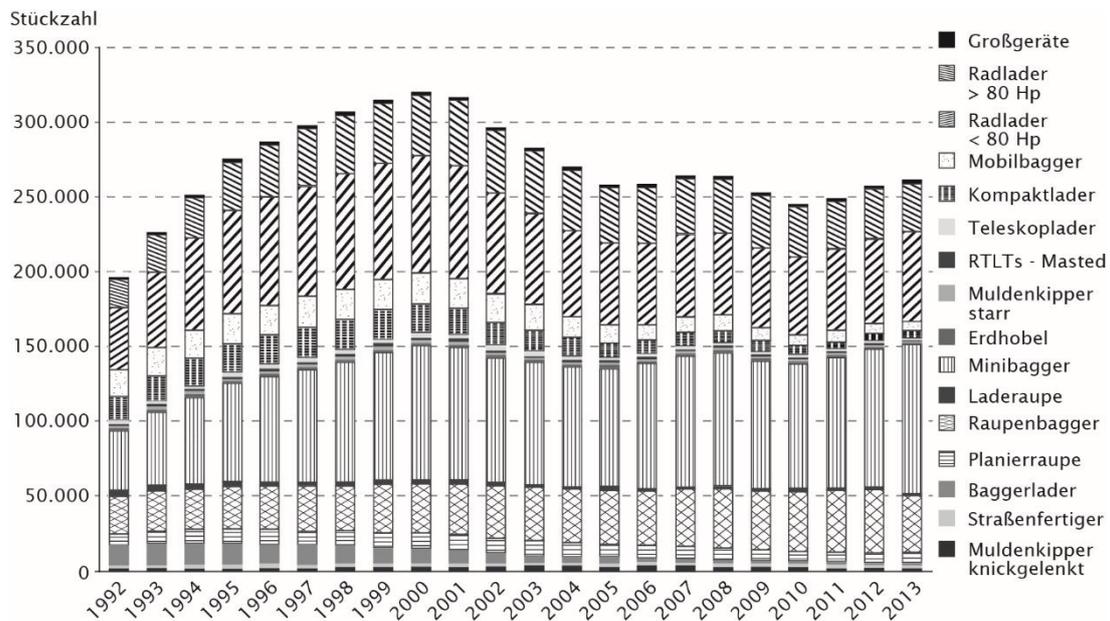
Maschinentypen und Anwendungen von Baumaschinen sind äußerst vielfältig (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 54). Art und Tiefe des Maschineneinsatzes in Bauprojekten hängen zum einen vom betrachteten Baubereich ab – zu unterscheiden sind hier insbesondere Tiefbau einschließlich Spezialtiefbau, Verkehrswegebau und Hochbau. Zum anderen ist aber auch relevant, ob es sich um ein größeres industrielles Bauprojekt oder ein kleineres, eher handwerklich geprägtes Bauvorhaben handelt. In der Bauindustrie werden in der Regel die Möglichkeiten des Maschineneinsatzes ausgeschöpft, bei Überschreitung der eigenen Kapazitäten auch ergänzt durch Einsatz von Mietmaschinen. Dagegen wird im Bauhandwerk eher mit minimalem Maschineneinsatz gearbeitet, bedingt durch die für kleine Handwerksbetriebe verhältnismäßig hohen Investitionskosten für Baumaschinen und die für einzelne Betriebe unzureichende Auslastung. Bestenfalls werden hier Mehrfunktionsmaschinen eingesetzt, wie z. B. ein Radlader, der zahlreiche Funktionen auf der Baustelle ausführen kann – neben Erdarbeiten auch Materialtransport für Stückgut und Schüttgut sowie in eingeschränktem Umfang auch Hebearbeiten).

Abbildung 6.1 zeigt die zahlenmäßige Entwicklung des Baumaschinenbestandes in Deutschland bis 2013 (neuere Daten sind nicht bekannt), aufgeschlüsselt nach den relevantesten Maschinentypen. Demzufolge gehören Radlader, Minibagger und Raupenbagger zu den häufigsten Baugeräten.

¹⁰⁶ Unter Predictive Maintenance wird die vorausschauende Instandhaltung von Maschinen und Anlagen verstanden, indem auf der Analyse relevanter Daten der Instandhaltungsbedarf abgeschätzt wird.

¹⁰⁷ <https://mic40.vdma.org/viewer/-/v2article/render/45913344> (12.3.2021)

Abb. 6.1 Bestandsentwicklung verschiedener Baumaschinentypen in Deutschland von 1992 bis 2013



RTLTL: Rough Terrain Lift Truck = geländegängige Stapler

Nicht aufgeführt sind Maschinen mit Antriebsleistung < 19 kW, mobile Krane sowie Baumaschinen mit elektrischem Antrieb.

Quelle: FVB 2015, S. 23

Im Folgenden wird der Stand der Maschinenautomatisierung¹⁰⁸ im Bauprozess überblicksartig dargelegt, wobei der Fokus auf industriellen Bauprozessen liegt. Da eine Gesamtbetrachtung aller Anwendungsbereiche den verfügbaren Rahmen bei Weitem übersteigen würde, werden ausschließlich die besonders relevanten Gebiete Tiefbau, Straßenbau und Hochbau thematisiert (nicht hingegen z. B. Tunnelbau, Wasserbau, Abbruch, Bergbau oder Tiefbohren). Ergänzend wird auch der Stand der Vermessungstechnik im Baubereich zusammengefasst. Die Betrachtungen orientieren sich primär an den mittelgroßen Maschinenkategorien, die im urbanen Umfeld bestimmend sind. Dabei handelt es sich vorwiegend um selbstfahrende, durch einen Geräteführer gesteuerte Maschinen (z. B. Radlader, Bagger, Straßenfertiger, Walze, Bohrgerät, Autobetonpumpe). Großgeräte, die schwerpunktmäßig in der Gewinnung (z. B. Großbagger) im Einsatz sind, stehen nicht im Fokus. Auch die kleineren, überwiegend handgeführten Baugeräte (z. B. Stampfer oder Hydraulikhammer) werden hier nicht betrachtet.

6.2.1 Vermessung

Zu Beginn eines Bauvorhabens sind für die Erstellung von Lageplänen die Geländeinformationen zu bestimmen oder für Baumaßnahmen im Bestand das Aufmaß von Bausubstanz und Medienverlegung zu ermitteln (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 55 u. 59). Für Ersteres sind je nach Bundesland topografische und Flurkarten online verfügbar, wobei für die meisten Baumaßnahmen, vor allem im Hochbau, die Datenauflösung zu gering ist, sodass eine separate Vermessung mit analogen und digitalen Hilfsmitteln zu erfolgen hat. Dasselbe gilt für die Aufmaß-

¹⁰⁸ Unter Automatisierung wird das Ziel gefasst, Maschinen in die Lage zu versetzen, Arbeitsprozesse ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen ausführen zu können. Dabei sind unterschiedliche Ebenen und Grade der Automatisierung zu unterscheiden: Das Spektrum reicht von Assistenzsystemen, welche dem menschlichen Bediener die Steuerung erleichtern (beispielsweise durch das Aufbereiten von Informationen), aber nicht selbst in die Steuerung eingreifen, bis hin zu vollständig autonomen Systemen, welche selbstständig agieren und operieren und kein menschliches Eingreifen mehr erforderlich ist (Will 2019, S. 10 f. u. 13 f.).

nahme im Bestand, da in der Regel Pläne nicht vorliegen oder veraltet sind. Die präzise Durchführung entsprechender Vermessungsarbeiten auf dem Baufeld ist Aufgabe der Ingenieurgeodäsie. Dazu gehören die Erfassung und Modellierung des Istzustandes eines Objekts/Gebiets (Aufnahme), die Übertragung geplanter geometrischer Größen/Merkmale in die Örtlichkeit (Absteckung) sowie die Überprüfung der Position und Geometrie eines Objekts bezüglich der Planungsdaten (Monitoring).

Durch geodätische Grundlagenvermessungen wird ein 2- oder 3-D-Modell erstellt (digitale Karten, Pläne, Geländemodelle), das die Erdoberfläche wie auch alle Bauwerke umfasst (As-built-Dokumentation). Dieses dient auch als Datengrundlage zur messtechnischen Überwachung von Montageprozessen und Positionierungsaufgaben von Baumaschinen und deren Werkzeugen (Will 2019, S. 59). Zur Anwendung kommen dabei klassische Vermessungsgeräte wie Tachymeter, Nivelliere oder Neigungsmesser (zur Bestimmung von Höhenunterschieden, Winkeln und Distanzen) und neue digitale Vermessungsmethoden, die vor allem für die Erfassung bereits bestehender Gebäude geeignet sind. Zu Letzteren zählen das 3-D-Laserscanning und die Photogrammetrie, die zur exakten Positionsbestimmung oft in Verbindung mit satellitenbasierten Navigationssystemen zum Einsatz kommen (zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 185 ff.):

- › 3-D-Laserscanningsysteme ermöglichen eine flächendeckende Vermessung von Objekten bzw. Gebieten und die Erstellung von dreidimensionalen As-built-Modellen. Mit Light-Detection-and-Ranging (LiDAR)-Scannern wird dabei die Umgebung von mehreren Standpunkten aus rasterförmig abgetastet und anhand der Reflexionen dichte Punktwolken generiert, aus denen sich am Computer dreidimensionale Oberflächen- und Objektmodelle erstellen lassen. Das 3-D-Laserscanning lässt sich sowohl im Infrastruktur- als auch im Wohnungs- und Gebäudebau einsetzen, um mit den erzeugten 3-D-Modellen ein genaues und effizientes Aufmaß der aktuellen Bausituation zu gewährleisten. Vorteile der Methode sind u. a. die hohe Messgenauigkeit, eine schnelle Datenaufnahme, das Durchdringen von Vegetation sowie die Anwendbarkeit auch bei schlechten Lichtverhältnissen und in der Nacht (Ehm/Hesse 2014). Neben terrestrischen 3-D-Scannern (z. B. von Trimble, Leica etc.) ist auch der drohnengestützte Einsatz aus der Luft möglich. Letzteres ist zwar wegen der kostenintensiven Hardware deutlich teurer,¹⁰⁹ aber bei größeren Bauwerken unter Umständen notwendig, da terrestrische Scanner ab einer gewissen Objekthöhe nicht mehr genügend Informationen liefern, um ein komplettes dreidimensionales Modell zu erzeugen.
- › Eine kostengünstigere Alternative zum 3-D-Laserscanning stellt die Photogrammetrie dar, mit der sich ebenfalls 3-D-Punktwolken und digitale Geländemodelle generieren lassen (Heipke 2017). Im Unterschied zum Laserverfahren werden hierfür zahlreiche (unter Umständen Hunderte bis Tausende) sich überlagernde Kameraaufnahmen verwendet (airteam 2018). Die Anforderungen an die Hardware sind dadurch geringer, da keine Lasertechnik benötigt wird, allerdings ist der nachträgliche Aufwand für die Bildbearbeitung (mittels geeigneter Software) höher und erfordert einiges an Know-how. Eine der häufigsten Anwendungen in diesem Bereich ist das Generieren von hochdetaillierten und maßstabsgetreuen Aufnahmen (Orthofotos) aus Drohnenbildern. Da Drohnen mit hochpräzisen satellitengestützten Navigationssystemen ausgerüstet werden können, ist es möglich, jedem Bild eine genaue Position zuzuordnen (Bernhardt et al. 2017, S. 17). Die erzeugten Orthofotos stellen den Aufnahmebereich entzerrungsfrei dar und lassen sich folglich nutzen, um Messungen maßstabsgetreu durchzuführen. Neben normalen 2-D-Bildern können am Computer mittels photogrammetrischer Verfahren auch komplexe 3-D-Modelle erzeugt werden (Mauro 2019) – jedoch aufgrund der erforderlichen relativ komplexen Datenauswertung nicht in der Geschwindigkeit, wie es mit Laseraufnahmen möglich ist.

Die Vermessungstechnik ist seit einiger Zeit im Wandel, wobei wie gezeigt vor allem der Einsatz von Drohnen auf dem Vormarsch ist (dazu und zum Folgenden Díaz et al. 2019, S. 186 ff.). Diese lassen sich mit 4K¹¹⁰-Kamera- und hochwertigen Laserscansystemen ausstatten, sodass sich bei einem Baustelleneinsatz unterschiedliche digitale Vermessungsdaten wie 2-D-Orthofotos oder 3-D-Geländemodelle erstellen lassen. Laut einer Marktstudie vom Verband unbemannte Luftfahrt (2019) nimmt die Vermessung den Spitzenplatz bei den industriellen Drohnenanwendungen ein. Ein wesentlicher Vorteil drohnengestützter gegenüber traditionellen Vermessungsmethoden ist darin zu sehen, dass sich mit relativ geringem Zeitaufwand eine sehr hohe Datenqualität selbst in unübersichtlichem, unzugänglichem Gelände erreichen lässt. Eine Programmierung für bestimmte Flugrouten mittels

¹⁰⁹ Eine geeignete Drohne mit LiDAR-Sensor und weiterem benötigten Equipment kann bis zu 350.000 US-Dollar kosten (airteam 2018).

¹¹⁰ Bei 4K (Binärpräfix) handelt es sich um einen sehr hochauflösenden Video- und Bildschirmstandard, auch als Ultra High Definition (UHD) bekannt.

Global-Positioning-System(GPS)-gestützter Kurshaltung ist möglich und bietet Flexibilität und besondere Zeitersparnisse gegenüber dem klassischen Vermessen mit Nivelliergeräten. Erforderlich ist jedoch geschultes Personal, das mit der (teils sehr teuren) Hardware sowie den großen Mengen an erzeugten Rohdaten umzugehen weiß und die strengen rechtlichen Voraussetzungen eines Drohneinsatzes kennt. Es gibt inzwischen zahlreiche spezialisierte Unternehmen, welche drohnengestützte Vermessungsarbeiten als Dienstleistung anbieten.

Daneben werden für die Echtzeitvermessung von Baustellen auch ganz neue Konzepte erprobt – etwa der Einsatz mobiler, automatisierter Roboter, die mittels Laserscanning und Photogrammetrie räumliche Abbilder der Baustellenszene generieren (Cao 2019; Edwards 2019; dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 59 f.). In einer verarbeiteten Form können aus den so erhobenen Daten Abweichungen vom Planungsstand errechnet und direkt während des Baufortschritts korrigiert werden. Neben den qualitativen Verbesserungen dient eine derartige Automatisierung und Digitalisierung von Vermessungsarbeiten der Steigerung der Produktivität, vor allem durch die Vermeidung von Baufehlern, die einer der größten Kostentreiber im Bauwesen darstellen. Die Ursachen dafür sind, wie in Kapitel 3 aufgezeigt, nicht zwangsläufig in der physischen Bauausführung zu finden, sondern in dem nicht abgestimmten Informationsaustausch und -abgleich zwischen den einzelnen Fachdisziplinen, welcher sich z. B. in fragmentierten Daten, uneinheitlichen Modellierungen, Medienbrüchen sowie fehlenden inhaltlichen und zeitlichen Abstimmungen ausdrückt. BIM verspricht hier Abhilfe, ist jedoch beim Bauen im Bestand auf eine exakte Vermessung der vorhandenen Gebäude angewiesen, um das BIM-Modell erstellen zu können (DVW/Runder Tisch GIS 2019). Neue Vermessungsmethoden wie das 3-D-Laserscanning eröffnen hierfür ganz neue Möglichkeiten (Scan to BIM; Ehm/Hesse 2014; Hellmann 2019).

6.2.2 Tiefbau

Tiefbau bezeichnet die Errichtung von Bauwerken, die an oder unter der Erdoberfläche liegen, wozu u. a. die Teilgebiete Erdbau, Grundbau und Spezialtiefbau gehören (Peter 2001). Zu den Maschinen, die im Tiefbau eingesetzt werden, gehören Planieraugen (Dozer), Radlader, Erd- oder Straßenhobel (Grader) sowie der Bagger als das am weitesten verbreitete Baugerät, auch Spezialmaschinen wie Bohr- oder Fräsgeräte sind zu nennen. Im Folgenden wird der maschinentechnische Automatisierungsgrad bei verschiedenen Arbeitsabläufen beleuchtet, die für den Tiefbau besonders relevant sind.

Steuerung des Arbeitsgeräts (Bagger)

Eine Hauptaufgabe der Bagger ist das Bewegen des Werkzeugs durch das Arbeitsmedium (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 62). Dies kann das Ausheben einer Grube mit einem Tieflöffel sein, das Bewegen eines Anbauverdichters auf der Bodenoberfläche oder das Greifen von Schrott oder Baumstämmen mit einem Greifwerkzeug. Die Bewegung wird dabei über Joysticks gesteuert, wobei jede Joystickachse einem Aktor zugeordnet ist. Das Zusammenspiel und der daraus resultierende, bevorzugt flüssige, Bewegungsablauf der Arbeitsausrüstung werden über die manuelle Kombination der Einzelbewegungen erreicht, wobei es beim klassischen Bediensystem keine Möglichkeit gibt, z. B. eine lineare Bewegung über eine einzige Hebelbewegung auszuführen. Die Überlagerung mehrerer Einzelbewegungen zu einer Gesamtbewegung ist für ungeübte Fahrer/innen äußerst schwierig zu realisieren.

Die Baggersteuerung ist deshalb ein naheliegender Ansatzpunkt für die Automatisierung (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 62 f.). In einer ersten Automatisierungsstufe werden von Herstellern reine Visualisierungslösungen angeboten (z. B. Trimble¹¹¹ oder Leica¹¹²). Der Bagger wird dazu sensorisch ausgerüstet, um die Lage der Arbeitsausrüstung zu erfassen, was den Fahrer/innen einen besseren Prozesseinblick gewährt. Weitergehende Lösungen ermöglichen die gewünschte Werkzeugbewegung entlang der Zielkoordinaten mit einfachen Joystickbewegungen, wobei die dafür notwendige Bewegung der Einzelaktoren auf der Grundlage eines Maschinenmodells berechnet und automatisiert ausgeführt wird.¹¹³ Komplettlösungen, um den Bagger auch automatisiert zu bewegen, sind erst wenige und nur für begrenzte Aufgaben auf dem Markt. Technologisch besteht hier die Schwierigkeit, die Prozesslast in die Regelung einzubeziehen und mit der Messtechnik die Umgebung zu erfassen,

¹¹¹ <https://www.sitech.de/produkte/maschinensteuerung/trimble-maschinensteuerung-fuer-bagger> (12.3.2021)

¹¹² <https://leica-geosystems.com/de-de/products/machine-control-systems/excavator> (12.3.2021)

¹¹³ https://www.cat.com/de_DE/campaigns/awareness/grade-with-assist.html (6.4.2021)

sodass ein effizienter Arbeitsprozess entsteht. Erfahrene Bediener/innen wissen intuitiv, wie mit Hindernissen umzugehen, wie tief zu graben und wie der Löffel zu führen ist, um eine ideale Füllung zu erreichen. Diesen Prozess zu automatisieren, ist außerordentlich schwierig, vor allem, weil bei aktuellen Baggersteuerungen keine Information über die Bodenbeschaffenheit vorliegt.¹¹⁴ Daher beschränken sich die angebotenen Automatisierungslösungen (z. B. von Komatsu) auf Prozesse mit geringen Lasten, wie beispielsweise das Ziehen eines Feinplanums. Trotzdem werden durch solche Systeme bereits Produktivitätssteigerungen im Vergleich zum konventionellen Verfahren erwartet (Stellmach 2016).

Ein weiteres Problem bei der Umsetzung einer automatisierten Baggersteuerung ist die dafür notwendige Manipulation des Maschinensteuerungssystems (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 63). Anbieter von Baggersteuerungen sind in der Regel nicht die Maschinenhersteller selbst, sondern Systemanbieter aus dem Bereich Sensorik und Elektronik. Diese könnten bei elektrohydraulisch vorgesteuerten Maschinen aus technischer Sicht durchaus über das Bordsystem in die Maschinensteuerung eingreifen, um die gewünschte Bewegung der Arbeitsausrüstung zu realisieren. Dies würde aber eine enge Zusammenarbeit mit dem Maschinenhersteller voraussetzen, was häufig nicht der Fall ist. Die Hersteller reagieren darauf mit unterschiedlichen Strategien. Neben der Entwicklung eigener Steuerungssysteme und damit der Teilautomatisierung einzelner Prozesse bieten Baumaschinenhersteller, wie beispielsweise Doosan, Vorrüstungen für die verschiedenen Steuerungshersteller wie Leica, Trimble und Xsite an, damit die Maschinen nachträglich ohne erheblichen Aufwand umgerüstet werden können (Doosan 2019).

Planieren (Bagger, Planierraupe, Dozer)

Als Planieren wird das Herstellen einer planaren Fläche, des Planums, bezeichnet, wofür auf der Erdbaustelle der Bagger, die Planierraupe (Dozer) und der Erdhobel (Grader) eingesetzt werden (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 63). Automatisiertes Planieren ist eine Funktion, die am Markt schon flächendeckend verfügbar ist, da diese Tätigkeit zu den steuerungstechnisch weniger komplexen Arbeitsaufgaben gehört. Eine Vielzahl von Herstellern bietet dafür bereits teilautomatisierte Lösungen bzw. Nachrüstlösungen am Markt an; so etwa Komatsu mit der »Intelligent Machine Control«¹¹⁵, einer semiautomatischen Steuerung der Arbeitsvorgänge Graben und Planieren. Dabei wird das Geländeprofil auf die Steuerung übertragen, welche durch den Eingriff in die Arbeitshydraulik dafür sorgt, dass das vorgegebene Profil nicht unterschritten wird. Die Herstellungszeit des Erdbauwerks kann so deutlich verkürzt werden, da zum einen die Geschwindigkeit der Arbeitsbewegung erhöht und zum anderen ein aufwendiges Nacharbeiten im Falle eines Unterschreitens der Profilhöhe vermieden wird. Angeboten wird diese Funktion in ausgewählten Hydraulikbaggern (z. B. »PC210LCi-10«) und Dozern (»D61PXi-2«).

Caterpillar hat ebenfalls eine Planierautomatik im Angebot (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 64). Bei dem System »Grade Control«¹¹⁶, welches seit 2018 in ausgewählten Baggermodellen angeboten wird, handelt es sich um eine Erweiterung der 2-D-Steuerung von Caterpillar, bei der Informationen über die Längs- und Querneigung und eine Höheninformation mit entsprechender akustischer Höhen- und Tiefenwarnung angezeigt werden. Das vorab in der Höhe zu kalibrierende System umfasst das Planieren mittels einer automatischen Auslegersteuerung, die Bediener/innen steuern mit dem Joystick dabei lediglich die Stielbewegung, um ein plane Fläche zu erzeugen. Caterpillar bietet optional eine Erweiterung dieser Funktion mit einer Trimble 3-D-GNSS-Steuerung¹¹⁷ an, mit der auch komplexere Profile erstellt werden können.

Vemcon (o. J.) bietet mit dem herstellerunabhängigen System »Copilot« eine Nachrüstmöglichkeit für das teilautomatisierte Planieren an. Dabei wird die gewünschte Neigung der Planumsebene im Panel des Systems eingegeben und nach der Aktivierung die Ebene abgezogen. Dabei ist auch das Arbeiten an Böschungen von unten und von oben möglich. Das System kann laut Hersteller in jedem Bagger implementiert werden. Dabei

¹¹⁴ Informationen über die Bodenbeschaffenheit können in der Regel nicht vorgegeben werden. Dazu müsste diese zunächst gemessen und charakterisiert werden (Bodenprobe, Analyse, Kennwerte). Für die Integration von entsprechenden Messsystemen in die Maschine gibt es bisher bestenfalls Ansätze oder Einzellösungen (Will 2019, S. 62).

¹¹⁵ <https://www.komatsu.eu/de/komatsu-intelligent-machine-control> (12.3.2021)

¹¹⁶ <https://www.zeppelin-cat.de/produkte/technologie/cat-grade-control.html> (12.3.2021)

¹¹⁷ Unter GNSS (globales Navigationssatellitensystem) werden alle globalen Satellitensysteme zusammengefasst. Ältere Empfänger nutzen meist das US-amerikanische Satellitensystem »NAVSTAR GPS«, welches oft auch als Synonym für Positionsbestimmungssysteme im Allgemeinen verwendet wird. Bei neueren GNSS-Empfängern handelt es sich immer öfter um Multibandsysteme, welche auch Navigationsdaten von »GLONASS« (Russische Föderation), »Galileo« (EU) und »Beidou« (Volksrepublik China) empfangen (Will 2019, S. 25).

muss je nach Baggermodell und sensorischer Ausstattung des Grundmodells neben dem Steuergerät und der Anzeigeeinheit die notwendige Sensorik (inertiale Messeinheiten, Druck- und Temperatursensoren) implementiert werden.

Im Unterschied zur Lösung von Caterpillar muss hier kein Referenzpunkt vermessen werden (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 64). Vielmehr lernt das System, indem mithilfe eines künstlichen neuronalen Netzes die Bewegungsmuster des Baggers und seiner Arbeitsausrüstung erlernt und anschließend exakt abefahren wird. Laut dem B_I Baumagazin (2018) verspricht der Hersteller die Möglichkeit einer Aufrüstung bis hin zur Vollautomatisierung. Einen ähnlichen Weg verfolgt die Topcon Positioning Group mit ihrer automatischen Baggersteuerung (VDBUM 2019).

Ladevorgang (Radlader)

Bereits 2003 wurde in einem Kompostierwerk ein automatisierter Radlader getestet, der »fahrerlos monotone und sich wiederholende Ladetätigkeiten« durchführte (Neugebauer 2004). Die unterschiedlichen Eigenschaften der Böden und Schüttgüter, die vielfältigen Arbeitsaufgaben sowie die anspruchsvollen Umgebungsbedingungen (Schwingungen, Temperatur, Schmutz) verhindern jedoch eine einfache Übertragung dieses Vorgehens auf die Baustelle (Will 2019, S. 65).

Aktuell sind am Markt deshalb in erster Linie Assistenzsysteme verfügbar, die den Ladevorgang teilweise unterstützen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 65). Ein Beispiel bietet Caterpillar mit dem »AutoDig«¹¹⁸ an. Fahrer/innen haben die Möglichkeit, den Ladevorgang nach einer vorgegebenen Bewegung der Schaufel automatisiert durchführen zu lassen. Das System wird per Knopfdruck aktiviert und mit dem Einstecken ins Haufwerk beginnt die Bewegung, bis die gefüllte Schaufel in der Transportstellung steht und aus dem Haufwerk herausgefahren werden kann. Bediener/innen müssen währenddessen die Fahr- und Lenkaufgaben ausführen. Damit kann ein schneller Ladevorgang mit optimaler Schaufelfüllung wiederholt erreicht werden, was vor allem für ungeübte Fahrer/innen einen Mehrwert darstellt, da so eine hohe Ladeleistung erreicht werden kann.

Eine Ladefunktion, die nahezu in jedem Radlader verfügbar ist, ist die Return-to-Dig-Positionierung der Radladerschaufel (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 65). Diese ermöglicht die Rückkehr in eine definierte Ladestellung und führt damit zu einer Optimierung des Ladeprozesses. Besonders in Kombination mit einer halbautomatischen Entladefunktion (beispielsweise von Volvo 2011) kann der Entladevorgang schneller erfolgen, da eine vordefinierte Höhe nicht über- oder unterschritten werden kann. Neben der Zeitersparnis ist als Vorteil auch der Sicherheitsaspekt zu nennen. Zum einen ermüden die Fahrer/innen weniger schnell bei immer wiederkehrenden, gleich ausgeführten Entladevorgängen, zum anderen können Unfälle bei Tätigkeiten mit einer einzuhaltenden Maximalhöhe vermieden werden, da die begrenzende Höhe nicht überschritten werden kann.

Die kontinuierliche Nutzlastbestimmung ist ein weiteres Assistenzsystem, welches dem Ladevorgang zuzuordnen ist (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 32 u. 66). Wiegeeinrichtungen sind bei verschiedenen Herstellern (Caterpillar 2017, »Load Assist« von Volvo¹¹⁹) erhältlich. Zur sensorischen Erfassung der geladenen Masse müssen der Hydraulikdruck am Hubzylinder sowie die aktuelle Stellung der Arbeitsausrüstung gemessen werden. Die Stellung der Arbeitsausrüstung kann dabei durch Neigungssensoren oder Winkelgeber am Hubgerüst erfasst werden. Mithilfe solcher integrierter Kontrollwaagen soll es laut Herstellerangaben möglich sein, die geladene Masse in der Schaufel mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ zu ermitteln.¹²⁰ Der Wiegevorgang erfolgt dabei im normalen Ladeprozess ohne Unterbrechung des Arbeitsablaufs. Alle Systeme bieten die grafische Darstellung der aktuell geladenen Masse und die Speicherung für die weitere Verwendung, beispielsweise für die Verwaltung der Produktionsergebnisse. Auch für Bagger sowie als Nachrüstlösung werden solche Wiegeeinrichtungen angeboten (z. B. von Pfreundt oder As-Wägetechnik¹²¹).

¹¹⁸ <https://www.zeppelin-cat.de/produkte/cat-lader/autodig.html> (12.3.2021)

¹¹⁹ <https://www.volvoce.com/deutschland/de-de/services/volvo-services/productivity-services/load-assist/> (12.3.2021)

¹²⁰ <https://www.zeppelin-cat.de/produkte/technologie/assistenzsysteme.html> (12.3.2021)

¹²¹ <https://www.as-waegetechnik.de/produkte/mobile-waagen/radladerwaagen/> (12.3.2021)

Bohren und Fräsen

Das Bohren wird im Spezialiiefbau für sehr vielfältige Anwendungsgebiete eingesetzt: Zu nennen sind die Gründung hoher Gebäude, die Herstellung von Pfahlwänden, das Lösen verschiedener Böden und die Herstellung von Baugruben und Schlitzwänden (Will 2019, S. 66). Auf dem Markt sind bereits viele Assistenzsysteme und Automatisierungslösungen erhältlich (z. B. von Bauer, Klemm oder Prakla), die die Bediener/innen unterstützen und die Produktivität (durch Zeitersparnis), den Komfort und die Sicherheit beim Bohren steigern können (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 67):

- › Ein beim Bohrverfahren üblicher Arbeitsschritt ist das alternierende Drehen der gezogenen Bohrstange am Entladeort, um den Bohrer zu entleeren (BAUER Maschinen 2020). Dieser Prozess ist bereits automatisiert verfügbar, womit der Entladevorgang optimiert und das Bedienpersonal entlastet wird.
- › Der Bohrvorgang als solcher kann mit einem vollautomatischen Bohrassistenten ohne Eingriff des Geräteführers erfolgen. Dabei werden die Parameter Vorschub und Drehzahl konstant gehalten, können aber während des Prozesses angepasst werden (BAUER Maschinen 2020). Zusätzlich erfolgt eine Visualisierung aller relevanten Prozessparameter. Weiterhin kann über das Display die Position der zu setzenden Bohrung durch GNSS-Ortung präzise angefahren werden, womit ein manuelles Abstecken der Bohrpfähle entfällt (BAUER Maschinen 2017).
- › Weiterhin sind die Abbohr- und Ziehautomatik und der Ziehassistent für die Bohrrohre zu nennen. Erstere ist eine vollautomatische Knopfdrucklösung zum Ziehen und Verfüllen des Bohrlochs mit Beton. Dadurch werden ein optimaler Füllgrad bei geringer Werkzeugbelastung und ein hohes Gütemaß der Pfahlgeometrie erreicht. Auch bei diesem Assistenten werden Vorschub und Drehzahl der Bohrstange geregelt. Der Ziehassistent hingegen ist eine alternierende Drehbewegung des Bohrrohres, welche von der Fahrerin/dem Fahrer beim Ziehen gewählt werden kann, um den Ziehvorgang zu optimieren (BAUER Maschinen 2020).

Neben den herstellereigenen Assistenzsystemen sind auch herstellerunabhängige Nachrüstlösungen beispielsweise von Trimble¹²² oder MOBA¹²³ erhältlich (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 67). Diese beinhalten die sensorische Ausstattung des Bohrgerätes, welche aus GNSS-Antennen zur Positionsbestimmung, einem Tiefensensor für die Erfassung der Bohrtiefe und einem Neigungssensor für den Winkel der Bohrlafette besteht. Eine Automatisierung von Bohrprozessen ist damit nicht umsetzbar, aber eine 3-D-Positionierung der Maschine und Tiefenüberwachung des Bohrprozesses.

Das Fräsen wird im Spezialiiefbau zur Herstellung von Schlitz- und Dichtwänden eingesetzt (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 68). Im Gegensatz zur konventionellen Greifermethode, bei der das Lösen, Aufnehmen und der Transport des Materials aus dem Bohrloch mit einem mechanischen Grabwerkzeug erfolgt, werden beim Fräsen zwei gegenläufig rotierende Fräsräder, die als Anbauwerkzeug an einem Hydraulik- bzw. Seilbagger installiert werden, zum Lösen des Materials eingesetzt. Automatisierungslösungen sind bei keinem Hersteller vorhanden. Lediglich Assistenzsysteme zur Vertikalmessung des Schlitzes werden, unter Verwendung von Neigungssensoren, in die Steuerungen integriert und auf dem Display visualisiert. Die Vertikalität des erstellten Schlitzes kann so überwacht und herstellerspezifisch korrigiert werden. Die Korrektur erfolgt durch die Fahrerin oder den Fahrer, stellt aber einen möglichen Ansatzpunkt für eine Teilautomatisierung dar. Weiterhin können die Prozessdaten gespeichert und mittels Mobilfunktechnologie zur weiteren Auswertung übertragen werden.

6.2.3 Straßenbau

Beim Bau von Straßen kommen ebenso wie beim Tiefbau Radlader, Bagger, Grader und Dozer für Planier- und Erdbauarbeiten zum Einsatz. Spezifische Straßenbaumaschinen sind Beschicker, Kaltfräse, Asphaltfertiger, Verdichtungswalze und Recycler, die zur Herstellung der Asphalt- oder Betondecke und zu den notwendigen Vorarbeiten verwendet werden.

Die Hauptparameter eines Straßenbauprozesses sind die Schichtstärke, Ebenheit und Verdichtung als Gütekriterium des Straßenbauwerks mit ihren variablen Einflussgrößen (z. B. die Einbautemperatur; Will 2019, S. 69).

¹²² <https://www.sitech.de/medien/aktuelles/liebherr-ramm-und-bohrgeraete-jetzt-mit-trimble-maschinen> (12.3.2021)

¹²³ <https://moba-automation.de/produkte/bohrsysteme> (12.3.2021)

Die Entwicklungen der Hersteller und Zulieferer konzentrieren sich auf die Überwachung dieser Parameter und/oder die Automatisierung der Prozesse, die Einfluss auf diese Größen ausüben. Insgesamt ist heute im Straßenbau schon ein vergleichsweise hoher Automatisierungsgrad anzutreffen, wie der folgende Überblick zeigt.

Steuerung der Schichtdicke, Einbauhöhe und Querneigung (Asphaltfertiger)

Asphaltfertiger verfügen über schwimmende Bohlen, mit denen sich Asphaltschichten mit gleichbleibender Höhe herstellen lassen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 69). Die Steuerung der Schichtdicke erfolgt über die Fahrgeschwindigkeit des Fertigers und über die Materialhöhe vor der Bohle. Voraussetzung für eine hohes Gütemaß bei der Ebenheit ist die entsprechende Vorbereitung des Unterbaus. Die konventionelle Methode, die Höhe der gefertigten Asphaltdecke einzustellen, besteht in der Steuerung von Hydraulikzylindern, welche die Bohle entsprechend einem seitlichen Leitdraht, welcher mechanisch oder mit Ultraschallsensoren abgetastet wird, nivellieren (Kappel 2012). Dieses Verfahren wird zunehmend durch eine berührungslos messende Ebenheitssteuerung verdrängt, wobei als physische Referenz beispielsweise die vorhandene Straßenschicht genutzt wird (z. B. »MOBA-matic II«, Leica »iCon pave«¹²⁴, Topcon »mmGPs«¹²⁵). Bei »MOBA-matic II« werden beispielsweise mittels verschiedener Sensoren (z. B. Ultraschall, Drehgeber, Neigungssensor, Laser) die Bohlenhöhe und -neigung gesteuert, um die hohen Anforderungen an die Ebenheit zu gewährleisten (MOBA 2013). Mit MOBA »PAVE-TM« wird eine automatische und kontinuierliche Messung der Asphalt schichtdicke unter Verwendung von Ultraschallsensorik umgesetzt (MOBA 2017).

Zur Steuerung der Einbauhöhe und Querneigung sind auch 3-D-Steuerungen für Asphaltfertiger dem Stand der Technik zuzuordnen (beispielsweise VÖGELE »Niveltronic Plus«¹²⁶) (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 69). Bei diesen Systemen kann auf Grundlage der Planungsdaten sowohl die Steuerung der Einbaulage als auch der Einbaurichtung erfolgen. Das System greift dabei unter Zuhilfenahme eines geodätischen Datenmodells aktiv in die Lenkung des Fertigers ein und ist damit als automatisierter Prozess einzustufen. Zur Positionsbestimmung werden auch die bei Erdbaumaschinen bekannten Positioniersysteme genutzt. Dabei kommen GNSS sowie optische Systeme mit Laser und Prisma zum Einsatz. Um die Prozessparameter beim Umsetzen eines Fertigers nicht erneut aufwendig einrichten zu müssen, bieten die Steuerungen oftmals die Möglichkeit, die notwendigen Parameter (Position der Förderschnecke und der Bohle) zu speichern (z. B. Dynapac »Set Assist«), was den Abschnittswechsel deutlich beschleunigt.

Temperatur- und Verdichtungskontrolle (Asphaltfertiger, Verdichtungswalze)

Die Einbautemperatur ist ein wichtiger Parameter sowohl für den Einbau, also die Verarbeitung im Asphaltfertiger, als auch während des anschließenden Verdichtungsprozesses (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 69 f.). Aktuell ist es möglich, mit Infrarotmesstechnik die Asphalttemperatur der eingebauten Schicht hinter der Bohle des Fertigers zu ermitteln. Zur Anwendung kommt diese Technik beispielsweise beim VÖGELE »RoadScan«,¹²⁷ beim MOBA mit »PAVE-IR« (MOBA 2019) oder bei Volvo »Pave Assist«¹²⁸. Diese berührungslosen Messsysteme ermitteln die Oberflächentemperatur des Asphalts während des Einbaus über die gesamte Bohlenbreite. Das Ergebnis wird in Echtzeit dargestellt, damit der Prozess entsprechend gesteuert werden kann. Für einige Systeme ist zusätzlich eine cloudbasierte Speicherung zur weiteren Verarbeitung der Daten und für die Überwachung des gesamten Prozessablaufes erhältlich.

Der Einbautemperatur ist deshalb ein so hoher Stellenwert zuzuordnen, da die nachfolgende Verdichtung innerhalb eines optimalen Temperaturbereichs erfolgen muss (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 70). Bei zu hohen Temperaturen sinkt die Verdichtungswalze in den Asphalt ein, bei zu niedrigen Temperaturen ist das Material nicht mehr ausreichend verdichtbar. Eine Verdichtungskontrolle in verschiedenen Ausführungsstufen wird für Verdichtungswalzen sowohl von den Herstellern selbst (BOMAG 2012) als auch als Add-on (MOBA) für Bestandswalzen angeboten. Dabei wird die Verdichtung indirekt aus einer Messung des Vibrationsverhaltens der

¹²⁴ <https://leica-geosystems.com/de-de/products/machine-control-systems/pavers-and-cold-planers/leica-icon-pave-asphalt> (12.3.2021)

¹²⁵ <https://www.topconpositioning.com/de/support/products/mmgps-f%C3%BCr-fertiger> (12.3.2021)

¹²⁶ <https://www.wirtgen-group.com/de-de/produkte/voegele/technologien/nivelliertechnik/niveltronic-plus/> (12.3.2021)

¹²⁷ <https://www.wirtgen-group.com/de-de/produkte/voegele/technologien/roadscan/> (12.3.2021)

¹²⁸ <https://www.volvoce.com/deutschland/de-de/services/volvo-services/productivity-services/pave-assist/> (12.3.2021)

Bandagen der Walze berechnet und als Steifigkeitsmodul den Fahrer/innen angezeigt (z. B. Hamm »HCQ-Navigator«¹²⁹) (Kloubert/Wallrath 2010). Über eine kontinuierliche Speicherung wird dabei eine flächendeckende Verdichtungskontrolle gewährleistet und die zugehörige Position durch GNSS dem Verdichtungsfortschritt zugeordnet. Das System bietet zusätzlich eine Datenübertragung der Verdichtungsparameter, sodass auch aus der Ferne eine Überwachung des Baufortschrittes ermöglicht wird. Außerdem sind Rückfahrkameras, ein Tempomat und eine automatische Reversierfunktion implementiert (Baugewerbe 2019).

Es lässt sich also feststellen, dass auch bei den Walzen der Weg zur Automatisierung über die Einführung von Assistenzsystemen gegangen wird. Ein autonomer Betrieb ist noch nicht Stand der Technik, wird aber von den Herstellern forciert. So hat BOMAG im BMBF-geförderten Projekt »Autonomous Mobile Machine Communication for Off-Road Applications« (5G-AMMCOA) zwei umgebaute Straßenwalzen getestet, die mittels Umfeldsensorik und Steuerungslösungen zu autonomen Systemen umgerüstet wurden.¹³⁰

Automatisierung der gesamten Prozesskette

Die Abstimmung der verschiedenen Prozesse ist der kritische Punkt im Straßenbau, denn besonders hier kommt es auf die ganzheitliche Prozesskette an, um den geforderten Qualitätsanspruch zu erreichen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 70 f.) Die Straßenbaustelle weist aufgrund der zeitlich immer wiederkehrenden gleichen Prozessabläufe, des vergleichsweise hohen Automatisierungsgrades und der kleineren Anzahl an Maschinenherstellern im Vergleich zur Erdbaustelle grundsätzlich Vorteile bezüglich der Vernetzung auf. Doch der Stand der Technik ist, dass die Maschinen ihre Tätigkeiten unabhängig voneinander ausführen und manuell eingestellt werden müssen.

Die umfassende sensorische Ausstattung der Straßenbaumaschinen und die Umsetzung erster teilautomatisierter Prozesse wie oben beschrieben sind die Grundlage für die Automatisierung des gesamten Straßenbauprozesses (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 70 f.). Dafür wird es notwendig sein, die Teilfunktionen der Maschinen über das mobile Datennetz unter Verwendung von Datenübertragungsmodulen (Antenne, SIM-Karte) miteinander zu verknüpfen, wofür eine durchgängige Netzabdeckung benötigt wird. Zur Prozessoptimierung und -dokumentation sind am Markt bereits Softwarelösungen verfügbar, welche die Daten aller Maschinen und die Prozessparameter kombinieren und auswerten (Stone 2015; Wirtgen Group a. J.). Damit ist es prinzipiell möglich, die gesamte Prozesskette vom Asphaltwerk, über die Anlieferung zum Beschicker, den Einbau mit dem Fertiger bis hin zum Verdichtungsvorgang mit der Walze zu planen, zu dokumentieren und zu überwachen. Die Prozesse Asphaltherstellung, Logistik und Einbau können so in Echtzeit aufeinander abgestimmt werden. Zusätzlich werden servicerelevante Parameter und Betriebsstunden erfasst, damit Wartungsarbeiten optimiert geplant werden können. Die praktische Umsetzung scheidet bislang aber oft noch an einer fehlenden Standardisierung der Schnittstellen, was dazu führt, dass eine herstellerübergreifende Kommunikation zwischen den beteiligten Maschinen nur unzureichend oder in den meisten Fällen gar nicht stattfindet.

6.2.4 Hochbau

Der Hochbau umfasst das Planen und Errichten von Bauwerken, die oberhalb der Geländelinie liegen (Wohnhäuser, Bürogebäude, Krankenhäuser, Veranstaltungsbauten etc.). Die wichtigste Bauweise ist das Errichten von Bauwerken in Massivbauweise, vorzugsweise mit den Werkstoffen Beton oder Mauerwerk. Zu der im Hochbau einsetzbaren Maschinenteknik gehören verschiedene Bauarten von Kranen, aber auch Spezialgeräte für den Betonbau (Fahrmischer, Betonpumpe, Betonverteiler) oder den Innenausbau (Betonsäge, Kernbohrer) (Will 2019, S. 71).

Kransysteme

Zu den Kransystemen zählen u. a. fest installierte Turm-, Mobil- (fahrbarer Auslegerkran auf einem Rad- oder Kettenfahrwerk) sowie Lkw-Ladekrane. Insbesondere Turmkranen dienen auf einer Baustelle als logistisches Bindeglied für eine Vielzahl von Gewerken und sind somit für einen reibungslosen Bauablauf von großer Bedeutung.

¹²⁹ <https://www.wirtgen-group.com/de-de/produkte/hamm/technologien/hcq-hamm-compaction-quality/> (12.3.2021)

¹³⁰ <https://www.zak-kl.de/node/995> (7.9.2020)

Ähnlich wie in den zuvor betrachteten Bereichen wird auch bei Kransystemen der Weg vornehmlich über Assistenzsysteme gegangen, von deren Einsatz man sich eine Steigerung sowohl der Umschlagleistung und der Zuverlässigkeit als auch der Sicherheit erhofft (Will 2019, S. 71). Automatisierte Prozesse hingegen sind noch nicht dem Stand der Technik zuzuordnen.

Bei *Turmkränen* reicht das Spektrum an technischer Assistenz von Positioniersystemen (Liebherr »Litronic«), welche eine exakte Positionierung der Last ermöglichen, über Begrenzungssysteme für den Arbeitsraum (Liebherr »ABB«; Liebherr 2015), die den Kran vorgegebene Bereiche nicht überschwenken lassen, bis hin zu kamerabasierten Kollisionsvermeidungssystemen für Großbaustellen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 71 f.). Liebherr verpackt alle Einzelassistenzen in der »Tower Crane Litronic«¹³¹, zu der auch ein automatisches Nivelliersystem der Hakenflasche zählt. Auf Knopfdruck kann so auch bei variierender Auslegerneigung die Last auf einer horizontalen Linie verfahren werden, da das Hubwerk automatisch die gewählte Höhe nachregelt. Auch Tadano Demag bietet ein solches System an. Ebenfalls zum Stand der Technik zählt neben der Bedienung aus der Kabine die Funkfernsteuerung des Krans. Unterstützt wird die Bedienung durch Kamerasysteme, welche die Situation am Haken erfassen. Allen Herstellern gemein ist der Einsatz von Telematiksystemen in verschiedenen Ausbaustufen. Ziele dieser Systeme sind immer die Erfassung und Übermittlung der Betriebs- und Servicedaten. Dadurch können die Verfügbarkeit und die Einsatzzeit erhöht werden, da das Servicepersonal immer den aktuellen Zustand des Krans mit allen Prozessparametern abrufen und im Bedarfsfall schnell handeln kann (Liebherr 2015; TB Verlag 2014).

Bei *Mobilkränen* werden ebenfalls Assistenzsysteme zur Begrenzung und Überwachung eines definierten Arbeitsbereichs von den Herstellern angeboten (Liebherr »Liccon«¹³²) (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 72). Auch Fernbedienung zum Herstellen des Rüstzustands und zum Bedienen der Kranfunktionen zählt zum Stand der Technik. Der Überwachung des Rüstzustands dienen automatische Systeme, welche die Stützenposition erfassen und über hinterlegte Traglasttabellen für jeden Schwenkwinkel die Maximallast anzeigen (Tragfähigkeitsradar »IC-1 Plus«). Im Falle des Überschreitens der bestimmten Grenzen wird der Schwenkvorgang vollautomatisch angehalten, um ein Kippen zu verhindern (echtzeitfähige Tragfähigkeitsbestimmung; Tadano Demag 2019). Die Betriebsdaten können auf einem Display angezeigt werden. Telematiksysteme zur Übertragung der Daten und ein nachgelagertes Flottenmanagement sind Funktionalitäten, die als Erweiterung der Betriebsdatenaufzeichnung anzusehen sind.

Bei *Lkw-Ladekranen* bieten die Hersteller Bedienassistenzsysteme an, die beispielsweise auf den automatisierten Parallelbetrieb einzelner Aktoren abzielen – etwa zur präzisen Steuerung der Kranspitze (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 72). Am Markt erhältlich sind beispielsweise Hiab »Crane Tip Control«¹³³ oder Palfinger »Smart Boom Control«¹³⁴. Diese Systeme stellen eine wichtige Voraussetzung für die Umsetzung von automatisierten Prozessen dar, da aus der Sollposition der Kranspitze die notwendigen Aktorbewegungen (von Hub- und Knickarmzylinder, Schwenkwerk, Ausschub) automatisch berechnet werden, was die Ausführung von Hebearbeiten deutlich vereinfacht. Ein erster Bewegungsablauf, welcher automatisiert wurde, ist die Rüstfunktion des Krans. Dabei handelt es sich um das automatische Entfalten des Kranauslegers bis zu einer definierten Rüststellung und das Zusammenklappen aus einer beliebigen Arbeitsposition heraus in die Fahrstellung (Palfinger »P-Fold«¹³⁵). Hinzu kommen sicherheitsrelevante Systeme, welche die Dynamik des Ladekrans aktiv überwachen und ggf. einen Steuerungseingriff initiieren, welche aber keine Automatisierungsfunktionen darstellen (Fassi »Automatic Dynamic Control«¹³⁶).

Maschinentechnik im Betonbau (Betonmischer, Betonpumpe)

Die Produktion im Betonbau kann entweder direkt auf der Baustelle oder in einem Betonwerk erfolgen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 72 f.). Der Fertigteiltbau zeichnet sich schon heute durch einen hohen Automatisierungsgrad aus (Kap. 5.2.1). Bei der direkten Fertigung hingegen ist es notwendig, in Einzelfertigung ein Negativ

¹³¹ <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/baumaschinen/turmdrehkrane/tower-crane-litronic/tower-crane-litronic.html> (12.3.2021)

¹³² <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/mobil-und-raupenkrane/mobilkrane/mobilkranttechnologie/details/liccon.html> (12.03.2021)

¹³³ <https://www.hiab.com/en/media/news/hiab-crane-tip-control> (12.3.2021)

¹³⁴ <https://www.palfinger.com/de-de/ueber-palfinger/digitalisierung> (12.3.2021)

¹³⁵ https://www.palfinger.com/de-de/produkte/ladekrane/highlights/p-fold_h_47181 (12.3.2021)

¹³⁶ <https://www.fassi.com/de/fassi-lkw-ladekrane/schwere-krane/f385a-e-dynamic-f385ra-e-dynamic/f385a-e-dynamic-fassi-ladekran.html> (12.3.2021)

des Bauteils aus Schalungselementen zu erstellen und anschließend den Beton einzubringen. Der Frischbeton wird dabei durch Transportmischer vom Betonwerk zur Baustelle transportiert und von Autobetonpumpen über größere Reichweite an die gewünschte Stelle gefördert. Grundsätzlich sind durch den kinematischen Aufbau der Betonpumpen verschiedenste Automatisierungsfunktionen denkbar, die denjenigen von Lkw-Ladekranen vergleichbar sind. Putzmeister (2017) beispielsweise bietet mit »Ergonic 2.0 System« ein Regel- und Steuersystem an, mit dem die Arbeitsräume der Autobetonpumpe bzw. eines Verteilermastes definiert werden können. Die Bewegungen werden vom System entsprechend geregelt, sodass der vordefinierte Arbeitsbereich nicht verlassen wird. Weiterhin bietet das System die Möglichkeit, den Mast teilautomatisch ein- und auszufalten, was zur Reduzierung der Rüstzeiten führt. Die »Ergonic Boom Control« als Bestandteil des »Ergonic Systems« ermöglicht eine Einhandsteuerung. Die Spitze des Mastes kann ohne die separate Ansteuerung jedes einzelnen Aktors horizontal und vertikal bewegt werden, was die Bedienung deutlich einfacher macht (Putzmeister 2017).

Die Aufgaben eines Betonmischers unterteilen sich in Fahren, Mischen und Entladen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 73). Eine Automatisierbarkeit von Teilfunktionen oder -vorgängen ist denkbar, wird aber von den Herstellern bisweilen nicht umgesetzt. Hier bietet Putzmeister (2017) mit »Ergonic Mixer Control« eine Funkfernsteuerung zur Mischertrommelbedienung inklusive Reinigungsfunktion an. Bei diesem System handelt es sich aber um keine Automatisierungslösung. Dasselbe gilt für die Mischersteuerung »SMART 3.0« von Schwing-Stetter (2019), mit der die Trommeldrehzahl unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit eingestellt werden kann.

Maschinentechnik im Mauerbau

Der Mauerwerksbau ist nahezu vollständig durch manuelle Arbeit geprägt, lediglich für den Materialtransport auf der Baustelle werden verschiedene Kransysteme genutzt (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 73 f.). Seit längerem Stand der Technik sind mechanische Krane, die auf der Baustelle den Mauerprozess beschleunigen. Wie in Studien gezeigt wurde, können durch diese Versetzgeräte beachtliche Rationalisierungsgewinne erzielt werden (»Ein-Mann-Mauern«; Landau 2001). Weiterhin sind auch hydraulisch-elektrisch betriebene Minikrane erhältlich, die eine Vielzahl an Anbauwerkzeugen bieten. Diese ferngesteuerten Maschinen sind sehr wendig und leicht und damit ideal für den Einsatz auf einer Baustelle geeignet (Jekko 2019). Fälschlicherweise werden diese oftmals als Roboter bezeichnet, gehören aber zu den Kranen.

Für die eigentliche Hauptarbeit, das Erstellen von Mauerwerk, sind noch keine robusten, baustellentauglichen Automatisierungssysteme am Markt verfügbar (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 73). Erste Roboterlösungen befinden sich in einer frühen Entwicklungsphase: So etwa der Ziegelroboter »Hadrian X®« der australischen FBR Ltd., der von der Wienerberger GmbH (2018) für den europäischen Markt getestet wird. Der auf einem Träger-Lkw montierte Bauroboter soll laut Internetquellen bis zu 1.000 Mauersteine pro Stunde legen können (Trends der Zukunft 2016). Dabei werden die Steine über ein Förderband bis an den Bestimmungsort transportiert. Während des Transports wird ein Kleber appliziert, anschließend werden die Steine über eine 3-D-CAD-Software platziert. Dieser Prozess verläuft vollautomatisch. In den USA gibt es bereits teilautomatisierte Systeme, die beim Erstellen von Mauerwerk unterstützen und auf der Baustelle zum Einsatz kommen. Dazu gehört beispielsweise der auf Schienen laufende Roboter »SAM«¹³⁷ der Construction Robotics, der Steine anheben, den Mörtel auftragen und die Steine aufeinandersetzen kann. Menschliche Unterstützung ist hier aber weiterhin notwendig, um den überschüssigen Mörtel zu verstreichen. Außerdem können mit diesem System nur gerade Mauerwerke und keine Ecken oder komplexeren Mauerabschnitte erstellt werden, zudem muss der Roboter für jede neue Mauer inklusive Schienensystem neu ausgerichtet werden.

Dass solche Lösungen in Deutschland noch nicht auf der Baustelle anzutreffen sind, hat neben den bestehenden technischen Schwierigkeiten auch mit wirtschaftlichen Gründen zu tun (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 73). Denn die zu erwartenden hohen Anschaffungskosten stellen besonders für die vielen kleineren Baubetriebe ein erhebliches Hindernis auf dem Weg zur Automatisierung des Mauerwerksbaus dar. Beim Wohnungsbauunternehmen Bonava geht man dennoch davon aus, dass die Steuerung der für den Transport und das Setzen von großen Kalksandsteinen verwendeten Minikrane demnächst roboterisiert erfolgen wird – menschliche Arbeitskraft würde dann nur noch für die Applikation des Klebers benötigt (Fabricius 2018). Generell ist davon auszugehen, dass im Hoch- und Innenausbau zukünftig vermehrt Bauroboter eingesetzt werden (Kasten 6.1).

¹³⁷ <https://www.construction-robotics.com/sam100/> (12.3.2021)

Kasten 6.1 Bauroboter im Hochbau

Bauroboter können helfen, einzelne Bauprozesse teil- oder vollautomatisiert durchzuführen und somit die Produktivität des Bauwesens maßgeblich zu steigern. Des Weiteren können sie schwere, gefährliche, repetitive oder ergonomisch ungünstige Tätigkeiten (z. B. Überkopfarbeiten) übernehmen, was zu einer Entlastung der Arbeiter/innen führt. Durch den Einsatz autonomer oder ferngesteuerter Systeme ist außerdem eine komplette Entfernung menschlichen Personals aus Bereichen mit erhöhter Gefährdung möglich (z. B. beim Rückbau von Atomkraftwerken).¹³⁸

Historisch gesehen ist die Idee eines Einsatzes von Robotern auf Baustellen nicht neu. Erste Systeme wurden bereits in den 1980er Jahren entwickelt – zuerst in Japan und dann weltweit. Diese Bauroboter der ersten Generation zielten auf eine Substitution einzelner, meist gewerkebezogener Prozesse, ab (Betonglätten, Streichen usw.). Bis heute wurden so über 100 verschiedene Prototypen entwickelt und im Baustelleneinsatz getestet (Bock 2011). Mit dem Aufkommen neuer technischer Möglichkeiten (verbesserte Sensoren, kostengünstige Hardware und Software) und einer verstärkten Ausrichtung auf Assistenz- und Servicerobotik, welche den Menschen unterstützen und nicht ersetzen soll, bieten sich neue Chancen für eine Etablierung und Akzeptanz der Robotik im Bauwesen. Bei näherer Analyse zeigen sich die größten Einsatzpotenziale in den Bereichen Hochbau, Innenausbau, Installation, Vermessung, Sanierung und Rückbau. Dies spiegelt sich auch in vielen Studien, Prototypen und Produkten wider, die in den letzten Jahren entstanden sind. Beispiele hierfür sind u. a. Roboter, welche zum Bohren (Concrete Construction 2015), zum automatisierten Mauern, für 3-D-Betondruck (McDonald 2017; Kap. 4.2), zum Fliesenlegen,¹³⁹ für Farbauftrag (Asadi et al. 2018) oder für Vermessungsaufgaben und die Erstellung digitaler Gebäudemodelle (Edwards 2019) eingesetzt werden können.

Ein Trend, welcher in den 1990er Jahren aufkam und bis heute vorwiegend auf Japan begrenzt ist, sind die automatisierten Hochbaustellen bzw. Feldfabriken (Bock 2012). Bei diesen handelt es sich um eine Art mobile Produktionshalle, welche während des Bauablaufes mit dem Gebäude nach oben wandert. Ein Beispiel hierfür ist das Robotersystem »SMART« des japanischen Baukonzerns Shimizu (2018). Zu den Prozessen, welche durch »SMART« automatisiert werden, gehören u. a. das Aufstellen und Schweißen von Stahlrahmen, das Verlegen von Betonbodenbrettern sowie die Montage von Außen- und Innenwänden. Die Einrichtung einer automatisierten Hochbaustelle ist primär für Hochhäuser mit einfacher Bauform geeignet und damit hierzulande in den wenigsten Fällen wirtschaftlich, da der hiesige Bau- und Architekturstil in erster Linie kleine und mittlere Gebäude mit wenigen Geschossen sowie eher ausgefallene Hochhäuser umfasst.

Aktuell finden die meisten Entwicklungs- und Forschungsvorhaben im asiatischen Raum, in den USA, in Norwegen und in der Schweiz statt. Besonders hervorzuheben ist hierbei die ETH Zürich, welche mit dem 2010 gegründeten Robotic Fabrication Lab¹⁴⁰ eine weltweit einzigartige Forschungseinrichtung in diesem Bereich besitzt. Trotz vieler Forschungsvorhaben in den frühen 1990er und 2000er Jahren spielt Deutschland im Bereich Baurobotik aktuell eine eher untergeordnete Rolle – dies, obwohl eine Vielzahl der deutschen Baumaschinen- und Baugerätehersteller zu den internationalen Marktführern in ihrem Bereich zählt. Doch die meisten Baurobotikunternehmen stammen nicht aus dem Kreis der etablierten Hersteller. Oft handelt es sich um sehr agil handelnde Start-ups, die meist das Resultat universitärer Ausgründungen oder langjährig geförderter Forschungsvorhaben sind. Durch vergleichsweise geringe Fördermaßnahmen läuft Deutschland hier Gefahr, international den Anschluss zu verlieren.

Quelle: Will 2019, S. 96 ff.

¹³⁸ <https://www.goeke-group.com/de/rueckbau-akw> (12.3.2021)

¹³⁹ <https://fcl.ethz.ch/research/research-to-application/mobile-robotic-tiling.html> (12.3.2021)

¹⁴⁰ <https://ita.arch.ethz.ch/archteclab/rfl.html> (12.3.2021)

6.3 Wichtige Grundlagentechnologien für die Automatisierung von Baumaschinen: Stand und Perspektiven

Die Arbeitsaufgaben, die Baumaschinen wie Bagger, Radlader, Straßenfertiger oder Drehbohrgerät zu bewältigen haben, sind aus verschiedenen Gründen außerordentlich komplex und vielfältig (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 23):

- › Die Aufgabenstellung des Arbeitsprozesses verändert sich ständig hinsichtlich der geometrischen Gestalt und physikalischen Eigenschaften, weil das Bauwerk parallel »wächst« (oder anderweitig durch den Prozess verändert wird).
- › Die Eigenschaften der Erdstoffe bzw. von anderen zu bearbeitenden Schüttgütern oder Bauobjekten und deren Wechselwirkungen mit der Baumaschine sind weitaus schwieriger vorherzusagen oder zu erfassen als die Eigenschaften von Straße und Fahrzeug und deren Wechselwirkung, sodass Ansätze aus dem Bereich des assistierten, automatisierten und autonomen Fahrens nur bedingt übertragbar sind.
- › Im Umfeld der Baumaschine befinden sich in der Regel zahlreiche Personen sowie andere Maschinen und Geräte, jeweils mit eigenen, unabhängigen Aufgaben.
- › Die Maschine und der Prozess müssen in einem sehr weiten Feld der Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Lichtverhältnisse, Wind, Untergrundbeschaffenheit) arbeiten, was eine klare Abgrenzung zur Industrie 4.0 in Produktionsprozessen darstellt.
- › Im Bauwesen sind die Genauigkeitsanforderungen an das Bauwerk weitaus geringer als in sonstigen Produktionsprozessen. Das macht zwar manche Aufgaben durchaus einfacher, erschwert aber gleichzeitig auch die Automatisierung, weil Objekte, mit denen die Maschine interagieren sollen, deutlich von der geplanten und in Daten hinterlegten geometrischen Form und Lage abweichen können.

Insgesamt ist festzuhalten, dass eine praxistaugliche Automatisierungsfunktion bei Baumaschinen sehr viele ungeplante Zustände und Ereignisse erkennen und darauf reagieren muss, weshalb die Umsetzung sich erheblich anspruchsvoller gestaltet als in anderen, stärker standardisierbaren industriellen Fertigungsbereichen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 23). Aufgrund der Vielzahl beeinflussender Parameter werden besonders hohe Anforderungen an die sensorischen und aktorischen Fähigkeiten sowie die softwarebasierte Maschinensteuerung gestellt. Im Folgenden werden der Stand und die Perspektiven damit zusammenhängender Grundlagenfertigkeiten (Navigation, Personen- und Objekterkennung, digitale Datenübertragung, Antriebstechnik, Mensch-Maschine-Schnittstelle) beleuchtet, die für die Automatisierung von Baumaschinen eine wichtige Rolle spielen.

6.3.1 Navigation und Positionsbestimmung

Eine Grundvoraussetzung für die Automatisierung mobiler Arbeitsmaschinen und Bauprozesse ist die exakte Orts- und Lagebestimmung von Maschinen, Werkzeugen und Baustoffen sowie die relative Positionsbestimmung der Arbeitsausrüstung und des Anbauwerkzeugs (z. B. Baggerlöffel, Radladerschaufel, Anbauverdichter etc.). Während die Erfassung einer absoluten geodätischen Position in der Regel mit GNSS erfolgt, wird für die relative Positionsbestimmung der Arbeitsausrüstung spezielle Sensorik benötigt (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 25 ff. u. 81 f.):

- › *Absolute Positionsbestimmung:* Am Markt existiert eine große Zahl von Herstellern, die Systeme zum Empfang von GNSS-Signalen anbieten. Dabei handelt es sich meist um Nachrüstlösungen, die auch an älteren Maschinen montiert werden können. Mittlerweile sind aber von vielen der etablierten Baumaschinenhersteller ebenfalls integrierte Lösungen erhältlich. Fehler in der Satellitenposition, atmosphärische Störungen sowie Signalreflektionen an der Erdoberfläche können allerdings zu Ungenauigkeiten in der Positionsbestimmung führen. Zur weiteren Verbesserung der Genauigkeit werden Verfahren wie das Differential Global Positioning System (DGPS) oder die Real Time Kinematic (RTK) verwendet.¹⁴¹ Dabei wird die Genauigkeit der Positionsbestimmung mittels Korrektursignalen von geostationären Referenzstationen erhöht. Aktuelle

¹⁴¹ <https://www.magicmaps.de/gnss-wissen/praezise-gps-messungen-mit-hilfe-von-dgps-und-rtk/> (12.3.2021)

Systeme (z. B. Leica »iCON gps 80 GNSS-Empfänger«¹⁴²) erreichen mit dem RTK-Verfahren dynamische Positionsgenauigkeiten von ca. 10 mm (horizontal) bzw. 20 mm (Höhengenauigkeit). Als großes Problem verbleibt die verminderte Genauigkeit bei eingeschränkter Sicht- bzw. Funkverbindung zu Satelliten oder der Referenzstation, wie es auf Baustellen häufiger vorkommt. Eine vielversprechende Alternative stellen funkbasierte Ortungsverfahren dar (z. B. über Ultraweitband oder Bluetooth), die in Tagebaugeräten bereits eingesetzt werden, aber im Vergleich zur GNSS-Ortung noch zu ungenau sind.

- › *Relative Positionsbestimmung*: Um bei einem Bagger von der Position eines GNSS-Empfängers ausgehend, welcher sich auf der Fahrerkabine befindet, die Position der Löffelspitze berechnen zu können, müssen die räumliche Lage und die Position der einzelnen Glieder (Ausleger, Stiel, Viergelenk und Löffel) zueinander bekannt sein. Dies kann über die Stellungen der einzelnen Dreh- und Schubgelenke ermittelt werden, wofür mechanische Seilzugsensoren oder Messungen mit Ultraschall oder magnetostriktiven Verfahren eingesetzt werden können (Ludwig 2014). Als kostengünstige und robuste Nachrüstlösungen sind inertielle Messeinheiten erhältlich, die unterschiedlich ausgerichtete Beschleunigungs- und Drehratensensoren kombinieren. Bisherige Systeme erfassen jedoch nicht die elastischen Verformungen, die besonders bei langen, schmalen Auslegerstrukturen auftreten (z. B. an Mobilkränen oder am Mast einer Autobetonpumpe). In diesen Fällen ist die Annahme eines Starrkörpersystems nicht mehr zutreffend. Zur Automatisierung solcher Maschinen wird es notwendig sein, elastische Verformungen über geeignete Sensorsysteme in die Steuerungssysteme zu integrieren, was bislang eine ungelöste Forschungsaufgabe ist.

6.3.2 Personen- und Objekterkennung

Beim Betrieb von mobilen Maschinen ereignen sich immer wieder schwere, auch tödliche Unfälle sowie Sachbeschädigungen, weil im Gefahrenbereich arbeitende Personen und befindliche Objekte nicht richtig erkannt wurden (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 30 f.). Eine wichtige Aufgabe zur Erhöhung der Sicherheit ist deshalb die effiziente und zuverlässige Personen- und Objekterkennung. Die am häufigsten eingesetzte technische Lösung in diesem Kontext sind Kameramonitorssysteme (KMS). Diese stellen Hilfsvorrichtungen zur Verbesserung der Sicht dar und unterstützen bei der Überwachung des Gefahrenbereichs vor, hinter und um eine mobile Maschine herum – sowohl bei Fahrbewegungen als auch bei Bewegungen der Anbaukomponenten. Oftmals werden hier mehrere Weitwinkelkameras eingesetzt. Der Nachteil von KMS ist, dass sie die Aufmerksamkeit der Bediener/innen erfordern und nur für den Nahbereich geeignet sind. Mit sensorischen Warneinrichtungen zur automatischen Detektion wird versucht, diese Probleme zu beheben.

Eine aktive Ortung von Personen kann beispielsweise mithilfe von Transpondersystemen wie Radio-Frequency-Identification(RFID)-Tags erfolgen, welche an der Arbeitskleidung oder am Helm befestigt werden (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 31 f. u. 39).¹⁴³ Auch Anbauwerkzeuge (z. B. für Bagger) oder Betriebsmittel lassen sich mittels RFID-Tag automatisch identifizieren. Der große Vorteil solcher funkbasierten Systeme ist, dass diese auch bei schlechten Sichtverhältnissen, bei Nässe und bei starkem Schmutz zuverlässig arbeiten. Durch die vollflächige Ausbreitung der Funkwellen entstehen keine toten Winkel und von Hindernissen verdeckte Personen werden sicher erkannt. Allerdings muss sichergestellt werden, dass jede Person mit den entsprechenden Warneinheiten in Form von RFID-Tags ausgerüstet ist, weshalb Transpondersysteme aus Sicherheitsgründen nur in abgeschlossenen Bereichen bzw. Betriebsgeländen mit Zugangskontrolle eingesetzt werden sollten (Netzwerk Baumaschinen der Offensive Gutes Bauen 2019, S. 20). Zu beachten sind außerdem datenschutzrechtliche Aspekte, da das System dazu benutzt werden kann, die Aktivität einzelner Personen aufzuzeichnen.

Eine Alternative zur funkbasierten Ortung stellen Warn- und Sensoriksysteme dar, die mittels Ultraschall, Radar oder 3-D-Kameras das Umfeld erfassen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 31). Als besonders robust in der Nahfeldortung gelten Ultraschallsensoren. Diese erfassen unabhängig von Materialfarbe, Transparenz, Glanz und Umgebungslicht Hindernisse mit Entfernungen bis zu 3 m. Zudem besitzen sie eine hohe Unempfindlichkeit gegen Schmutz, Staub, Feuchtigkeit und Nebel. Radarsysteme können auch bei Geschwindigkeiten von bis zu 20 km/h großflächige Detektionsbereiche bis zu Entfernungen von 20 m Abstand zum Fahrzeug sicher erfassen.

¹⁴² <https://leica-geosystems.com/de-de/products/construction-tps-and-gnss/receivers/leica-icon-gps-80> (12.3.2021)

¹⁴³ <https://gaorfid.com/people-tracking-for-construction-sites/> (12.3.2021)

Neuere Warnsysteme versuchen, Objekte nicht nur zu erkennen, sondern zu klassifizieren, um beispielsweise Personen von Gegenständen unterscheiden zu können (Liebherr 2019b; dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 31, 36 f. u. 82). Effiziente und zuverlässige Umgebungserkennungssysteme sind eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung vieler Assistenz- und Autonomiefunktionen und werden insbesondere auch für die Implementierung automatisierter Fahrfunktionen benötigt (Kasten 6.2). Sie bestehen aus sensorischen Komponenten (1-D, 2-D oder 3-D) sowie der notwendigen Hard- und Software (Prozessor, Algorithmus) zur Datenaufbereitung und Datenverarbeitung. Oftmals werden 3-D-Kameras eingesetzt, welche mittels Stereoskopie Tiefeninformationen gewinnen. Zur Klassifizierung existiert bereits eine Vielzahl von anwendungsspezifischen Algorithmen, wobei viele auf maschinellem Lernen und künstlichen neuronalen Netzen beruhen. Die zur Verfügung stehenden Klassifizierungsalgorithmen sind aktuell allerdings noch auf sehr einfache Objekte begrenzt. Das ungeordnete Arbeitsumfeld mobiler Arbeitsmaschinen – im Gegensatz zu den relativ geordneten Verhältnissen in der industriellen Produktion –, stellt eine besondere Herausforderung dar und führt zu einem erhöhten Aufwand bei der Entwicklung, Absicherung und Integration der entsprechenden Systeme (Neumann et al. 2018).

Kasten 6.2 Automatisiertes Fahren

Baumaschinen sind meist mobil, verfügen über Rad- oder Kettenfahrwerke, welche auf unwegsamem Gelände und unter widrigen Umweltbedingungen Zugkraft auf den Untergrund übertragen müssen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 61). Die sensorische Erfassung der Umgebung, lokale Referenzierung und die Navigation und Trajektorienplanung sind ähnliche Aufgaben, wie sie bei der Entwicklung autonomer Straßenfahrzeuge auftreten. Das hat zur Folge, dass die Verfügbarkeit von geeigneter Sensorik sowie die Methoden für die Umsetzung der automatisierten Fahraufgabe durch die Automobilindustrie und die Mobilrobotik begünstigt werden.

Die regelungstechnischen Herausforderungen zum automatisierten Fahren einer Maschine sind grundsätzlich überschaubar. Unter Voraussetzung einer elektronisch steuerbaren Maschine sind die Aufgaben zur Antriebsregelung, Lenkung, Kurvenfahrt, Schlupfregelung, Kippkontrolle und Ähnlichem aus dem Automobilbereich bekannt und Stand der Technik. Maßgeblich für das Gelingen einer automatisierten Fahraufgabe sind

- › eine kontrollierte, strukturierte Umgebung mit guten Voraussetzungen für Kartierung und Überwachung,
- › klar definierte Aufgaben, eine geringe Notwendigkeit zur Onlineentscheidungsfindung,
- › der Ausschluss von manuell bedienten Fahrzeugen oder Personen auf dem Gelände.

Das wiederum sind gleichzeitig die Hemmnisse für die breitere Umsetzung im Baumaschinenbereich. Da eine Baustelle durch verschiedene Gewerke, Maschinen und Menschen unvorhersehbare, chaotische Strukturen aufweist, gibt es noch keine selbstfahrenden, autonomen Erdbaumaschinen auf dem Markt. Dafür ist insbesondere die sensorische Umfelderkennung nicht ausgereift genug.

Hingegen bieten Tagebaue und Bergwerke ideale Umgebungen für den automatisierten Fahrbetrieb: Es handelt sich um abgeschlossene Areale, es gibt keine unbefugten Personen im Bereich der Fahrstrecken und keine unbekannt Objekte. Verschiedene Hersteller wie Caterpillar, Komatsu und Sandvik haben bereits Systeme zur Fernnavigation für diese Einsatzorte im Angebot (Gray 2019; Grayson 2018). Die Fahrzeuge fahren auf festgelegten Strecken, ähnlich einem fahrerlosen Transportsystem und das Gebiet ist vollständig kartiert. In Tagebauen können die Kipper über GNSS gesteuert werden, während sie sich untertage an Tunnelwänden orientieren können. Die Fahrzeuge verfügen über Technologien zur Erfassung von Hindernissen auf den Fahrwegen, wie Schlaglöcher oder andere Maschinen, und können auf diese reagieren.

Quelle: Will 2019, S. 61 f.

6.3.3 Digitale Datenübertragung: Flottenmanagement und -orchestrierung

Automatisierung erfordert die Verwendung von Rechentechnik, die über analoge oder digitale Schnittstellen verfügt (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 38). Moderne Maschinen verfügen bereits über CAN-Bus-Systeme, die eine digitale Datenübertragung über das gesamte Bordnetz und zwischen den Teilsystemen der Maschine

(Motor, Getriebe, Hydraulik etc.) ermöglicht. Bei Maschinen kleinerer Leistungsklassen sind oftmals noch hydraulische Joysticks verbaut. Maschinen größerer Leistungsklassen (Bagger und Radlader > 20 t) sind im Allgemeinen bereits mit elektronischen Joysticks für Arbeits- und Fahrfunktionen und damit der notwendigen Elektrifizierung ausgestattet, um Automatisierungsfunktionen zu implementieren. Doch die CAN-Protokolle der Hersteller sind meist proprietär und eine Ansteuerung der Maschinenfunktionen ist somit nur in Zusammenarbeit mit dem Hersteller möglich.

Werden zukünftig vermehrt automatisierte und autonome Maschinen Teil der Prozesskette, stellt sich die Notwendigkeit, die automatisierten Arbeitsprozesse zu koordinieren (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 85). Die derzeitigen Anforderungen an die Latenz der Datenübertragung ist für die Kooperation von Baumaschinen geringer als beispielsweise im autonomen Straßenverkehr, da die Fahr- und Arbeitsgeschwindigkeiten von Baumaschinen wesentlich langsamer sind. Gerade im Straßenbau ergeben sich dafür zahlreiche Anwendungsszenarien (Kap. 6.2.3). Der Fertigungszug, meist bestehend aus Beschicker und Fertiger, muss in kontrolliertem Abstand fahren, und die Walzen müssen sich am Einbaufortschritt orientieren. Dazu ist eine gegenseitige Übermittlung von Position und Trajektorie nötig. Im Forschungsvorhaben »SmartSite« wurde bereits unter Beweis gestellt, dass vernetzte Straßenfertigung realisiert werden kann (Kuenzel et al. 2016).

Benötigt werden dazu Flottenmanagementsysteme, welche Zustandsdaten von mehreren Maschinen über Mobilfunk in einem Cloudservice aggregieren (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 84). Dabei werden Daten wie Position, Betriebsstunden, Kraftstoffverbrauch, Asphalttemperaturen etc. überwacht. Neben der betriebswirtschaftlichen Analyse und Abrechnung des Maschineneinsatzes dient dies der Verwaltung sowie der Einsatzplanung von automatisierten Maschinen sowie deren Versorgung mit Auftragsdaten – auch als Flottenorchestrierung bezeichnet. Grundlage hierfür sind ein offener, maschinenübergreifender Datenstandard und eine zuverlässige Kommunikation über offene Schnittstellen, um Maschinen unterschiedlicher Hersteller miteinander zu verknüpfen. Selbstfahrende Maschinen müssen für Navigation und Kollisionsvermeidung Routeninformationen, Karten und Umgebungsinformationen austauschen, automatisierte Prozesse erfordern zudem synchronisierte Prozessplanungsdaten. Die Standardisierung von Telematikdaten entsprechend ISO 15143-3 ist dafür noch nicht ausreichend (Kap. 6.1). Welche Netzwerkstruktur geeignet ist und wie Protokolle und Schnittstellen gestaltet sein müssen, ist noch ungeklärt und wird aktuell beispielsweise im Verbundprojekt »Bauen 4.0« der Technischen Universitäten Dresden und München erforscht.¹⁴⁴

Für die Vernetzung der Maschinen in einer Baustellencloud kommt als offener Datenaustauschstandard »Open Platform Communications Unified Architecture«¹⁴⁵ (OPC-UA) infrage (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 84 f.). OPC-UA ist die Spezifikation eines plattformunabhängigen Standards zur Kommunikation zwischen Produkten unterschiedlicher Hersteller. Definiert wird, wie eine Information über ein Netzwerk zwischen Maschine und Anwendung (Cloud, Datenbank etc.) übertragen wird. Andere Industrieverbände und Organisationen haben bereits Regelungen zum Übertragen ihrer bestehenden Datenmodelle auf OPC-UA entwickelt.¹⁴⁶ Im Bereich der Baumaschinen ist die Arbeitsgemeinschaft Machines in Construction 4.0 – MiC 4.0 innerhalb des VDMA mit dieser Aufgabe befasst.

6.3.4 Antriebstechnik

Die Antriebstechnik umfasst im Allgemeinen nicht nur das Primäraggregat (Antrieb), das mittels Energiewandlung und Kraftübertragung eine Bewegung erzeugt, sondern es handelt sich hierbei um ein komplexes technisches System, das die vielfältigen Funktionen der Baumaschinen versorgt (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 40). Es besteht aus der Leistungsquelle, Leistungswandlern, Übertragungs- und Speicherelementen, Verbrauchern sowie der Steuerungstechnik. Allgemeine Entwicklungsziele der Antriebstechnik für Baumaschinen sind wie in vielen anderen Anwendungsbereichen: die Steigerung der Energieeffizienz, die Senkung der Emissionen und der Betriebskosten, eine hohe Leistungsdichte, ein kleiner Bauraum, die Verbesserung der Steuerbarkeit, ein gesteigerter Bedienkomfort und eine erhöhte Betriebssicherheit sowie die Verbesserung der Ergonomie. Für das Erreichen dieser Ziele steht oftmals die Automatisierung von einzelnen Bewegungen bis hin zu kompletten Prozessen im Fokus.

¹⁴⁴ <https://www.verbundprojekt-bauen40.de/> (6.4.2021)

¹⁴⁵ <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/> (12.3.2021)

¹⁴⁶ <https://opcfoundation.org/markets-collaboration/> (12.3.2021)

Ein wichtiger Meilenstein bei der Weiterentwicklung von (elektro)hydraulisch angetriebenen Baumaschinen mit Auslegerstrukturen (Bagger, Autobetonpumpe) wird die exakte Positionierung des Endeffektors sein. Dazu müssen neue antriebstechnische Konzepte etabliert werden, da die momentanen Systeme (u. a. wegen der langen Hydraulikleitungen) nicht geeignet sind, die nötige Regelgüte zu erzielen, die für eine genaue Positionsregelung bei automatisierten Arbeitsprozessen notwendig ist.

6.3.5 Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS)

Im heutigen Baustellenumfeld ist es nach wie vor erforderlich, dass qualifiziertes Personal die Steuerung der Baumaschine übernimmt (dazu und zum Folgenden Will 2019, S.48 f. u. 90). Abgesehen von handgeführten Baumaschinen und wenigen Sondermaschinen stellt bei der klassischen Baumaschine eine geschlossene Kabine (oder ein offener Fahrerstand) die Ausgangsbasis für die Interaktion zwischen Bediener/innen und Maschine dar. Dort sind alle Elemente zusammengeführt, die für die Maschinensteuerung relevant sind. Die Ausführung des MMS-Systems hat einen signifikanten Einfluss auf Arbeitstempo und Ausführungsqualität der Bediener/innen und beeinflusst damit in hohem Maße die Leistungsfähigkeit und Betriebssicherheit der Maschine. Dementsprechend wird mittlerweile sehr viel Aufwand für die Entwicklung und ergonomische Gestaltung der Kabinen und MMS-Systeme betrieben (Brinkmeier 2016; Cab Concept Cluster 2016; Cohrs 2017). Abgesehen von den Richtlinien für allgemeine Sicherheitsanforderungen¹⁴⁷ geschieht dies größtenteils ohne Standardisierung, sodass die MMS-Konzepte zwischen den Herstellern stark variieren. Nicht zuletzt wegen des sich daraus ergebenden Schulungsaufwands, der wiederum mit Produktivitätsverlusten verbunden ist, sind intuitive, hersteller- und maschinenübergreifende Bedienkonzepte Ziele von Forschung und Entwicklung (Cab Concept Cluster 2016; Krzywinski/Will 2019).

Bestandteile eines MMS-Systems sind verschiedene Ein- und Ausgabemöglichkeiten sowie Assistenzsysteme (zum Folgenden Will 2019, S.49 ff. u. 87 ff.):

- › *Eingabelemente*: Die in Baumaschinen verwendeten Bedienelemente sind heutzutage primär haptischer Art. Zur Steuerung der Gesamtmaschine (Fahraufgabe) kommen vorwiegend klassische Elemente wie Lenkrad und Pedale (teilweise auch Steuerhebel), zur Steuerung der Arbeitsausrüstung ein oder mehrere Joysticks zur Anwendung. Für die Bedienung peripherer Maschinenfunktionen werden zumeist Schalter, Tasten oder auch Dreh- und Schieberegler genutzt. In modernen Maschinen sind dafür aber auch häufig schon serienmäßig Touchscreens im Einsatz, auf denen die Steuerelemente themen- oder funktionspezifisch gruppiert sind, wodurch die Übersichtlichkeit verbessert wird, die Kabine insgesamt geordneter wirkt und damit die Bedienung wesentlich vereinfacht werden kann. Zur Informationseingabe gibt es prinzipiell eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten wie Gestiksteuerung, Spracheingabe oder Fernsteuerung, die in Baumaschinen noch kaum verfügbar sind, in Zukunft jedoch an Bedeutung zunehmen dürften.
- › *Ausgabelemente*: Die Informationsausgabe bzw. Rückmeldung seitens der Maschine erfolgt zumeist auf visuellem Weg. In älteren Maschinen werden die Informationen zu den wichtigsten Maschinenfunktionen über klassische mechanische Anzeigeelemente (z. B. Tachometer, Betriebsstundenzählwerk) und Kontrollleuchten dargestellt. Diese Anzeigen werden in modernen Maschinen mehr und mehr durch universelle Displays ergänzt oder gänzlich ersetzt, die zumeist als Touchscreens ausgeführt sind und damit als kombinierte Aus- und Eingabeinstrumente dienen. Vor allem die Interaktion mit den immer häufiger eingesetzten Assistenzsystemen findet auf diesem Weg statt. Neuerdings werden bereits von einigen Baumaschinenherstellern AR-Technologien¹⁴⁸ zur Unterstützung von Servicearbeiten angeboten (Baublatt 2019). Zukünftig könnten mit AR-Hilfsmitteln virtuelle Höhenprofile oder Systemzustände der Anbaugeräte in das Sichtfeld des Bedienpersonals über ein Head-up-Display oder eine AR-Brille eingeblendet werden. Voraussetzung dafür sind die Echtzeiterfassung und -auswertung der Zustandsgrößen sowie die Objekterkennung mit ge-

¹⁴⁷ Relevant sind hier u. a. DIN EN 474-1 sowie ISO 5006: Erstere legt allgemeine sicherheitstechnische Anforderungen für Erdbaumaschinen fest und geht u. a. auch auf die Gestaltung von Maschinenführerplatz und Kabine ein; letztere legt den Fokus auf das Sichtfeld des Maschinenbedieners (Erdbaumaschinen) zur Sicherstellung einer guten Rundumsicht für die sichere Maschinenbedienung (Will 2019, S.49).

¹⁴⁸ Während bei AR die reale Wahrnehmung um computergenerierte Information erweitert wird, beruht VR auf der rein virtuellen Interaktion mit einer komplett simulierten Umgebung.

eigneten Sensoren. Kurzfristig wird AR wohl auf die Anzeige von Wartungs-, Bedien- und Verarbeitungsinformationen über mobile Endgeräte beschränkt bleiben, während VR-Technologien wohl auch langfristig in erster Linie auf die Bereiche Planung sowie Ausbildung und Schulung beschränkt bleiben.

- › *Assistenzsysteme:* Bei komplexen Arbeitsaufgaben werden in modernen Baumaschinen mehr und mehr Assistenzsysteme eingesetzt, die entweder serienmäßig in die Maschinen integriert sind oder aber nachgerüstet werden können (für einen Überblick Kap. 6.2). Genutzt werden die Assistenzsysteme immer dann, wenn eine hohe Ausführungsgenauigkeit gefragt ist (z. B. Gestaltung eines Planums oder einer Böschung) oder die Effizienz der Arbeit gesteigert werden soll. Herstellerseitige Untersuchungen zum Einsatz eines Assistenzsystems am Bagger zeigten bei erfahrem Personal eine Verbesserung der Ausführungsqualität um 75 % und eine Geschwindigkeitssteigerung um 41 %; unerfahrenes Personal konnte die Genauigkeit der Arbeit verdoppeln und die Geschwindigkeit um 28 % steigern (Kurmann 2019). Typische Anwendungsgebiete sind beispielsweise Erdarbeiten (mittels Grader, Planierraupe oder Bagger) oder Ladeaufgaben. Die gängigen Assistenzsysteme greifen nicht selbst in die Maschinensteuerung ein, sondern geben nur optisches, akustisches oder haptisches Feedback – der Mensch bleibt also die zentrale Steuerungsinstanz. Einen Schwerpunkt der Weiterentwicklung bildet die verbesserte Aufbereitung der Sensorsignale, beispielsweise durch eine Prozessmustererkennung, um Abweichungen von der Zielgröße zuverlässiger erkennen und in geeigneter Form innerhalb oder außerhalb der Kabine präsentieren zu können. Die autonome Baumaschine wird absehbar auf Spezialaufgaben beschränkt bleiben (Cohrs 2017). Daher wird die Mensch-Maschine-Schnittstelle auch weiterhin eine wesentliche Rolle spielen, sich aber kontinuierlich durch Assistenzsysteme und Automatisierungslösungen weiterentwickeln.

6.4 Fazit und Handlungsfelder

Vor allem die Notwendigkeit zur Produktivitätssteigerung im Baugewerbe und der Fachkräftemangel führen zu dem Wunsch, Bauprozesse effizienter zu gestalten (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 76 u. 93 ff.). Entgegen anderen Industriezweigen, wo die Prozessautomatisierung große Teile der gesamten Wertschöpfungskette bestimmt, spielt sie im Bausektor, wenn überhaupt, bisher nur eine untergeordnete Rolle. Automatisierung ist vor allem dann sinnvoll, wenn gut planbare Arbeitsschritte sich nach klaren Mustern stets wiederholen oder diese über einen längeren Zeitraum kontinuierlich fortlaufen. Ein gutes Beispiel für planbare, kontinuierliche Bauprozesse ist der Asphalteinbau beim Straßenbau. Die eingesetzten Maschinen wie Beschicker, Fertiger und Walzen arbeiten mit relativ geringen Geschwindigkeiten und sind damit zeitlich gut beherrschbar. Die zur Automatisierung benötigten Sensoren und Aktoren sind verfügbar und werden heutzutage teilweise schon eingesetzt. Demgegenüber herrschen auf Baustellen im Hochbau, speziell im Wohnungsbau, meist deutlich unübersichtlichere Rahmenbedingungen vor. Der Unikatcharakter von Bauprojekten, die starke Fragmentierung der Bauindustrie und das Fehlen einheitlicher Schnittstellen zur Dokumentation und Koordination des heutigen Bauablaufs führen dazu, dass sich auch bereits vorhandene Automatisierungs- und Digitalisierungskonzepte nur mit Mühe umsetzen lassen.

Hinsichtlich der Anwendung von KI-Methoden sowie des maschinellen Lernens besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, wobei sich vor allem die erwähnten hohen sicherheitstechnischen Anforderungen als maßgebliche Hürde für automatisierte Steuerungskonzepte erweisen. So kommt es, dass auf dem Baumaschinenmarkt bislang kaum Produkte zu finden sind, die KI-Methoden für eine weitreichende Automatisierung nutzbar machen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 23 u. 92 f.). Auf absehbare Zeit werden innovative Maschinenkonzepte, wie autonome Baumaschinen oder Bauroboter, sehr wahrscheinlich auf solche Spezialaufgaben beschränkt bleiben, bei denen auf die Anwesenheit von Menschen im Arbeitsbereich der Maschine weitgehend verzichtet werden kann (wie z. B. 3-D-Betondruckmaschinen oder Abbruchroboter). Der allgemeine Trend geht hingegen eher in Richtung einer zunehmenden Teilautomatisierung einzelner Arbeitsschritte. Zum aktuellen Stand der Technik zählen bereits zahlreiche herstellereigenspezifische sowie auch herstellerübergreifende Assistenzsysteme (angeboten teilweise von Drittanbietern), die – meist im Zusammenspiel mit geeigneter Sensorik (etwa zur relativen Positionsbestimmung der Arbeitsgeräte) – dem Personenschutz, der Bedienerentlastung, der Prozessgenauigkeit sowie dem Maschinen- und Flottenmanagement dienen. Aktuelle Schwerpunkte von Forschung und Entwicklung sind dementsprechend die Evaluierung von Sensoren, die für den Bauprozess geeignet sind (Umfeldererkennung, Zustandserfassung von Erd- und Baustoffen etc.), die Entwicklung von Algorithmen zur zuverlässigen Objekt- und Prozessklassifizierung sowie zur Maschinensteuerung, außerdem die Elektrifizierung der Antriebsstränge.

Eine durchgängige, schnelle und sichere Kommunikation sowohl zwischen den einzelnen Maschinen als auch zwischen den Maschinen und den vornehmlich als Kontrollinstanz fungierenden Menschen, entweder in einem zentralen Leitstand oder nach wie vor auf der Maschine, erfordert die Standardisierung von Kommunikationsschnittstellen, Datenaustauschformaten und Übertragungsprotokollen ebenso wie die Festlegung der Inhalte der zu übertragenden Informationen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 78 f.). Zwar sind Telemetriesysteme zur Ortung und Betriebszustandsübermittlung der Maschinen inzwischen Stand der Technik, jedoch sind diese bislang überwiegend herstellerspezifisch verfügbar und somit die Überwachung sowie Steuerung heterogener Maschinenflotten momentan fast unmöglich. Für einen vernetzten und automatisierten Baubetrieb wird Infrastruktur in Form von offenen Cloudservern und einheitlichen Systemarchitekturen benötigt.

Ansatzpunkte, um Automatisierungskonzepte vermehrt in reale Maschinen und Prozesse überführen zu können, bestehen folglich hauptsächlich in den Bereichen Technikentwicklung sowie Standardisierung von Maschinenschnittstellen (zum Folgenden Will 2019, S. 107 ff.):

- › *Förderung anwendungsorientierter Forschungen:* Klar ist, dass der Weg zur Automatisierung über mehrere Zwischenstufen führen wird, welche zunächst die Implementierung von Assistenzfunktionen und teilautomatisierten Systemen beinhalten. Der Mensch bleibt demzufolge für die Maschinensteuerung auf absehbare Zeit unentbehrlich. An dieser Randbedingung sollten sich auch zukünftige Förderprogramme orientieren und vor allem auf das interdisziplinäre Spannungsfeld zwischen der Optimierung von Bauprozessen (aufeinander abgestimmte Abläufe durch datenbasierte Vernetzung von Maschinen) und der anwendungsorientierten Weiterentwicklung von grundlegenden Automatisierungstechnologien (Sensorik, KI etc.) sowie der Verbesserung von Mensch-Maschine-Schnittstellen (insbesondere Assistenzsysteme) fokussieren. Um die Praxistauglichkeit innovativer Lösungen unter realitätsnahen Bedingungen testen und gegenüber interessierten Unternehmen präsentieren zu können, wäre der Aufbau regionaler Versuchs- und Demonstrationszentren sehr hilfreich (analog etwa zum Center Construction Robotics der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen¹⁴⁹ oder zum geplanten Technologiepark BAUEN 4.0 der Technischen Universität Dresden mit Standort in Görlitz). Diese Zentren könnten gleichzeitig als Inkubator für Start-ups im Umfeld Baumaschinen und Bauprozesse wirken. Wichtig wäre eine interdisziplinäre, praxisorientierte Ausrichtung (unter Beteiligung u. a. von Maschinenbau/Mechatronik, Steuerungs-/Automatisierungstechnik, Bauingenieurwesen, Softwareentwicklung) sowohl der Forschungsprojekte als auch der Versuchszentren, um die durchgängige Betrachtung der gesamten Prozesskette und die Wirtschaftlichkeit der Ergebnisse sicherzustellen.
- › *Standardisierung von Datenformaten und Schnittstellen:* Die Entwicklung herstellerunabhängiger Daten- und Schnittstellenspezifikationen bildet die Grundvoraussetzung für effiziente Flottenmanagementsysteme, eine sichere Lieferkettenüberwachung, praktikable Predictive-Maintenance-Lösungen, eine verlässliche Maschine-zu-Maschine-Kommunikation und vernetzte Anwendungen. Im Landmaschinenbereich hat sich bereits vor Jahren der herstellerübergreifende ISOBUS-Standard (ISO 11873) für die Schnittstelle zwischen Traktor und Anbaugeräten etabliert. Für die Schnittstelle zwischen Baumaschine und deren Anbaugeräten wird ein ähnlicher, aber eigenständiger Weg im Rahmen der Aktivitäten der Arbeitsgruppe Machines in construction 4.0 – MiC 4.0 unter dem Dach des VDMA verfolgt. Wichtiger ist jedoch die Entwicklung von Standards für den maschinen- und herstellerübergreifenden Datenaustausch, die an der Schnittstelle zu den Clouddiensten der Maschinenhersteller ansetzen (nicht direkt an der Datenschnittstelle [Bordsystem] der Maschine wie beim ISOBUS). Hier gibt es Ansätze wie die ISO 15143-3, die im Rahmen der erwähnten Standardisierungsaktivitäten Berücksichtigung finden und dort weiterentwickelt werden. Als Schwierigkeit erweisen sich hierbei die oft gegenläufigen Interessen der verschiedenen Maschinenhersteller. Standardisierungsbemühungen haben deshalb am ehesten dann Erfolg, sich bei Herstellern durchzusetzen, wenn sie von den relevanten Verbänden der Maschinenhersteller (wie dem VDMA) und Maschinenbetreiber (wie dem VDBUM) sowie dem Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V. (HDB) breit getragen und vorangetrieben werden.

¹⁴⁹ <https://construction-robotics.de/> (12.3.2021)

7 Innovative Technologien, Prozesse und Produkte im Baugewerbe aus Umweltsicht

Der globale Ressourcenverbrauch hat in den letzten vier Jahrzehnten enorm zugenommen und wird sich gemäß dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) von heute bis 2040 verdoppeln (IRP 2017). Die Baubranche ist dabei ein maßgeblicher Treiber: Etwa die Hälfte der weltweiten Materialförderung entfällt auf nicht-metallische Mineralien, von denen fast alle für Bauzwecke verwendet werden. Gegenwärtig verbrauchen die weltweiten Bautätigkeiten jährlich 40 Mrd. t an Ressourcen. Allein in Deutschland werden pro Jahr mehr als 500 Mio. t mineralische Rohstoffe eingesetzt, was 90% der gesamten inländischen Förderung entspricht¹⁵⁰ (UBA 2018a). Mit dem Auf- und Ausbau sowie der Modernisierung der gebauten Umwelt ist für die Zukunft mit einem weiter steigenden Baustoffbedarf zu rechnen. Neben der aufgeführten großen Materialintensität ist mit Bauen und Wohnen ein Energiebedarf verbunden, der global ca. 40% des gesamten Energieverbrauchs ausmacht.

Der Bausektor steht mithin vor großen Herausforderungen, um den Zielen einer nachhaltigen Entwicklung im Zusammenhang mit Ressourcennutzung gerecht zu werden. In diesem Kontext hat die Europäische Kommission (EK 2011) eine »Roadmap für ein ressourceneffizientes Europa« vorgestellt. Für den Bausektor werden signifikante Verbesserungen beim Ressourcen- und Energieverbrauch während der Lebensdauer von Gebäuden und Infrastruktur gefordert – mit nachhaltigen Materialien, mehr Abfallrecycling und besserem Design. Die Dekarbonisierung des Bausektors spielt eine Schlüsselrolle beim Erreichen der langfristigen Klimaziele des Übereinkommens von Paris.

Daraus ergibt sich, dass das hier untersuchte Potenzial der Digitalisierung nicht alleine auf ökonomische Faktoren wie Produktivität, Bauzeit und -kosten ausgerichtet sein darf, sondern auch Nachhaltigkeitsziele zu beachten sind. Aus diesem Grund werden nach einer kurzen Einführung in den Begriff Nachhaltigkeit im Kontext Bauen (Kap. 7.1) die in den vorangegangenen Kapiteln behandelten Innovationen wie BIM (Kap. 7.2), additive Fertigung (Kap. 7.3), Modulbau (Kap. 7.4), automatisierte Baumaschinen (Kap. 7.5) unter dem Gesichtspunkt ausgewählter Nachhaltigkeitsaspekte reflektiert. Die Beschränkung auf ökologische Aspekte erscheint sinnvoll, da das Bauwesen immense materielle natürliche Ressourcen in Anspruch nimmt und damit erhebliche Umweltwirkungen verbunden sind. Zu beachten sind dabei unterschiedliche Untersuchungsebenen:

- › Die eingesetzten Technologien, Bauweisen, Produkte und Baustoffe erzeugen *direkt* bestimmbare Umwelteffekte, wie z. B. Materialverbrauch, Energiebedarf sowie Emissionen und Abfälle, die aus den eingesetzten Verfahren, der Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Baustoffe resultieren.
- › Davon zu unterscheiden sind die *indirekten* Umwelteffekte, die aus veränderten Bauprozessen resultieren (z. B. verringerter Ressourcenverbrauch infolge BIM-Nutzung und Digitalisierung der Verfahren).

Eine umfassende Umweltbewertung direkter und indirekter Wirkungen ist im Folgenden nicht möglich, da es sich bei den zur Diskussion stehenden Technologien, Prozessen und Produkten überwiegend um Innovationen handelt, zu denen bisher noch keine detaillierten Untersuchungen zu Umweltaspekten vorliegen. So gibt es etwa zu additiven Fertigungsverfahren und neuen Verbundwerkstoffen bisher keine einschlägigen Studien, in denen z. B. die Potenziale zum Einsparen von CO₂-Emissionen oder der Energie- und Ressourceneffizienz eingehend und nachvollziehbar erörtert werden. Selbst die dafür notwendige Datenbasis (z. B. Mengengerüste zum Materialeinsatz, detaillierte Energiebilanzen und die mit diesen Technologien verbundenen Treibhausgasemissionen) ist bisher nicht vorhanden. Deshalb beschränkt sich die Darstellung auf Teilaspekte, bei denen zudem meist nur eine qualitative Abschätzung der Umwelteffekte möglich ist. Bei BIM stehen dabei die indirekten Effekte im Vordergrund (nachhaltiges Bauen durch Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäudevarianten), bei allen anderen Technikbereichen werden hingegen primär direkte Effekte thematisiert, die mit der Produktion, Nutzung und Entsorgung der Technologien zusammenhängen.

¹⁵⁰ <https://www.ressource-deutschland.de/themen/bauwesen/> (12.3.2021)

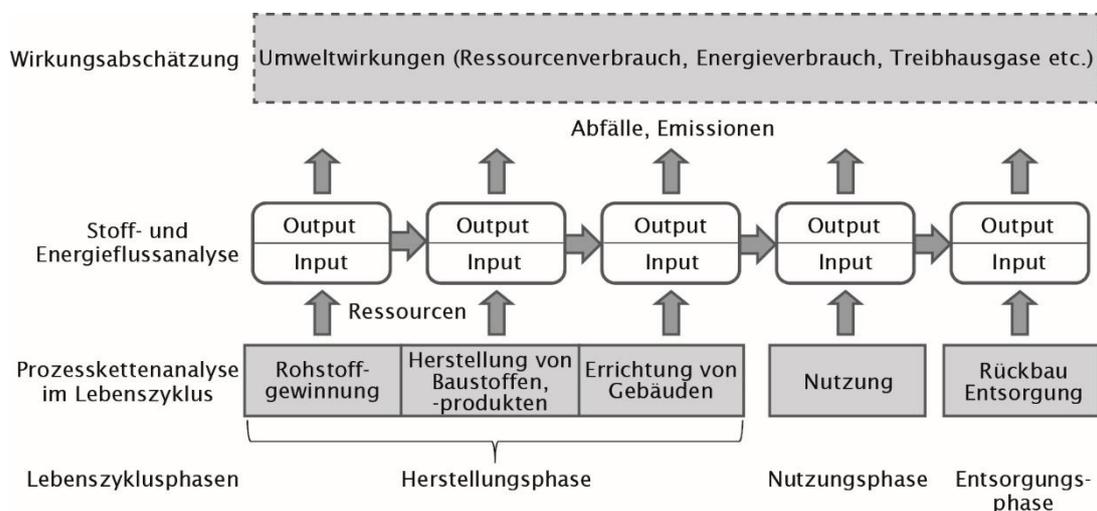
7.1 Nachhaltiges Bauen – ökologische Dimension

Der Begriff der nachhaltigen Entwicklung geht auf die Brundtland-Kommission von 1987 zurück.¹⁵¹ Im Mittelpunkt steht das Leitbild einer gesellschaftlichen Entwicklung, das seine Ziele auf drei Säulen aufbaut:

1. die Bewahrung einer intakten Umwelt;
2. die Berücksichtigung und Bewahrung sozialer Gerechtigkeit;
3. das Stärken einer leistungsfähigen und nachhaltigen Wirtschaft.

Dieses Leitbild mit seinen drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziokultur stellt den Ausgangspunkt für die Entwicklung von Prinzipien und Bewertungsgrundlagen für ein nachhaltiges Bauen dar (BMUB 2016). Die ökologische Dimension hat für das Bauwesen aufgrund der in Anspruch genommenen materiellen Ressourcen sowie der entstehenden Umweltwirkungen große Bedeutung. Nachhaltiges Bauen bedeutet in diesem Sinne, dass natürliche Ressourcen bestmöglich unter den Gesichtspunkten einer schonenden Entnahme, einer effizienten Nutzung und der Vermeidung von Umweltbelastungen zu verwenden sind. Dies steht im Einklang mit dem Deutschen Ressourceneffizienzprogramm¹⁵² und dessen Fortschreibung.¹⁵³ Ziel ist ein optimierter Einsatz von Baumaterialien und -produkten. Es sollen alle erforderlichen Energie- und Stoffströme von der Gewinnung der Rohstoffe, der Herstellung der Bauprodukte, der Errichtung der Gebäude bis hin zum Rückbau (Abb. 7.1) sowie die damit verbundenen globalen und lokalen Umweltwirkungen minimiert werden.

Abb. 7.1 Lebenszyklusanalyse eines Gebäudes



Eigene Darstellung

Weitere wichtige Aspekte sind Flächenschonung, Erhaltung und Förderung der Biodiversität sowie Minimierung des Energie- und Wasserverbrauchs während der Nutzungsphase der Gebäude. Die Umweltauswirkungen des Bauens werden sowohl auf lokaler als auch globaler Ebene berücksichtigt.

Dem »Leitfaden Nachhaltiges Bauen« (BMUB 2016), dessen Berücksichtigung für den Bundesbau verbindlich eingeführt wurde, kommt eine Vorbildfunktion zu. Er enthält neben den Anforderungen an die Energieeffizienz auch Vorgaben zum Schutz von Ökosystemen und zur Schonung natürlicher Ressourcen. Neben allgemeinen Grundsätzen und Methoden des nachhaltigen Planens, Bauens, Nutzens und Betreibens werden auch aufgabenbezogene Grundsätze der Baumaßnahmen wie zu betrachtende Lebenszyklusszenarien und die Planungsgrundlagen für Neubaumaßnahmen dargestellt (BMUB 2016, S. 54 ff.). Des Weiteren werden Empfehlungen für

¹⁵¹ https://www.bmz.de/de/themen/2030_agenda/historie/rio_plus20/index.html (12.3.2021)

¹⁵² <https://www.bmu.de/themen/wirtschaft-produkte-ressourcen-tourismus/ressourceneffizienz/deutsches-ressourceneffizienzprogramm/> (12.3.2021)

¹⁵³ Die letzte Fortschreibung wurde mit dem Ressourceneffizienzprogramm III am 17. Juni 2020 vom Bundeskabinett verabschiedet.

eine Optimierung der Nutzungs- und Bewirtschaftungsprozesse ausgesprochen. Demzufolge ist im Bauwesen der Schutz der natürlich vorkommenden Ressourcen durch folgende Maßnahmen voranzubringen (BMUB 2016, S. 21):

- › baustoffliche Ressourcen
 - Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten, Baukonstruktionen und Gebäuden
 - Einsatz wiederverwendbarer oder -verwertbarer Bauprodukte/Baustoffe
 - gefahrlose Rückführung der Stoffe in den technischen oder, soweit sinnvoll, in den natürlichen Stoffkreislauf
 - Senkung des Ressourcenbedarfs bei der Erstellung und dem Betrieb von Gebäuden
 - Einsatz nachhaltig erzeugter nachwachsender Rohstoffe (auch unter dem Aspekt der Erhaltung der biologischen Vielfalt)
- › nicht baustoffliche Ressourcen
 - Nutzung von Regen- oder Grauwasser sowie Reduzierung des Trinkwasserverbrauchs
- › energetische Ressourcen
 - Reduzierung von Transportaufwendungen von Baustoffen und -teilen
 - Minimierung des Energiebedarfs in der Nutzungsphase
 - Einsatz regenerativer Energie
- › biologisch vielfältige Flächenressourcen
 - Minimierung der Flächeninanspruchnahme durch das Gebäude
 - Durchführung von Ausgleichsmaßnahmen

Während der »Leitfaden Nachhaltiges Bauen«¹⁵⁴ den politischen Rahmen für die Umsetzung und Operationalisierung des nachhaltigen Planens, Bauens, Nutzens und Betreibens darstellt, liefert das »Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen«¹⁵⁵ (BNB) die anzuwendende Nachweismethodik für die ganzheitliche Bewertung von Bundesgebäuden. Das BNB ist als ein praxisgerechtes Instrument zur Optimierung der Nachhaltigkeitsanforderungen in der Planung von Bauprojekten konzipiert. Mit der systematischen Beurteilung der Nachhaltigkeitsqualitäten, die sich an den Schutzziele des nachhaltigen Bauens orientieren, werden eine Gesamtbeurteilung und eine Vergleichbarkeit der Gebäude im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeitsqualität erreicht. Ziel ist, das Nachhaltigkeitsniveau von Gebäuden in ihrer Komplexität zu beschreiben und zu bewerten.

7.2 BIM

Die Implementierung von umweltrelevanten Daten in BIM wird als sechste Dimension in der BIM-Dimensionshierarchie definiert (Kap. 3.1.1). Das Einbinden solcher Daten in das BIM-Bauwerksinformationsmodell kann helfen, frühzeitig die richtigen Entscheidungen bezüglich eingesetzter Baustoffe und Bauweisen zu treffen. Auf *indirekte* Weise kann damit der ökologische Fußabdruck von Gebäuden bestimmt und ggf. optimiert werden (Oppen 2019). Nutzbare Daten sind insbesondere solche, wie sie im Kontext von Ökobilanzen generiert werden. Aus diesem Grund konzentriert sich die folgende Diskussion von BIM und Umweltaspekten auf Implikationen, die eng mit der Ökobilanzierung verbunden sind.

Neben diesen indirekten Umwelteffekten, die sich aus den mithilfe von BIM veränderten Prozessen ergeben, ist die Verwendung von BIM selbst mit *direkten Umwelteffekten* verknüpft, die beispielsweise mit dem Energieverbrauch digitaler Planungstools zusammenhängen. In welchem Maße ein verstärkter Einsatz von BIM einen erhöhten Bedarf an Energie bedeutet, lässt sich derzeit aber kaum verlässlich beantworten, weshalb direkte Umweltaspekte nachfolgend nicht weiter betrachtet werden.

¹⁵⁴ <https://www.nachhaltigesbauen.de/> (12.3.2021)

¹⁵⁵ <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/> (12.3.2021)

7.2.1 Die Ökobilanz als Basis für BIM

Die ökologische Gebäudebewertung basiert im Allgemeinen auf einer Ökobilanz (Life Cycle Assessment – LCA), bei der die Wirkungen des Gebäudes in seinem Lebenszyklus (Abb. 7.1) auf die Umwelt berechnet und analysiert werden (green Building 2018). Ökobilanzen können helfen, Gebäude und Bauwerke auch unter Einbindung ökologischer Gesichtspunkte zu planen und zu bauen. Für diese Berechnungen werden zahlreiche Informationen benötigt, z. B. die mit der Herstellung der eingesetzten Baustoffe verbundenen Umweltwirkungen wie auch der Endenergiebedarf während der Nutzungsphase des Gebäudes.

Die Erstellung einer Ökobilanz ist derzeit komplex und zeitaufwendig, da Angaben zu dem Energie- und Materialverbrauch meist händisch aus 2-D-Zeichnungen und Baupapierunterlagen entnommen werden müssen. Insbesondere kann z. B. die Technische Gebäudeausrüstung (TGA) im Rahmen einer Bilanzierung meist nur sehr vereinfacht oder pauschal abgebildet werden, da relevante Daten fehlen oder nur mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand erhoben werden können. Unter solchen Bedingungen kann das Potenzial einer Ökobilanz und dadurch BIM als frühzeitiges und iteratives Planungsinstrument nicht ausgeschöpft werden.

Für Ökobilanzierungen werden Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declarations – EPDs) als wesentlicher Bestandteil der Datenbasis genutzt. Sie liefern umweltrelevante Daten für Baustoffe und -elemente, um ein Gebäude unter ökologischer Sicht planen und bewerten zu können. Die Plattform »ÖKOBAUDAT« des BMI stellt eine vereinheitlichte Datenbasis für die Bilanzierung von Bauwerken zur Verfügung.¹⁵⁶ Daten der »ÖKOBAUDAT« bauen auf der renommierten Hintergrunddatenbank und Software »GaBi«¹⁵⁷ auf. Damit werden Datensätze zu Baumaterialien, Bau-, Transport-, Energie- und Entsorgungsprozessen bereitgestellt. Die in Umweltproduktdeklarationen und Datenbanken enthaltenen Daten können mit dem Mengengerüst zum Materialeinsatz eines Gebäudes verknüpft und aggregiert werden. Auf diese Weise erhält man eine vollständige Bilanz für die Errichtung des Gebäudes. Werden die Ergebnisse auch mit Bilanzen der Nutzungsphase und Entsorgung zusammengeführt, entsteht eine den gesamten Lebenszyklus umfassende Ökobilanz.

BIM soll Mengengerüst, Energiebedarf und den zu erwartenden Schadstoffausstoß in digitalen Gebäude-Modellen automatisch berechnen. Um ökobilanzielle Daten für BIM nutzen zu können, sollte die Datenbasis in einem speziellen standardisierten Format vorliegen (Lambertz et al. 2020). Hier bietet sich das herstellerunabhängige Open-Source-Datenformat IFC an, das den standardisierten Austausch von Projektdaten zwischen unterschiedlichen Fachdisziplinen auf Basis eines digitalen BIM-Modells ermöglicht (Kap. 3.1). In einem Forschungsprojekt des BBSR wurde allerdings jüngst aufgezeigt, dass sich die aktuelle Version »IFC4« zwar primär eignet, um verschiedene Ökobilanzumweltindikatoren zu integrieren, jedoch komplexere Gebäudeökobilanzierungen nicht zufriedenstellend durchgeführt werden können (Lambertz et al. 2020).

Bislang fehlt in vielen BIM-Datenbanken noch die Möglichkeit, die Planung und Errichtung des Gebäudes nach ökologischen Gesichtspunkten zu optimieren (green Building 2018). Vor allem stellt die automatische Aktualisierung der Ökobilanz bei Änderungen der Konstruktion oder der technischen Gebäudeausrüstung eine Herausforderung dar, was eine Voraussetzung dafür ist, verschiedene Varianten in kürzester Zeit aus ökologischer Perspektive vergleichen zu können. Aktuell arbeitet das Institut Bauen und Umwelt e. V. an der Zusammenführung von EPDs und BIM. Ziel ist, die EPD-Datensätze in einem standardisierten, BIM-geeigneten Format bereitzustellen, sodass diese direkt in die digitalen Gebäudemodelle einfließen können. Damit könnte die durch die BIM berechnete Gebäudeökobilanz direkt für die automatisierte Gebäudezertifizierung¹⁵⁸ verwendet werden. Beispielsweise ist in der Schweiz anders als in Deutschland BIM schon seit einigen Jahren stärker in Zertifizierungssysteme wie etwa das DGNB-Zertifizierungssystem der Schweizer Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft integriert (Kreißig 2016).

¹⁵⁶ <https://www.oekobaudat.de/> (12.3.2021)

¹⁵⁷ Die Software »GaBi« ist eines der führenden Produkte zur Ökobilanzierung (<https://sphaera.com/de/life-cycle-assessment-lca-software/>; 12.3.2021).

¹⁵⁸ Beispielsweise nach dem »Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen« (BNB), Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), »Leadership in Energy and Environmental Design« (LEED) oder »Building Research Establishment Environmental Assessment Method« (BREEAM).

Die Hinterlegung von ökobilanziellen Informationen zu den verbauten Materialien und Bauteilen im Bauwerksinformationsmodell ist nicht nur für die Herstellung und Nutzung von Bauwerken relevant. Diese Informationen könnten in Zukunft verstärkt im Rahmen von Urban Mining¹⁵⁹ genutzt werden, das im Zuge knapp werdender Ressourcen immer mehr an Bedeutung gewinnt. Dabei wird dem Umstand Rechnung getragen, dass in städtischen Gebieten enorme Rohstoffmengen verbaut sind. In den Gütergruppen Gebäude, leitungsgebundene Infrastrukturen, Haustechnik sowie Kapital- und Konsumgüter lagern in Deutschland ca. 28,2 Mrd. t Material. Dies entspricht pro Kopf einer Menge von 341 t, wovon 318 t mineralische Materialien wie Gesteine, Sande, Beton- und Mauersteine sind. Auf Stahl entfallen 14,3 t, auf Holz 4,3 t, auf Kunststoffe 3 t sowie auf sonstige Materialien 2,3 t (UBA 2016).

Diese kumulierten Materialmengen könnten nach der Nutzungsphase im Lebenszyklus der Güter und Bauwerke als sekundäre Rohstoffe wiedergewonnen werden. Eine strategische Rückgewinnung dieser Stoffe kann als wichtiger Beitrag für eine nachhaltige Ressourcennutzung gesehen werden. Somit könnte eine detaillierte digitale Dokumentation des Gebäudes im Rahmen von BIM, insbesondere der verwendeten Baumaterialien und technischen und elektrischen Gebäudeausrüstung, helfen, verwertbare Bestandteile rückgebauter Bauwerke zu identifizieren und einer geordneten Wiederverwendung zuzuführen.

7.2.2 Herausforderungen und Grenzen der Ökobilanzierung

Um die Ökobilanz eines *konkreten* Gebäudes erstellen zu können, müssen Daten für ein Materialgerüst derzeit zeitaufwendig z. T. manuell aus Baupapierunterlagen zusammengetragen werden (Lambertz et al. 2020). Die Erhebung von Daten zum Energiebedarf bei der Bauausführung ist meist mit noch größeren Schwierigkeiten verbunden. Diesbezügliche Daten stehen in der Regel nicht zur Verfügung, da eine Erhebung in den bisherigen Bauabläufen überhaupt nicht vorgesehen ist. Somit sind oft nur pauschale und vereinfachende Abschätzungen möglich. Für den Energieverbrauch in der Nutzungsphase eines Gebäudes können die im Rahmen des Genehmigungsverfahrens durchgeführten Modellrechnungen nach EnEV genutzt werden. Diese theoretischen Modellwerte entsprechen nicht unbedingt den Praxiswerten.

Aus praktikablen Gründen werden in der Regel Datensätze genutzt, wie sie in großen Ökobilanzdatenbanken wie »GaBi« abgelegt sind. Diese Datensätze sind standardisiert (EN-15804- und BNB-konform). Anwender/innen einer Ökobilanz greifen auf vorgefertigte Module zurück, z. B. für Basismaterialien wie Glas, Zement, Stahl, oder für Dienstleistungen wie Transport per Lkw und Schiff oder Entsorgungsprozesse wie Müllverbrennung. Ein Datensatz zu einem Baustoff enthält die ökologischen Daten eines standardisierten (typischen) Vertreters seiner Baustoffkategorie. Die Datensätze zu Grundstoffen, wie z. B. Zement, Stahl, Aluminium und Holz, stellen meist aggregierte und gemittelte Datensätze über sämtliche Vertreter ihrer Kategorie dar. Zement ist hierfür ein gutes Beispiel, da dessen aggregierter Datensatz (Durchschnittswert) sich aus verschiedenen Normzementen zusammensetzen kann.¹⁶⁰ Auf die Problematik und den Einfluss solcher Durchschnittsdatsätze auf das Ergebnis der Bilanzierung wird in Hafner et al. (2017, S. 60 f.) eingegangen. Die zur Verfügung stehenden Messdaten müssen in die standardisierte Struktur überführt werden, jedoch lassen sich Messdaten z. T. nicht einfach den Kategorien der Struktur zuordnen.

Datenqualität und -relevanz sind für die Durchführung einer Ökobilanz ein wichtiges Kriterium. Anwender/innen von Ökobilanzen haben das Problem, dass begutachtete Datensätze nicht immer in vollem Umfang zur Verfügung stehen. Daten, die Einblicke in spezifische innerbetriebliche Prozesse und Rezepturen erlauben, werden aus Know-how-Gründen von Unternehmen zur Sicherung eines Wettbewerbsvorteils kaum nutzbar gemacht, auch wenn diese Daten innerbetrieblich vorhanden sind (hierzu die immer noch aktuelle Studie von Feifel et al. 2010). Oft sind Anbieter ökobilanzieller Daten (z. B. im Rahmen von »GaBi«) gezwungen, Datensätze anzubieten, die die mehrstufige Herstellung eines Produkts als *ein* geschlossenes System (Blackbox) zusammenfasst. Die Beiträge der einzelnen Prozessschritte sind nicht nachvollziehbar. Somit bleiben z. B. umweltproblematischere Zwischenschritte verborgen. Es stellt sich die Frage, inwieweit die in den Datenbanken zugrunde liegenden ide-

¹⁵⁹ Laut Definition des UBA (2017) ist »Urban Mining die integrale Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers mit dem Ziel, aus langlebigen Gütern sowie Ablagerungen Sekundärrohstoffe zu gewinnen«.

¹⁶⁰ <https://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Zement> (12.3.2021)

altypischen Daten das konkrete Bauprojekt vor Ort noch angemessen abbilden. Dies ist für die Nachhaltigkeitsbewertung mit BIM von großer Relevanz, da die Verlässlichkeit ökobilanzieller Daten fraglich sein kann und oft auch kaum überprüfbar ist.

Die Ausführungen machen deutlich, dass die Einbindung von ökobilanziellen Daten für BIM – trotz großer Potenziale – strukturell wie auch in Bewertungsfragen noch vor etlichen Herausforderungen steht.

7.3 Additive Fertigung

Für Anwendungen additiver Fertigungsverfahren im Bauwesen sind bisher noch keine detaillierten und nachvollziehbaren Untersuchungen zu ökologischen Aspekten und Kosten verfügbar (hierzu z. B. Mechtcherine 2019, S. 53). Der Fokus der wissenschaftlichen Arbeiten liegt nach wie vor auf technologischen und werkstofftechnischen Aspekten. Von besonderem Interesse wären aber Umweltinformationen zum Lebenszyklus von Gebäuden (Abb. 7.1), die mit additiven Fertigungsverfahren errichtet werden. Dies umfasst den Rohstoff- und Energieeinsatz bei der *Herstellung* der in additiven Verfahren eingesetzten Werkstoffe, die dabei anfallenden Abfälle und Emissionen. Da bei der Anwendung dieser Verfahren Massenbaustoffe einsetzbar sein sollen, konzentrieren sich die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem Bereich auf mineralisch gebundene Baustoffe, allen voran Beton, dem in diesem Bereich ein großes Potenzial nachgesagt wird, während andere Werkstoffe wie Stahl, Glas und Kunststoffe im 3-D-Gebäudebau auf längere Sicht nur für ausgewählte Spezialanwendungen Verwendung finden dürften (Kap. 4.3) und somit für den Wohnungsbau längerfristig kaum relevant sind. Aus diesem Grund fokussiert dieses Kapitel ausschließlich auf den 3-D-Betondruck.

Von Interesse ist dabei insbesondere, ob durch den Einsatz 3-D-tauglicher Betone im Vergleich zu herkömmlichem Beton positive oder negative Umwelteffekte zu erwarten sind. Dies schließt insbesondere ihre Herstellung mit ein. Auch sind die ökologischen Effekte bei der *Errichtung von Gebäuden* mit 3-D-Verfahren darzustellen, soweit das schon möglich ist. Auch hier ist der konventionelle Betonbau mit seinen wichtigsten Merkmalen (Schalung, Gerüstbau, Transportaufkommen und Lärmemissionen etc.) die relevante Vergleichsgrundlage. Ferner ist im Kontext *Rückbau* von Gebäuden, die mit 3-D-Beton errichtet werden, das Wiederverwendungspotenzial dieser Betone zu untersuchen. Beim herkömmlichen Beton besteht am Lebensende das Problem des Downcyclings¹⁶¹ und es ist von Interesse, wie sich in diesem Zusammenhang die neuen Werkstoffe verhalten. Aus diesen Gründen erscheint es sinnvoll, im Folgenden zuerst die mit der Herstellung, Anwendung und Entsorgung verbundenen ökologischen Aspekte des konventionellen Betons darzustellen, um darauf aufbauend dann vergleichend den druckbaren Beton (3-D-Beton) zu diskutieren.

7.3.1 Konventioneller Beton

Herstellung von Beton und Zement – die Klimaproblematik

Beton ist das weltweit in größter Menge hergestellte Material. Pro Jahr werden weltweit größenordnungsmäßig 28 Mrd. t Beton produziert (zum Vergleich: Steinkohleförderung im Jahr 2018 7 Mrd. t; Erdölförderung 4,5 Mrd. t)¹⁶². Im Schnitt enthält 1 t Beton ca. 150 kg Zement als Bindemittel, das auf Zementklinker basiert, dessen Herstellung wiederum sehr energieintensiv ist. 2014 wurden größenordnungsmäßig 2 % des weltweiten Primärenergiebedarfs dafür benötigt. Etwa ein Drittel der Rohstoffe besteht aus chemisch gebundenem CO₂, das beim Klinkerbrennen freigesetzt wird. Weitere hohe CO₂-Emissionen entstehen durch die eingesetzten Brennstoffe. Im weltweiten Durchschnitt entspricht 1 t Klinker ca. 0,85 t CO₂ (Achternbosch et al. 2019). 2014 emittierte die globale Zementindustrie ca. 1,49 Mrd. t CO₂, was 7,5 % der totalen globalen anthropogenen CO₂-Emissionen bedeutete (Achternbosch et al. 2019).

Die Zementindustrie hat in den letzten 20 Jahren eine Reihe von Maßnahmen (Prozessoptimierung, Klinkersubstitution, Einsatz von Brennstoffen mit biogenem Kohlenstoff) umgesetzt, um die CO₂-Emissionen der Zementherstellung zu minimieren (Achternbosch et al. 2011). Eine der wichtigsten Strategien zur Minimierung

¹⁶¹ Downcycling bedeutet, dass das recycelte Material eine geringere Qualität und Funktionalität hat als das neue Material.

¹⁶² <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154527/umfrage/foerderung-von-steinkohle-weltweit-seit-1993/> (12.3.2021)

von CO₂-Emissionen ist der verstärkte Einsatz von inerten und latent hydraulischen¹⁶³ Klinkerersatzstoffen wie Kalkstein, Hochofenschlacke und Kohleflugasche, um nur die wichtigsten zu nennen. In Deutschland liegt der durchschnittliche Anteil der Klinkerersatzstoffe (Klinker-Zement-Faktor) in den Zementen derzeit bei 28 % (VDZ 2020),¹⁶⁴ die dadurch erreichte CO₂-Reduktion größenordnungsmäßig bei 27 %. Bei Einrechnung aller Maßnahmen beträgt der CO₂-Ausstoß pro t Zement in Deutschland um 0,56 t.¹⁶⁵ Wesentlich ist, dass die Potenziale der konventionellen Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emissionen bereits weitgehend ausgeschöpft sind (Achterbosch et al. 2018; Favier et al. 2018). In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass mit einer weiteren Reduzierung des Klinkeranteils im Zement die zugelassenen Anwendungsbereiche sich immer mehr einschränken. So eignen sich die seit August 2021 zugelassenen neuen klinkerärmeren Normzemente (Portlandkompositzemente, die neben Klinker zwei weitere Hauptbestandteile enthalten dürfen), primär nur für den üblichen Hochbau (Küchlin 2021). Inwieweit sie sich auf dem Markt etablieren, bleibt abzuwarten.

Die zunehmende Vielfalt in den Ausgangsstoffen (Zemente, Zusatzstoffe, Zusatzmittel), die Modifikationen in den Betonen (z. B. Faserbetone, Ultrahochfestbetone) sowie die Veränderungen in der Einbautechnik (z. B. 3-D-Druck) beeinflussen die Robustheit des Betons in Bezug auf seine Dauerhaftigkeit. Sie ist nicht für alle Betone und Anwendungen in gleicher Weise sichergestellt. Dieses Problem wird sich mit den neuen Zementen/Bindemitteln noch potenzieren. So ist für bestimmte Anwendungen ausreichende Robustheit angeblich nur mit besonderen betontechnologischen Maßnahmen, wie z. B. Optimierung der Fließfähigkeit und der Zusammensetzung (Packungsdichte) der Betone, sicherzustellen (Breitenbücher 2021). Aus diesem Grund wird im Deutschen Ausschuss für Stahlbeton aktuell eine Klassifizierung von Maßnahmen zur Sicherstellung des angestrebten Qualitätsniveaus durch Betonbauqualitätsklassen diskutiert. Hierbei ist sicherzustellen, dass auch Nachhaltigkeitsaspekte in starkem Maße berücksichtigt sind.

Energiewende und Umsetzung des Klimaschutzplans stellen die Hochofenschlacke aus Stahlwerken und die Flugasche aus Kohlekraftwerken als strategische Klinkerersatzstoffe infrage. Mit der Direktreduktion mit Wasserstoff, die zukünftig in der Stahlherstellung eingesetzt werden soll, entsteht eine für die Zementindustrie nicht nutzbare Schlacke (Algermissen 2020). Durch den Ausstieg aus der Kohleenergie fallen inländisch zudem auch die Aschen aus Kohlekraftwerken weg. Die Zementindustrie verliert somit wichtige Sekundärmaterialien, die bislang ihren spezifischen Beitrag zur CO₂-Reduktion der Branche geleistet haben. Die Suche nach Alternativen konzentriert sich seit einigen Jahren auf *Tongemische* minderwertiger Qualität (auch verunreinigte Tone genannt), die in der Natur reichlich vorkommen. Um als Klinkersubstitut verwendet werden zu können, müssen diese Tongemische in Öfen auf 500 bis 900 °C erhitzt werden, was mit einem erheblichen energetischen Mehraufwand verbunden ist, der in den CO₂-Bilanzen zu verrechnen ist. Je nach verwendetem Tonrohstoff und Brennverfahren entstehen dabei alleine 120 bis 330 kg CO₂/t calciniertem Ton (Trümer 2020), die Vorketten des Tonabbaus und Aufbereitung sowie dem Transport zu Zementwerk nicht eingerechnet.¹⁶⁶

All das weist auf die immensen Schwierigkeiten hin, die mit der Suche nach Alternativen zu Zementklinker verbunden sind. In den letzten 15 Jahren wurden zudem einige radikal neue Ansätze präsentiert (Kasten 7.1). Diese erregten beachtliches Aufsehen in Industrie und Politik. Jeder dieser Ansätze reklamierte medienwirksam den Durchbruch auf mögliche CO₂-Reduktionen für sich. Aus derzeitiger Perspektive erscheinen allerdings auch die radikalen Innovationen eher enttäuschend, da diese Entwicklungen weit hinter den selbstgesteckten Zielen und öffentlichen Erwartungen zurückbleiben. Dabei ist ein Teil der Umsetzungsprobleme auf die in Kapitel 2.3.3 aufgeführten systemischen Rahmenbedingungen der Zementbranche zurückzuführen, insbesondere auf ihre bisherige geringe Bereitschaft, mehr in Forschung und Entwicklung zu investieren. Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist, dass alle radikal innovativen Ansätze von Patentportfolios kleiner Firmen und Institutionen außerhalb der angestammten Zementcommunity stammen, was aufzeigt, wie wenig die Zementindustrie bislang bereit ist, im Kontext radikal neuer Ansätze Vorreiterrollen zu besetzen.

¹⁶³ Latent hydraulische Stoffe erhärten nach Feinmahlen und Anmachen mit Wasser erst nach Zugabe eines Anregers, z. B. Calciumhydroxid.

¹⁶⁴ Inwieweit sich der Anteil an Klinkerersatzstoffen auf über 30 % heben lässt, ohne die hohen Anforderungen an den heutigen Beton, wie z. B. die Dauerhaftigkeit, zu gefährden, ist in Fachkreisen umstritten.

¹⁶⁵ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/217222/umfrage/co2-emissionen-der-zementindustrie-in-deutschland/> (12.3.2021)

¹⁶⁶ Bislang steht ein Zulassungsantrag von Zementen mit calcinierten Tönen beim Deutschen Institut für Bautechnik noch aus, was darauf hinweisen könnte, dass zu diesem Klinkerersatzstoff noch Vorbehalte existieren.

Da in absehbarer Zeit nicht damit zu rechnen ist, dass Alternativen zu klinkerbasierten Zementen zur kommerziellen Anwendungsreife gebracht werden können, spielen die Abscheidung und Speicherung von CO₂ (CCS) in unterirdischen Lagerstätten als zukünftige CO₂-Minderungsmaßnahme eine entscheidende Rolle für die Zementindustrie. In Deutschland sind aktuell erste Demonstrationsanlagen geplant (Berkel 2021). Allerdings ist die CCS-Technologie nach jetzigem Stand in der Realisierung mit großen Unsicherheiten verbunden (Achternbosch et al. 2019), insbesondere im Hinblick auf die gesellschaftliche und politische Akzeptanz für die Umsetzung entsprechender Projekte im erforderlichen Maßstab. Welchen Beitrag die Technologie zum globalen Klimaschutz in Zukunft leisten kann, ist daher ungewiss.

Kasten 7.1 Neuartige Zementsysteme

Prominente Beispiele neuartiger Zementsysteme, die eine teils erhebliche CO₂-Reduktion versprechen, sind »Novacem« vom Imperial College London, »Calera« von der Stanford University, »Solidia« von der Rutgers University of New Jersey und »Celitement« vom Karlsruher Institut für Technologie. Zur Weiterentwicklung und Vermarktung wurden Start-ups gegründet.

»Novacem«, »Calera« und »Solidia« basieren technologisch auf der mineralischen Sequestrierung von CO₂. Diese Ansätze werden von den Erfinder/innen als *carbonnegativ* bezeichnet, da versucht wird, mehr CO₂ im Produkt zu binden, als bei der Herstellung emittiert wird. Bei »Novacem« werden als Rohstoff Magnesiumsilikate eingesetzt, um sie mit anthropogenem CO₂ umzusetzen. Die Zemente »Calera« und »Solidia« sind Calciumcarbonatbinder, mit denen jedoch technologisch jeweils komplett andere Wege eingeschlagen werden. Mit »Calera« wird eine Biomineralisierung nachgeahmt (auf Basis von Meerwasser bzw. Solen von Salzseen), die der Bildung von Korallen und Muscheln im Meer entspricht. Die »Solidia«-Technologie beruht auf einer milden Umsetzung von künstlich hergestellten Calciumsilikaten mit CO₂.

»Celitement« wiederum besteht aus einer neuen Familie von aktiven Calciumhydrosilikaten (h-CSH) mit niedrigem Calciumgehalt. Diese lassen sich mit Wasser zu den gleichen Calcium-Silikat-Hydraten (CSH) umsetzen, wie sie beim Aushärten des konventionellen Zementklinkers entstehen.

Die »Novacem«- und »Calera«-Ansätze erweisen sich technologisch komplexer als von den Erfinder/innen vorgesehen (Achternbosch 2018). Das »Novacem«-Verfahren z. B. benötigt große Energiemengen und für manche Prozessschritte sogar sehr hohe Drücke (150 bar bei 180 °C). Bei der »Calera«-Technologie werden u. a. große Mengen an alkalischen Hilfschemikalien benötigt, deren Herstellung sehr energieintensiv ist. Negative CO₂-Bilanzen werden bei beiden Technologien als unrealistisch eingeschätzt (Dewald/ Achternbosch 2016). Aufgrund fehlender Förderung wurde das Spin-off Novacem 2012 insolvent, die Rechte gingen an die Calix Limited Australia.

Bei »Solidia« wird vor allem Wollastonit (CaSiO₃) als Einsatzstoff genutzt, das mit CO₂ statt Wasser bei milden Bedingungen (Atmosphärendruck mit CO₂ und ca. 70 °C) zu Calciumcarbonat aushärtet. Wollastonit benötigt für seine Herstellung Energie und setzt dabei CO₂ frei. Deshalb weist der Gesamtprozess keine negative CO₂-Bilanz auf. Das CO₂-Einsparungspotenzial gegenüber Zementklinker liegt allerdings bei beachtlichen 60 % (Favier et al. 2018). Nachteilig wirken sich bei dieser Technologie die diffusionskontrollierten Reaktionen mit CO₂ aus, wodurch sich massive Bauteile bislang nicht herstellen lassen. Die Technologie eignet sich nur für den dünnwandigen Fertigteilbau.

Für »Celitement« dienen gelöschter Kalk (Ca(OH)₂) und Quarzsand als Ausgangsstoffe. Gelöschter Kalk als Einsatzstoff ist energetisch allerdings sehr ungünstig. Zudem benötigt die Technologie eine energieintensive mechanische Aktivierung als wichtigsten Prozessschritt, der industriell bislang noch nicht in großem Maßstab realisiert wurde. Das Potenzial zur Reduktion von CO₂ gegenüber Zementklinker dürfte dennoch bei 30 % liegen (Achternbosch 2018). Eine erste Produktionsanlage soll 2025 in Betrieb gehen.

Anwendung von Beton auf der Baustelle

Im Folgenden werden die mit dem Einsatz von konventionellem Beton verbundenen ökologischen Aspekte im Kontext Baustelle erörtert. Nach Errichtung eines Fundaments¹⁶⁷ (Bodenplatte) aus bewehrtem Beton erfordert die konventionelle Betonbauweise Schalungskonstruktionen für die Errichtung von Wänden und Decken. Die Schalungen werden mit Transportbeton verfüllt. Es lassen sich wiederverwendbare und Einmalschalungen unterscheiden. Letztere werden auch als verlorene Schalungen bezeichnet, da sie im Bauwerk verbleiben oder nach Einsatz als Abfall anfallen. Einfache Betonflächen werden in der Regel mit wiederverwendbaren Schalungselementen (Tafeln) gefertigt. Sie bestehen aus Holz, Kunststoff oder Metall. Für kleinere, in Einzelanfertigung hergestellte Schalungen für z. B. Fundamente, Aussparungen und Betonstützen werden hingegen verlorene Schalungen eingesetzt.

Für die herkömmliche Schalungskonstruktion werden Schalbretter, Schaltafeln und Kanthölzer verwendet. Bei der klassischen Lose-Kantholz-Schalung werden Bretter und Kanthölzer bei jedem Schalungsvorgang manuell zusammengesetzt und nach dem Ausschalvorgang wieder in ihre Einzelteile zerlegt. Der Verschleiß der Einzelteile ist bei dieser Methode gegenüber der Rahmen- bzw. Trägerschalung am größten. Die Anzahl möglicher Wiederverwendungen liegt bei der herkömmlichen Schalung zwischen 1 und 10. Beschichtete Holzplatten und Kunststofftafeln können 50-mal und mehr eingesetzt werden, bevor sie einer Entsorgung zugeführt werden müssen. Damit tragen Schalungskonstruktionen zu den Bauabfällen bei, allerdings ist ihr Anteil nicht bekannt.

Vor dem Verfüllen mit Beton müssen die Innenflächen der Schalung mit einem Trennmittel (Schalungsöl) ganzflächig eingeölt werden (10 bis 20 g/m²), um die Schalung nach dem Erstarren des Betons leicht und meist ohne Schäden wieder ablösen zu können (Hermann 1993). Überwiegend werden Mineral- und Pflanzenöle oder Wachse eingesetzt. Die Schalungstafeln müssen nach Gebrauch gereinigt werden. Die Inhaltsstoffe der Öle können Böden sowie Gewässer belasten. Viele moderne Produkte sind inzwischen jedoch biologisch abbaubar.

Größere Tafelteile und Bewehrungsstäbe und Matten aus Stahl werden auf der konventionellen Baustelle mit Kränen rangiert und platziert. Die Leistung eines elektrobetriebenen Baukrans liegt größenordnungsmäßig bei 50 kW (E.VITA 2017). Für die Rohbauphase eines Massivmehrfamilienhauses kann der Gesamtstrombedarf auf 500 kWh abgeschätzt werden. Der Beitrag der Kräne z. B. an der CO₂-Bilanz der gesamten Gebäudeerrichtung ist als niedrig einzuschätzen.

Die Schalungsteile müssen per Lkw vom Bauhof zur Baustelle an- und später wieder abtransportiert werden, wobei Treibstoffe verbraucht und Abgas- und Feinstaubemissionen verbunden sind. Auch der Transportbeton wird in Lkw-Betonmischern mit einem mittleren Transportvolumen von 7 m³ Frischbeton an die Baustelle angeliefert. Für ein Mehrfamilienhaus aus Beton mit einem umbauten Raum von z. B. 4.500 m³ werden 50 bis 60 Fuhren benötigt, wobei die Betonmischer die Strecke vom Betonwerk zur Baustelle und wieder zurückfahren müssen. Bislang sind die Fahrzeuge meist mit Dieselmotoren ausgestattet.¹⁶⁸ Neben Lärmemissionen ist somit auch die Betonanlieferung mit beträchtlichen Abgas- und Feinstaubemissionen verbunden.

Beton in der Nachnutzungsphase – die Verwertungsproblematik

In Hinblick auf die Forderungen aus dem deutschen Ressourceneffizienzprogramm und dem »Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa« (EK 2011) nach verbesserter Kreislauffähigkeit der Bauprodukte steht das konventionelle Bindemittel- und Betonsystem vor großen Herausforderungen. Eine qualitativ hochwertige Kreislaufführung ist mit dem herkömmlichen System derzeit nicht möglich. Betonbruch besteht aus groben Verbundkörpern aus Kies, Sand und Zementstein sowie feinem Betonsand. Da Gesteinskörnungen (Zuschlag) aus Altbeton nicht die gleichen betontechnischen Eigenschaften wie Kies und Sand aufweisen, ist ihr Anteil in Recyclingbetonen (RC), abhängig von deren vorgesehenen Exposition in der Umwelt, begrenzt (Stürmer/Kulle 2017). Betone hoher Festigkeit, wie sie für 3-D-Betone und Carbonbeton meist benötigt werden, dürfen überhaupt keinen Altbeton enthalten. Ferner scheint in der Praxis nur ein relativ kleiner Teil des von den Recyclingbetrieben aufbereiteten Altbetons von den Betonherstellern abgenommen zu werden (SCHWENK 2018), der Rest findet anderweitige Verwendung, wie z. B. für ungebundene Frostschutzschichten im Straßen- und Wegebau.

¹⁶⁷ Auch das Fundament ist mit einer Fundamentseitenschalung versehen, die im Boden verbleibt.

¹⁶⁸ Betonmischer mit Elektroantrieb befinden sich bereits im Marktantritt (Henßler 2020).

Bis vor Kurzem war der Nachweis der Umweltverträglichkeit der RC-Gesteinskörnungen aufwendig. So war bis Mitte 2017 eine Zulassung im Einzelfall oder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung notwendig; seither reicht eine freiwillige Herstellererklärung. Aufgrund der beschriebenen Hemmnisse bestanden bei Planer/innen sowie Bauherr/innen lange Zeit Vorbehalte, RC insbesondere im Hochbau einzusetzen. Die Vereinfachung der Zulassungsverfahren soll u. a. dazu beitragen, dass bei Neubauten der öffentlichen Hand verstärkt RC-Beton zum Einsatz kommt. Dennoch werden in Deutschland nur wenige Prozent des Betonschrotts nach der Behandlung in RC verwendet (SCHWENK 2018). Haupteinsatzgebiet ist nach wie vor die Verwendung in der Asphaltherstellung, was einem Downcycling gleichkommt. Die Herausforderung besteht darin, ein innovatives Betonsystem für den Massenmarkt zu entwickeln, das nach der Nutzungsphase wieder in den Herstellungsprozess des zementären Bindemittels zurückgeführt werden kann.

7.3.2 3-D-Beton

Herstellung

Die Entwicklung des 3-D-Betons baut auf dem derzeitigen Wissen zur Zement- und Betonchemie auf. Damit gelten die beschriebenen ökologischen Implikationen des herkömmlichen Betons (Kap. 7.3.1) grundsätzlich auch für den 3-D-Beton. Folglich sind insbesondere die aufgeführten Aspekte Klimaschutz und Ressourceneffizienz auch hier von hoher Relevanz. Die entscheidende Frage ist, ob spezifische Unterschiede zu herkömmlichem Beton bestehen, die den 3-D-Beton im Licht ökologischer Wirkungen besser oder ungünstiger erscheinen lassen. Obwohl keine ausreichenden Informationen über den 3-D-Betondruck vorliegen, um eine umfassende ökologische Analyse durchzuführen, lassen sich zumindest wichtige Teilaspekte des 3-D-Betondrucks auf der Basis der in der Literatur beschriebenen Betonrezepturen unter Umweltgesichtspunkten diskutieren.

Die Rezeptur des herkömmlichen Betons ist auf ein langsames Erstarren hin konzipiert (Kap. 4.2.2), um Rissbildungen, Spannungen und Volumenänderungen beim Erhärten zu minimieren. Betonmischungen, die für den 3-D-Druck geeignet sind, müssen hingegen meist deutlich schneller verfestigen. Das stellt den Beton bekannter Grundkonzeption vor große Herausforderungen und ist derzeit nur möglich, indem Nachteile in Bezug auf Nachhaltigkeitsaspekte in Kauf genommen werden. In der 3-D-Betontechnologie werden bevorzugt Hochleistungszemente hoher Festigkeitsklasse (52,5) eingesetzt. Aufgrund der hohen Mahlfineinheit dieser Zemente ist ihre Herstellung gegenüber den Zementen niedriger Festigkeitsklassen mit einem höheren maschinellen und energetischen Aufwand verbunden.¹⁶⁹ Dies wirkt sich ungünstig auf die CO₂-Bilanz von 3-D-Beton aus, insbesondere im Falle der Verwendung von Portlandzement (CEM I), und steht im Gegensatz zu Bestrebungen, nachhaltige, CO₂-arme Betone bei guter Dauerhaftigkeit zu entwickeln.¹⁷⁰

Aufgrund ihrer Feinkörnigkeit benötigen die meisten 3-D-Betone verstärkt Sand bzw. Kies niedriger Körnung als Zuschlag. Sand ist nach Wasser eine der am meisten verwendeten Ressourcen der modernen Gesellschaft. Natürlicher Sand und feinkörniger Kies, die sich aufgrund der Oberflächeneigenschaften als Baustoffe eignen, sind Materialien, bei denen zukünftig Engpässe bei der Gewinnung erwartet werden (Knoke 2016). Je höher die Anforderungen an Betone sind, desto höher sind auch die Qualitätsanforderungen an den Sand. Der Sandabbau mit Saugbaggern erzeugt in manchen Küstenregionen tiefe Löcher am Meeresgrund, trägt Sediment durch Verwirbelung in die Umgebung und begräbt viele Bodenlebewesen unter sich. Am Ende leidet das ganze Ökosystem, weshalb z. B. Fischpopulationen abwandern oder Küsten erodieren. Mörtelartige 3-D-Betone werden das Verknappen von Sand sowie die ökologischen Folgeprobleme des Ressourcenabbaus noch verschärfen. Vieles weist zudem darauf hin, dass sich die Anforderungen an den 3-D-Druck auf der Basis des derzeitigen Wissens zur Zement- und Betonchemie neben hohen Gehalten an Zementen nur mit chemischen Zusatzmitteln¹⁷¹ erreichen lassen, um die Erhärtung des Betons zu beschleunigen (Oberti/Plantamura 2015). Das Umweltbundesamt (UBA

¹⁶⁹ <https://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Beton> (12.3.2021)

¹⁷⁰ Zwar wird auch versucht, hochfeste CEM II-Zemente einzusetzen, die Zementklinker durch reaktive Zementersatzstoffe substituieren, deren Verfügbarkeit jedoch wie gezeigt begrenzt ist (Kap. 7.3.1). Ob sich solche Betone auch für 3-D-Anwendungen eignen, ist näher zu untersuchen. Klinkerersatz- und Betonzusatzstoffe wie Flugasche und Silikagel wirken sich auf die Festigkeitsentwicklung und Dauerhaftigkeit der Betone aus (Dehn et al. 2020).

¹⁷¹ Nach Umweltdeklarationserklärungen (EPD) enthalten Beschleuniger Aluminiumsulfat, Aluminate, Salze der Ameisen- und Zitronensäure, Ethanolamin, organische Säuren und andere Stoffe als Hauptbestandteile.

2018b, S. 33) verweist in seiner Studie darauf, dass über die Umweltwirkungen der verwendeten Zusatzmittel wenig bekannt ist. Grundsätzlich könnten Schadstoffbelastungen in Innenräumen auftreten.

Anwendung

Auch beim 3-D-Betondruck eines Gebäudes dürfte das Fundament konventionell mit Transportbeton gegossen werden. In diesem Punkt gibt es keine Unterschiede zwischen der 3-D- und der konventionellen Technologie. Der damit verbundene Ressourcenaufwand und die mit dem Transport verbundenen Emissionen sind identisch. Da die Verwendung von konventionellen Betonfertigteilen für Decken mittelfristig die bevorzugte Bauweise sein dürfte, gleichen auch die diesbezüglichen Umweltauswirkungen des 3-D-Druck denen des konventionellen Betonbaus. Hier ist insbesondere der Antransport von Betonfertigteilen mit seinen Emissionen zu berücksichtigen. Hinzu kommt, dass wahrscheinlich auch beim 3-D-Druck für Fenster und Türen eine Schalung oder Rahmung benötigt wird, wobei nicht beantwortet werden kann, ob es sich in diesen Fällen um Einzelschalungen oder wiederverwendbare Schalungen handelt. Einzig für die Konstruktion der Wände wird beim Druckverfahren im Unterschied zur konventionellen Bauweise keine Schalung benötigt, was entsprechend positiv in die Umweltbilanz einfließt (keine Transportemissionen und Umweltbelastungen durch Schalungsöle).

Im Mittelpunkt des 3-D-Prozesses steht die Errichtung der Wände. Hierfür wird ein Manipulator benötigt (Kap. 4.2.3), der den Druckkopf entlang der Druckpfade bewegt, um das zu errichtende Gebäude aufzubauen. Seine Höhe muss das zu bauende Gebäude übertreffen. In Pilotprojekten werden häufig Portalkräne eingesetzt, die sich auf Schienen bewegen. Die dafür benötigten Teile müssen per Lkw zur Baustelle hin- und später wieder abtransportiert werden. Ist die 3-D-Technologie nicht in der Region etabliert, entstehen aufgrund langer Anfahrtswege entsprechende Transportemissionen. Vor Ort muss der Boden um das Gebäude abgetragen und das Gelände nivelliert werden, wofür dieselbetriebene Baumaschinen eingesetzt werden. Der Portalkran wird aus Einzelteilen zusammengefügt, wofür Kräne benötigt werden.

Danach muss der 3-D-Beton per Lkw angeliefert werden. Inwieweit die im 3-D-Druck benötigte Menge an Beton von der konventionellen Bauweise (und damit deren Transportemissionen) abweicht, kann derzeit nicht konkret beantwortet werden. Der 3-D-Druck setzt Beton höherer Festigkeit ein. Zum Erreichen gleicher Festigkeit wird deshalb theoretisch eine geringere Menge an 3-D-Beton benötigt, was schlankere Strukturen impliziert und mit einer Ressourceneinsparung einhergehen würde. Ob schlankere 3-D-Konstruktionen realistisch sind und irgendwann eine Zulassung erfahren, lässt sich aktuell nicht beantworten. Zu berücksichtigen ist dabei auch, dass bei der Berechnung der Statik große Sicherheitsmargen eingerechnet werden. Ein günstigerer Ressourcenverbrauch ist bei der Realisierung komplexer Geometrien zu erwarten, die mit additiven Verfahren einfacher umzusetzen sind.

Der schichtweise Aufbau der Wand erfolgt mit dem bewegten Druckkopf des Manipulators. Elektrische Pumpen transportieren den 3-D-Frischbeton zur Düse, deren Strombedarf in der Gesamtbilanz als gering anzusehen ist. Ähnliches ist auch für den Strombedarf des Manipulators anzunehmen. Zudem werden sowohl für die Errichtung des Manipulators wie voraussichtlich auch für die Deckenkonstruktionen Kräne benötigt, deren Einsatz ebenfalls mit einem Energiebedarf verbunden ist. Inwieweit der Energieeinsatz für Kräne sich für die beiden Bauweisen unterscheidet, kann nicht beantwortet werden. In beiden Fällen ist der Energiebedarf als gering anzusehen.

Insgesamt lässt sich die Frage, inwieweit die technische 3-D-Anwendung auf der Baustelle ökologische Vorteile bringt, nur ganz grob abschätzen. Zwar fallen bei der Errichtung der Wände keine mit der Schalung verbundenen Umweltbelastungen an (Abfallaufkommen verschleißender Schalungselemente, Boden- und Wasserkontaminationen durch das Schalungsöl), dafür müssen beim 3-D-Betonbau die überdimensionierten Manipulorkonstruktionen an- und abtransportiert und Kräne zum Aufbau verwendet werden.¹⁷² Gegenüber dem konventionellen Bauen sind deshalb keine großen Unterschiede an Energiebedarf und Abgasemissionen zu erwarten. Solange auch die Betondecken konventionell errichtet werden müssen, gilt dies umso mehr.

¹⁷² Inwieweit sich einfachere Manipulatorsysteme entwickeln lassen, die so robust sind, dass sie den Umweltbedingungen auf der Baustelle genügen, lässt sich derzeit nicht beantworten.

Alternative Bewehrungen für 3-D-Betonstrukturen – der Werkstoff Carbon

Aufgrund herausragender Eigenschaften werden carbonfaserhaltige Betone als eine ernstzunehmende Alternative zu Stahlbeton angesehen (Forschungskuratorium Textil 2014) und auch in additiven Fertigungsverfahren erprobt (Kap. 4.2.4). Wegen der herausragenden Bedeutung von Carbonfasern (CF, meist nur als Carbon bezeichnet) beschränkt sich die Diskussion der mit dem Einsatz von Faserverbundwerkstoffen verbundenen ökologischen Aspekte auf diesen Werkstoff. Von Interesse ist, welche Umweltauswirkungen mit der Herstellung, dem Einsatz und der Entsorgung von Carbonfasern verbunden sind.

Carbonfasern werden überwiegend aus Polyacrylnitrilfasern hergestellt. Die Herstellung dieser Fasern ist aufwendig und extrem energieintensiv. Für den Primärenergieverbrauch werden Werte zwischen 326 bis 583 MJ/kg CF und für die Treibhausgasemission bei der Produktion 17,4 bis 34,5 kg CO₂-Äq./kg CF angegeben (Hohmann 2019). Dies ist eine deutlich höhere Emission als bei der Produktion von Bewehrungsstahl (0,745 kg CO₂-Äq./kg).¹⁷³ Ferner ist zu berücksichtigen, dass die derzeitigen Synthesestrategien komplett auf fossilen Rohstoffen (Erdöl) basieren.¹⁷⁴

Da der Einsatz von Carbonfasern im Kontext von 3-D-Beton (Kap. 4.2.4) erst am Anfang der Entwicklung steht, konzentriert sich die Diskussion ökologischer Aspekte auf den konventionell hergestellten Carbonbeton, da davon auszugehen ist, dass sich die beiden Bauarten diesbezüglich nicht wesentlich unterscheiden. Derzeit stellt Carbonbeton ein absolutes Nischenprodukt dar. Schätzungsweise 5 % der Weltbedarfsmenge (84.500 t/a) an Carbon wurden im Jahr 2019 (Horstmann 2018; Sauer 2019) *global* im Bauwesen eingesetzt, in Deutschland sind es ca. 400 t jährlich (LAGA 2019). Die eingesetzten Mengen an Baustahl sind wesentlich größer: Allein in Deutschland werden jährlich ca. 15 Mio. t Baustahl verwendet, für die EU28-Länder sind dies ca. 62 Mio. t.

Die Eigenschaften von Stahl und Carbon sind allerdings sehr unterschiedlich. Bezogen auf gleiche funktionale Eigenschaften, wie z. B. die Zugfestigkeit, entspricht 1 kg Stahl theoretisch 0,017 bis 0,05 kg CF (Kurath 2019; Sydow et al. 2019). Carbon weist zudem aufgrund des niedrigen spezifischen Gewichts (1,8 t/m³) gegenüber Stahl (8 t/m³) große Gewichtsvorteile auf. Diese Eigenschaften haben zur Folge, dass theoretisch schlankere Strukturen realisiert werden können. In den Medien werden Materialeinsparpotenziale von bis zu 80 % in Aussicht gestellt.¹⁷⁵ Sollten diese Angaben stimmen, ließe sich die Einsatzmenge von Beton massiv reduzieren und Ressourcen an endlichen und knappen Ressourcen wie Kalkstein, Sand und Kies deutlich schonen. Ein Pilotprojekt in Albstadt (Baden-Württemberg) gibt erste Hinweise in diese Richtung (Rempel/Kulas 2017). Bei einer dort errichteten Fußgängerbrücke aus Carbonbeton sollen laut Angaben der Technischen Universität Dresden im Vergleich zu einer entsprechenden Ausführung aus Stahlbeton ca. 68 % an Beton¹⁷⁶ eingespart worden sein (BMBF 2020b). Bei der Bewehrung wurde angegeben, dass 210 kg CF 2.650 kg Bewehrungsstahl ersetzt haben. Insgesamt sollen bei der Herstellung der Carbonbetonbrücke der Energieverbrauch um 50 %, die CO₂-Emissionen um 30 % reduziert worden sein (im Vergleich zur herkömmlichen Bauweise). Leider liegen keine näheren Informationen zu diesem ökobilanziellen Vergleich vor, sodass sich die Ergebnisse nicht ohne Weiteres nachvollziehen lassen. Insgesamt besteht also Bedarf an weitergehenden Untersuchungen zur Frage, in welchem Umfang durch den Einsatz von Carbonbeton Materialeinsparungen für Konstruktionen im Wohnungsbau möglich sind.

Die Entsorgung von Carbonfasern und carbonfaserhaltigen Verbundstoffen stellt die Abfallwirtschaft vor große Herausforderungen, wie die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA 2019) in ihrem Bericht andeutet. Schätzungen zufolge werden schon bei der Herstellung von Carbonfasern zwischen 10 und 30 Massenprozent Abfälle produziert, die sich nicht mehr direkt wieder im Herstellungsprozess einsetzen lassen (Faulstich et al. 2016). Es zeichnet sich bislang kein Weg ab, wie das Material sinnvoll und schadlos verwertet oder beseitigt werden kann (LAGA 2019). Textile aus Carbonfasern werden zu Kurzfasern verarbeitet. Allerdings ist der Markt für Sekundärprodukte schwierig (LAGA 2019), zudem ist das Aufarbeiten von carbonfaserhaltigen Verbundwerkstoffen sehr aufwendig. Da bei den üblichen Temperaturen und Verweildauern in Müllverbrennungsanlagen (MVA) Carbonfasern nicht komplett zerstört werden, nehmen die Betreiber von MVA z. B. keine Carbonfasern

¹⁷³ <https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082&version=20.17.009> (12.3.2021)

¹⁷⁴ Am Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP werden Ausgangsverbindungen für CF aus nachwachsenden Rohstoffen entwickelt, was große Herausforderungen mit sich bringt (Fraunhofer IAP 2019).

¹⁷⁵ <https://www.bauen-neu-denken.de/stoffkreislauf-carbonbeton/> (12.3.2021)

¹⁷⁶ Allerdings wurde ein hochfester Nischenbeton der Festigkeitsklasse C 70/85 verwendet, der nicht mit herkömmlichen Betonen vergleichbar ist.

und carbonfaserverstärkten kunststoffhaltigen Materialien an (Neuner/Dusold 2019). Elektrisch leitfähige Fasern können in den Elektrofiltern der Abgasreinigung, Kurzschlüsse verursachen, was zum Ausfallen der Filter führen kann. In diesen Fällen muss die komplette Anlage heruntergefahren werden.

Zum Rückbau von Gebäuden aus Carbonbeton und zur Aufbereitung von Betonbruch ist unter großtechnischen Rahmenbedingungen wenig bekannt. Hier existieren nur erste Erfahrungen in wissenschaftlich durchgeführten Demonstrationsversuchen (Kopf/Kortmann 2018). Die Trennung von Beton und Carbonbewehrung erfolgt mit gängigen Aufbereitungstechniken wie Brechen und Zerkleinern. Es ist davon auszugehen, dass in der Betonfraktion ein Teil der Fasern verbleibt. Nach Ansicht der LAGA (2019, S. 21) haben »Techniken und Verfahren zur sortenreinen Trennung der Carbonfaserbewehrung von der Betonmatrix mit dem Ziel einer hochwertigen und schadlosen Verwertung sich noch nicht ausreichend in großtechnischem Maßstab etabliert«. Inwieweit auch eine Separierung von Fasern ohne unerwünschte Verteilung dieser Stoffe in die einzelnen Verwertungsstoffströme überhaupt möglich ist, ist noch offen. Der Einsatz von Carbonbeton ist der LAGA (2019, S. 21) zufolge nur vertretbar, »wenn die gesundheitliche Unbedenklichkeit nachgewiesen ist und die Frage der Entsorgung geklärt ist«.

Für den 3-D-Betondruck lässt sich somit aus der ökologischen Perspektive folgendes Fazit ziehen: Da der druckbare Beton auf dem herkömmlichen Beton aufbaut, übernimmt er damit dessen massive klimarelevanten und kreislaufwirtschaftlichen Probleme. Aufgrund der hohen technischen Anforderungen an den 3-D-Beton sind die derzeitigen Mischungszusammensetzungen ökologisch sogar als noch ungünstiger einzustufen und insbesondere die als innovatives Bewehrungsmaterial favorisierten Carbonfasern führen einen gewaltigen ökologischen Rucksack mit sich. Zwar gibt es Hinweise, dass das Substitut Carbon zu Materialeinsparungen bei Stahl und Beton führen kann. Doch zur Beantwortung der Frage, wie sich dies konkret auf die ökologische Gesamtbilanz auswirkt, sind weitergehende Untersuchungen notwendig.

7.4 Modulares und serielles Bauen

Dem modularen Bauen werden positive Effekte in Bezug auf Nachhaltigkeit nachgesagt (z. B. Ackerstaff 2019). Hier stehen neben dem Klimaschutz besonders die effiziente Ressourcennutzung und die Kreislauffähigkeit der eingesetzten Fertigteile/Module sowie der verwendeten Materialien im Vordergrund.

Fertigteile und (Raum-)Module sollten so konzipiert und gefertigt werden, dass eine Mehrfachnutzung des Gebäudes bzw. der Module möglich ist. Modular aufgebaute Gebäude können nach der Nutzungsphase in Einzelmodule demontiert und in einem geänderten Arrangement neu zusammengefügt werden – entweder am gleichen oder an einem anderen Ort. Beispielsweise sind freitragende Stahlskelettstrukturen mit nichttragenden Innenwänden sehr flexibel und können bei entsprechend veränderten Anforderungen umgestaltet, vergrößert, verkleinert oder umgesetzt werden (Purkus et al. 2020). Auf diese Weise lassen sich Ressourcen einsparen, da durch Umnutzung bestehender Gebäude Neubauten vermieden werden können. Erfolgt die Umnutzung an ein und demselben Ort, kann damit auch die Flächeninanspruchnahme durch Neubauten verringert werden. Der hohe Vorfertigungsgrad der Module hat zudem eine Entlastung der Umwelt zur Folge, da Staub, Lärm und Abfälle auf der Baustelle auf ein Minimum reduziert werden können. Nach Angaben von Modulbauherstellern können der Baustellenverkehr um 20 % und Lärm und Baustaub um bis zu 50 % reduziert werden.¹⁷⁷

Bislang konzentrierte sich die Gebäudeoptimierung auf einen möglichst geringen Energiebedarf und damit auf niedrige CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase. Dies zeigen die Novellierungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) eindrucksvoll. Nach der Einführung von Standards zu Niedrigstenergiehäusern (Passivhausstandard, Nullenergiehaus und Plusenergiehaus) rückt nun zunehmend das Einsparpotenzial bei der Herstellung und Instandhaltung des Gebäudes in den Blickpunkt. Dies ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass bei der Herstellung traditioneller mineralischer Baustoffe wie Beton, Porenbeton oder Ziegeln in großem Maße endliche rohstoffliche Ressourcen und fossile Energieträger eingesetzt werden (Kap. 7.3.1). In einem Forschungsprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt konnte gezeigt werden, dass bei einem Mehrfamilienpassivhaus 50 % des Primärenergieverbrauchs und damit auch der Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus betrachtet auf die Herstellung und Instandsetzung des Gebäudes entfallen können (Kaufmann et al. 2017). Deshalb rücken die Bauweise und die verwendeten Bauprodukte zunehmend in den Fokus.

¹⁷⁷ <https://www.alho.com/de/modulbau/nachhaltiges-bauen/> (12.3.2021)

Im modernen Modulbau wird oft die Hybridbauweise eingesetzt, bei der verschiedene Materialien kombiniert werden (Kap. 5.3). Dies erlaubt es, die unterschiedlichen Vorteile der verschiedenen Baustoffe optimal zu nutzen (Mechtcherine 2019, S. 142 f.). Einsparungen von Materialien und damit auch Ressourcen sind bei optimierten Werkstoffkombinationen möglich, lassen sich aber nicht verallgemeinern und quantifizieren. Es existieren Modulhersteller, die den Einsatz sortenreiner Materialien anstreben (über 96 % der eingesetzten Materialien sind in den Wertstoffkreislauf rückführbar).¹⁷⁸ Hier geht es z. B. um die Vermeidung von Verbundstoffen, um die Reduktion von Produktionsabfällen und eine Rückführung in den Wertstoffkreislauf sowie um die Implementierung energieeffizienter Fertigungsmethoden. Gegenüber dem konventionellen Bauen soll sich der Ressourceneinsatz um 36 % und der Abfall um 70 % reduzieren lassen.¹⁷⁹ Als Beispiel für ein auf Mehrfachnutzung konzipiertes und damit ressourceneffizient errichtetes Gebäude kann ein dreigeschossiges Bürogebäude in Modulbauweise im Olympiapark München aufgeführt werden, das komplett zurückgebaut und in seine Werkstoffe zerlegt werden konnte (Heinkel Modulbau 2020).

Die Vermeidung von Bauabfällen ist deshalb von Bedeutung, da diese eine niedrige Recyclingquote aufweisen. Nach Angaben des Zentralverbands Deutsches Baugewerbe e. V. wurden im Jahr 2016 von 14,1 Mio. t anfallenden Baustellenabfällen nur 1,6 % recycelt (BBS 2018; Purkus et al. 2020). Ein abfallschonender Modulbau kann somit seinen spezifischen Beitrag leisten, diese Abfälle zu verringern. Die Recyclingfähigkeit vollausgestatteter Raumzellen hängt von der Trennbarkeit und Umweltverträglichkeit der verwendeten Materialien ab (Langenberg 2012). Damit kommt den Füge- und Montagetechniken der Module eine besondere Bedeutung zu. Diese sind so zu konzipieren, dass sie einen materialverlustfreien Rückbau und damit eine Wiederverwendung der Bauteile erlauben (Dutczak 2018). Beschädigte Raummodule können meist nur als Ganzes ersetzt werden. Dies gilt insbesondere für Betonfertigteile und Module, die aus einem spröden Material bestehen.

Für den ökologischen Fußabdruck des Modulbaus ist entscheidend, welche Baustoffe eingesetzt werden. So stehen etwa zum Betonfertigteilbau Umweltproduktdeklarationen (EPDs)¹⁸⁰ und Ökobilanzdaten in der »ÖKO-BAUDAT« für Betonfertigteile zur Verfügung, die vom Rohstoffabbau bis zum Ausgangstor des Fertigteilwerks den gesamten Herstellungsprozess umfassen (allerdings ist der spezifische Energiebedarf der internen Fertigungsprozesse nicht separat dokumentiert). Aus den Daten lässt sich ablesen, dass die ausgewiesenen Primärenergieverbräuche und Treibhausgasemissionen maßgeblich durch den verwendeten Zement und den Bewehrungsstahl bestimmt werden. Damit gelten für Betonfertigteile all die klima- und ressourcenrelevanten Aspekte des herkömmlichen Zements, wie sie in Kapitel 7.3.1 detailliert diskutiert wurden. Weiter ist im ökologischen Sinne als nachteilig anzusehen, dass im Fertigteilbau die Materialanforderungen an den Beton gestiegen sind und immer komplexere Betonrezepte Verwendung finden (Mechtcherine 2019, S. 116). Zahlreiche Zusatzstoffe und -mittel haben tendenziell negative ökologische Auswirkungen und können auch die Recyclingfähigkeit von Altbeton ungünstig beeinflussen.

Im Gegensatz dazu verspricht der Modulbau insbesondere bei Einsatz des nachwachsenden Baustoffs Holz große ökologische Vorteile, weshalb der Holzmodulbau in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen dürfte. Aus diesem Grund werden die ökologischen Vorteile des Baustoffes Holz im Folgenden genauer beleuchtet.

Holz als Baustoff

Angesichts der Tatsache, dass die Bauwirtschaft zu den ressourcenintensivsten Wirtschaftszweigen gehört, sind die Dekarbonisierung und die Ressourceneffizienz der Bauindustrie politische Ziele geworden. Das Bauen mit Holz stellt in diesem Zusammenhang eines der prioritären politischen Handlungsfelder dar (siehe etwa die vom BMEL 2017 initiierte und koordinierte »Charta für Holz 2.0«), da davon größere Beiträge zum Klimaschutz und zur Ressourceneffizienz erwartet werden (BMEL 2018). Für die Klimawirkung von Holz im Bauwesen sind zwei Aspekte relevant (Kaufmann et al. 2017, S. 24 ff.):

- › das Gebäude als Kohlenstoffspeicher,
- › die Substitution endlicher Ressourcen.

Der verstärkte Einsatz von Holz und Holzwerkstoffen im Bauwesen kann wesentlich dazu beitragen, die CO₂-Emissionen im Bausektor langfristig zu vermindern (WBW 2018). So können dadurch mineralische Baustoffe

¹⁷⁸ <https://www.kleusberg.de/de/modulare-bauen/bauen-mit-kleusberg/nachhaltigkeit> (12.3.2021)

¹⁷⁹ <https://www.alho.com/de/modulbau/nachhaltiges-bauen/> (12.3.2021)

¹⁸⁰ <https://ibu-epd.com/veroeffentlichte-epds/> (12.3.2021)

wie Beton substituiert werden, deren Herstellung mit der Freisetzung erheblicher Mengen an CO₂ verbunden ist. Zudem fixiert das im Gebäude verbaute Holz den eingebrachten Kohlenstoff über die Lebensdauer des Gebäudes und stellt einen temporären Kohlenstoffspeicher dar (Purkus et al. 2020). Die Freisetzung des Kohlenstoffs wird so lange verzögert, bis das verbaute Holz nach Rückbau entsorgt wird. Bei einer energetischen Verwertung des Holzes kommt es zur Freisetzung des Kohlenstoffs. Die Nutzungsdauer der Holzprodukte bestimmt somit die temporäre Speicherwirkung des Kohlenstoffs.

Die in Gebäuden gespeicherte Kohlenstoffmenge lässt sich im Rahmen einer Ökobilanzierung abschätzen. Der bei der Errichtung des Gebäudes verbaute Kohlenstoff wird mit negativem Vorzeichen angerechnet (Kaufmann et al. 2017). Der Rückbau von Gebäuden führt zur Auflösung des Kohlenstoffspeichers. Bei einer thermischen Verwertung des Holzes werden die Emissionen an Treibhausgasen positiv berechnet. Die negative Anrechnung in der Herstellung und die Berechnung der Treibhausgasemissionen bei der Entsorgung gleichen sich somit aus. In diesem Kontext spricht man oft vereinfachend von der Klimaneutralität der nachwachsenden Rohstoffe.¹⁸¹ Listen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geben Auskunft, welche Kohlenstoffmengen in ausgewählten Holzprodukten gespeichert sind (UBA 2020a). In erster Näherung kann von 225 kg Kohlenstoff/m³ Holz (bezogen auf einer Rohdichte von 450 kg Trockenmasse) ausgegangen werden (Kaufmann et al. 2017, S. 24 f.). Die Umrechnung des gespeicherten Kohlenstoffs in CO₂ erfolgt gemäß DIN EN 16449. Die CO₂-Speicherwirkung der stofflich genutzten Holzprodukte, die in Deutschland aus inländischem Einschlag produziert werden, beträgt derzeit jährlich ca. 3 Mio. t (UBA 2021).

2018 wurden in Deutschland 18.501 neue Ein- und Zweifamilienhäuser aus Holz fertiggestellt (Statistisches Bundesamt 2020c), wovon ca. 85 % in Fertigbauweise errichtet sein dürften (Statistisches Bundesamt 2019b). Das bedeutet einen Zuwachs von ca. 24 % gegenüber 2012 mit einer durchschnittlichen jährlichen Zuwachsrate von 3,7 %. Die im Modul- und Fertigteilbau 2018 eingebaute Holzmenge kann auf der Basis von Daten des Thünen-Instituts (Weimar/Jochem 2013) grob auf ca. 1,9 Mio. m³ abgeschätzt werden. Darin sind größenordnungsmäßig 0,48 Mio. t Kohlenstoff enthalten. Weite Transportwege wirken sich aufgrund der eingesetzten fossilen Energieträger ungünstig auf die Energiebilanz aus. Aus diesem Grund sollte das verbaute Holz möglichst aus der Region stammen.

Vergleiche zwischen Gebäuden in konventioneller (mineralischer) Bauweise, die Bauprodukte aus endlichen Ressourcen enthalten, und Gebäuden mit einem hohen Anteil an Bauprodukten aus nachwachsenden Rohstoffen weisen erhebliche ökologische Vorteile der Holzbauweise auf (Kaufmann et al. 2017; König o. J.). Wie Modellierungen zeigen, lassen sich durch Holzbauweise bei Ein- und Zweifamilienhäusern Einsparungen an Treibhausgasen pro m² Bruttogrundfläche zwischen 77 und 207 kg CO₂-Äq. und bei Mehrfamilienhäusern zwischen 18 und 178 kg CO₂-Äq. erreichen (Hafner et al. 2017, S. 60). Konstruktive Teile und Tragwerke benötigen dabei größere Mengen an Holz als Fassaden (Kaufmann et al. 2017), da die Dämmung bei möglichst geringer Fassadenstärke große Bedeutung hat und somit die verbaute Holzmenge in der Fassade eher gering ist. Innenwände oder Decken aus Massivholz bieten somit das größte Potenzial für eine hohe Kohlenstoffspeicherung.

Steigert man in Deutschland die Holzbauquote bei Ein- und Zweifamilienhäusern bis 2030 auf 55 % und bei Mehrfamilienhäusern auf 15 % – in Anlehnung an die Holzbauquoten in Schweden –, ergibt sich von 2016 bis 2030 rechnerisch ein Einsparpotenzial an Treibhausgasemissionen in einer Höhe von fast 12 Mio. t CO₂-Äq. (Purkus et al. 2020). Das Bauen mit Holz kann somit eine klimaverträgliche Option für den Wohnungsbau darstellen. Voraussetzung dafür ist jedoch eine entsprechende Verfügbarkeit des Rohstoffes (Kasten 7.2).

Kasten 7.2 Verwendung und Verfügbarkeit von Holz in Deutschland

Deutschland hat nach Österreich mit durchschnittlich 336 m³/ha Landfläche die höchsten Holzvorräte in der EU (Kaufmann et al. 2017). Gemäß der letzten Kohlenstoffinventur von 2017 bestehen 32 % der Landesfläche in Deutschland aus Wald, was einer Waldfläche von 11,4 Mio. ha entspricht (Riedel/Hennig 2019; Schmitz 2019). 2017 befand sich der Holzvorrat mit insgesamt 3,9 Mrd. m³ (Vorratsfestmeter) auf Rekordhöhe (Hennig et al. 2019). Im Vergleich zu 2012 war eine Steigerung um 6 % (220 Mio. m³) zu verzeichnen. Der Zuwachs lag bei allen Nadel- und Laubbäumen über dem Abgang: Insgesamt betrachtet beliefen sich Holznutzung und

¹⁸¹ Bei näherer Betrachtung der Prozessketten lassen sich meist sekundäre Prozesse (z. B. Behandlungsmaßnahmen, Transport, Bereitstellung der Infrastruktur) identifizieren, die zusätzlich Energie benötigen und in vielen Fällen durch nichtregenerative Energieträger gedeckt werden. Diese sekundären Effekte fließen jedoch meist nicht in die Bilanzierung mit ein.

natürliches Absterben von Bäumen im Zeitraum von 2012 bis 2017 auf 76 % des Zuwachses, der 168 Mio. m³ entsprach (Hennig et al. 2019). Auch die Totholz mengen sowie die CO₂-Speicherung der Wälder haben zugenommen (Schmitz 2019).

2016 wurden in Deutschland 66,7 Mio. m³ Waldholz (Derbholz) verwendet.¹⁸² Da etwas mehr Derbholz importiert als exportiert wurde und die Lager leicht abgebaut wurden, ergibt sich ein Volumen von 62,5 Mio. m³, das dem Wald in Deutschland jährlich entnommen wurde. Davon waren ca. 44 Mio. m³ Nadelhölzer (Mantau o.J.). Allerdings ist im Zeitraum von 2012 bis 2017 die Nutzung von Fichtenholz zurückgegangen (Hennig et al. 2019). Dies wurde durch eine Steigerung von Importholz ausgeglichen. Von 2013 bis 2017 wurden jährlich 5,5 Mio. m³ Nadelrohholz eingeführt (Schmitz 2019). Seit 2017 ist ein hoher Anfall von Kalamitätsholz zu verzeichnen, was eine Trendwende hin zu einem Nettoexport von Nadelholz bewirken könnte. Der gesamte Holzverbrauch an Wald-, Rest und Recyclingholz stieg zwischen 1990 und 2016 von 64,8 Mio. m³ auf ca. 127,4 Mio. m³. Inzwischen liegen stoffliche und energetische Holzverwendung mit jeweils knapp 65 Mio. m³ auf etwa gleichem Niveau.

Um die Verfügbarkeit von Holz abzuschätzen, ist zu berücksichtigen, dass der Wald unter Nachhaltigkeitsbedingungen nach unterschiedlichen Zielsetzungen bewirtschaftet werden kann. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Frage, ob das Holzlager im Wald zukünftig stärker genutzt oder erhöht werden soll. Auf der Grundlage der Waldinventuren ermittelt die Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung (WEHAM) das Rohholzpotenzial für die nächsten 4 Jahrzehnte. Danach ist im Szenario, das den Naturschutz in den Fokus stellt (maximale Ernte 78 Mio. m³/a), mit derzeit ca. 62 Mio. m³/a Derbholzentnahme die Obergrenze schon zu ca. 80 % erreicht. Dagegen kann in dem Szenario, das die Holznutzung in den Vordergrund stellt (maximale Ernte 104 Mio. m³/a), die Nutzung noch um 68 % gesteigert werden.

Als ein realistisches maximales Nutzungsszenario für die Zukunft wird von Hafner et al. (2017) ein baubedingter Mehrbedarf an Holz bis 2030 angenommen, der einer Holzbauquote bei Ein- und Zweifamilienhäusern von 55 % und bei Mehrfamilienhäusern von 15 % entspricht. Dieses Szenario dient dem Wissenschaftlichen Beirat für Waldpolitik als Grundlage für die Abschätzung eines verstärkten Holzbedarfs für den konstruktiven Holzbau auf Basis der zukünftig zu erwartenden Rohholzvorkommen (WBW 2018). Der zusätzliche jährliche Bedarf an Rohholz beträgt danach im Mittel 1,9 Mio. m³, was nach Hafner et al. ca. 4 % des rechnerischen jährlichen Gesamtverbrauchs an Rohholz für Schnittholz und Holzwerkstoffen entsprechen würde (Hafner et al. 2017; Purkus et al. 2020). Nach einer anderen Modellrechnung könnte mit einem Drittel der nachhaltigen Jahresholzernte in Deutschland theoretisch das gesamte Neubausvolumen (Wohn- und Nichtwohngebäude) aus Holz errichtet werden (Kaufmann et al. 2017). Damit steht eigentlich genügend Holz für einen verstärkten Holzmodulbau zur Verfügung.

Allerdings ergeben sich Unsicherheiten hinsichtlich der weiteren Waldentwicklung aufgrund des Klimawandels. In den letzten Jahren führten Stürme, Dürre und Borkenkäferbefall zu Waldschäden in erheblichem Umfang. Auf der Basis von Daten für 2018 und 2019 geht das BMEL für 2020 von einem Schadholzanfall von 160 Mio. m³ aus (BMEL 2020). Zur Wiederbewaldung muss eine Fläche von 245.000 ha bepflanzt werden. Bislang zeichnen sich klimagerechte und standortangepasste Mischwaldkonzepte hin zu naturnahen und stabilen Waldbeständen durch eine Vielfalt von Baumarten, mehr Laubbäumen und zunehmende Totholzanteile aus. Aufgrund dieser Konzepte wird prognostiziert, dass das Rohholzpotenzial der wichtigsten Bauholzart Fichte von aktuell ca. 44 % bis 2027 auf 35 % zurückgehen könnte (Kaufmann et al. 2017). Als alternative Nadelholzarten sind Kiefer und Douglasie vorgesehen. Der Schwerpunkt für die Umgestaltung der Waldbestände liegt bei der Buche (Zunahme um 59 %) und der Eiche (97 %). Der Anteil von Nadelbäumen liegt heute bei 54 %, bei nachgeforsteten Bäumen bis 4 m Höhe jedoch nur noch bei 27 %.

Die Entwicklung weg von Nadelbaumreinbeständen hin zu standortgerechten, strukturreichen Mischwäldern soll zukünftig zwar die Anpassung an den Klimawandel fördern und die Wälder robuster machen, bedeutet aber langfristig eine Verknappung der für den Holzbau hochwertigen Ressource Nadelholz. Die zukünftige Verfügbarkeit von Holz im Baugewerbe wird u. a. auch davon abhängen, inwieweit es gelingt, Laubholz, insbesondere Buchenholz, als konstruktiv genutzten Baustoff zu gewinnen. Trotz ihrer hohen Festigkeits- und Steifigkeitswerte hat die Buche bisher in Deutschland keine große Bedeutung als Bauholz, während in der Schweiz bei speziellen Projekten Buchenbrettschichtholz bereits seit den 1970er Jahren eingesetzt wird

¹⁸² Die Angaben rekurren auf das Volumen fester Masse (Festmeter) bezogen auf 35 % Wassergehalt. Als Maßeinheit wird auch m³ (s) verwendet.

(Kaufmann et al. 2017). Seit einigen Jahren sind vor diesem Hintergrund verstärkte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu beobachten, mit dem Ziel, die Nutzung von Laubholz für tragende Konstruktionen voranzubringen (Wehrmann/Torno 2015).

Durch eine Kaskadennutzung von Holz, die eine mehrfache stoffliche Verwertung und eine energetische Nutzung am Ende des Lebenszyklus anstrebt, lässt sich die Ressourceneffizienz im Bereich Baustoffe verbessern. Diese Vorgehensweise verlängert und erweitert die Menge der Kohlenstoffspeicherung erheblich. Grundsätzlich sollte für die erste Nutzung *Vollholz* als Bauholz favorisiert werden. Produkte aus Massivholz haben das Potenzial, den Materiallebenszyklus deutlich zu verlängern. Die Wiederverwendung von ausgewählten Althölzern¹⁸³ in *Holzwerkstoffen* sollte nach Kaufmann et al. (2017) erst an zweiter Stelle angestrebt werden. Da eine sortenreine Trennung bisher kaum möglich ist, werden auch höherwertige Sortimente der Verbrennung zugeführt, obwohl die *thermische Verwertung* eigentlich erst die dritte und letzte Option sein sollte (Wörrle 2019). So wurden 2016 68,6% der gesamten Altholzmenge in Deutschland energetisch genutzt (Mantau o.J.). Der Anteil der stofflichen Nutzung betrug 25,7%, wobei mengenmäßig nahezu ausschließlich die Verwendung in der Spanplattenindustrie relevant ist.

Es kann angenommen werden, dass End-of-Life-Szenariorechnungen in der Planungsphase von Gebäuden in Zukunft stärker eingesetzt werden. Hierbei geht es um die Berücksichtigung von Anforderungen an die Verwertung von Bauabfällen, aber auch um die Umsetzung der Grundanforderung 7 der Verordnung (EU) Nr. 305/2011¹⁸⁴ (Purkus et al. 2020). Hier könnte sich BIM vorteilhaft auswirken. Dies setzt allerdings voraus, dass Rückbaubarkeit und Recyclingfähigkeit bei der Bauprodukt- und Bauteilherstellung sowie der Gebäudeplanung berücksichtigt werden (Kap. 7.2). Am Lebensende von Gebäuden müssen zudem ein selektiver Rückbau und eine sortenreine Erfassung von Altholz sichergestellt werden. Bei der Weiterentwicklung von Stoffkreisläufen sehen Hafner et al. (2017, S. 153) ein hohes Entwicklungspotenzial für die Holzbaubranche.

7.5 Automatisierte Baumaschinen¹⁸⁵

Mit Blick auf die direkten Umweltwirkungen von modernen Baumaschinen steht vor allem die Antriebstechnik im Fokus.¹⁸⁶ Stand der Technik ist noch immer der Dieselmotor als Primäraggregate. Dessen Vorteil ist die hohe Energiedichte des fossilen Energieträgers, der in einfachen, relativ wenig Platz beanspruchenden Kraftstoffbehältern mitgeführt werden kann (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 41 f.). Der Verbrennungsmotor ist zudem durch eine hohe Leistungsstärke, Robustheit und Effizienz gekennzeichnet. Allerdings sind Dieselaabgase mit verschiedenen Stoffen kontaminiert (Kohlendioxid und -monoxid, diverse Stickoxide etc.) und haben sowohl lokale (Lärm- und Schadstoffemissionen) als auch globale Effekte (Treibhausgasemissionen). Zwar wurden die Emissionen durch stufenweise Verschärfung der Emissionsvorschriften (Verordnung (EU) 2016/1628¹⁸⁷) über die letzten 15 Jahre massiv reduziert (UBA 2020b), was vor allem durch die kontinuierliche Verbesserung des Verbrennungsprozesses sowie durch eine Abgasnachbehandlung verwirklicht wurde; inzwischen ist allerdings ein Punkt erreicht, an dem eine weitere Reduzierung nur noch durch extrem hohe technische Aufwände realisiert werden kann (Will 2019, S. 49 f.).

¹⁸³ Darunter fallen vor allem Möbel, Verpackungs-, Bau- und Abbruchhölzer sowie Hölzer aus Außenbereichen (z. B. Zäune, Spielplätze, Gartenmöbel) ohne Beschichtungen oder Holzschutzmittel.

¹⁸⁴ In der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG wird gefordert, dass Gebäude dauerhaft und die eingesetzten Bauprodukte umweltverträglich und recyclingfähig sein müssen. Konkrete Indikatoren, mit deren Hilfe diese Anforderungen nachgewiesen werden können, bestehen noch nicht, werden aber aktuell in unterschiedlichen europäischen Forschungsprojekten erarbeitet.

¹⁸⁵ Die Ausführungen in diesem Kapitel sind eng angelehnt an Will (2019).

¹⁸⁶ Die Automatisierung von Baumaschinen hat auch indirekte Umweltwirkungen (z. B. Einsparung von Ressourcen und Energie durch effizientere Steuerung der Baustellenprozesse), die jedoch hier nicht betrachtet werden, da sie sich kaum sinnvoll abschätzen lassen.

¹⁸⁷ Verordnung (EU) 2016/1628 über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1024/2012 und (EU) Nr. 167/2013 und zur Änderung und Aufhebung der Richtlinie 97/68/EG

Umweltfreundlichere Antriebstechniken können auf unterschiedliche Art und Weise umgesetzt werden. Erstens steht der Einsatz regenerativer, klimaneutraler Kraftstoffe zur Debatte. Daneben werden zweitens schon heute leistungsverzweigte Antriebssysteme ohne und mit zusätzlichen, wieder aufladbaren Speichern eingesetzt, sogenannte hybride Antriebskonzepte. Schließlich steht drittens – wie im Pkw-Bereich auch – die Elektrifizierung des Antriebssystems zunehmend im Fokus. Praktisch allen derartigen Lösungsansätzen gemeinsam sind die steigende Komplexität und der erhöhte technische Aufwand mit entsprechend steigenden Investitionskosten.

Einsatz regenerativer Kraftstoffe

Der Einsatz regenerativer Kraftstoffe ist eine Möglichkeit, am bewährten Dieselmotor festhalten zu können, ohne auf den sowohl aus gesundheitlicher wie ökologischer Sicht nachteiligen Dieselmotor angewiesen zu sein. Als CO₂-neutral definierte Alternativkraftstoffe gelten Wasserstoff, Methan oder synthetischer Diesel (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 44). Diese lassen sich prinzipiell in konventionellen Verbrennungsmotoren durch geringe Modifikationen einsetzen. Sie ermöglichen so die Nutzung chemischer Energieträger, die durch Umwandlung regenerativ erzeugter elektrischer Energie bereitgestellt werden können. Diese sogenannten E-Fuels sollen mittels Power-to-Gas- oder Power-to-Liquid-Verfahren hergestellt werden (Purr et al. 2016). Dabei wird z. B. Wasser per Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. In einem weiteren Prozess bildet der so gewonnene Wasserstoff zusammen mit Kohlenstoffmonoxid ein Synthesegas, aus welchem mittels Synthese langkettige und flüssige Kohlenwasserstoffe (synthetische Kraftstoffe) gewonnen werden. Das dafür benötigte CO₂ kann mittels Carbon Capturing aus der Umgebung oder direkt aus Industrieemissionen gewonnen werden. Die Power-to-Gas- und Power-to-Liquid-Kraftstoffe aus regenerativen Quellen haben neben der annähernd CO₂-neutralen Bilanz den Vorteil, dass auf eine vorhandene Infrastruktur und Motortechnik zurückgegriffen werden kann. Zur Verbrennung von reinem Wasserstoff wurden in der Vergangenheit spezielle Gasmotoren auf Prototypenbasis entwickelt. Neuere Ansätze hingegen beruhen auf Umrüstkits, um herkömmliche Serienmotoren auf die Verbrennung von Wasserstoff umzustellen.¹⁸⁸ Alternativ kann der Wasserstoff direkt für einen Brennstoffzellenantrieb genutzt werden, dabei wird aus dem gasförmigen Wasserstoff zunächst elektrische Energie gewonnen und mit dieser werden elektromotorische Antriebe versorgt. Diese Form der Energie- und Leistungsbereitstellung ist auf kleine und mittlere Baugrößen der Baumaschinen begrenzt, weil die geringe Energiedichte des gasförmigen Wasserstoffs bei großem Energiebedarf sehr große Speichervolumina erfordert. Außerdem ist die Brennstoffzellentechnologie technisch sehr komplex und muss hinsichtlich ihrer Eignung für die anspruchsvollen Baustellenumgebungen noch weiterentwickelt werden.

Hybride Antriebskonzepte

Ein Fahrzeug mit einem Hybridantrieb besitzt nach der üblichen Definition mindestens zwei verschiedene Energiewandler und zwei verschiedene Energiespeichersysteme im Fahrzeug (Will 2019, S. 46). Die Energiewandler können mechanische Energie zum direkten Fahrzeugantrieb erzeugen oder elektrische Energie für den Elektroantrieb bereitstellen. Es lässt sich je nach Systemstruktur zwischen parallelen und seriellen Hybridantrieben sowie nach genutzten Energieformen zwischen dieselektrischen, dieselhydraulischen oder elektrohydraulischen Hybridkonzepten unterscheiden.

Das erste funktionsfähige dieselhydraulische Hybridsystem kam in einem Hydraulikbagger 2008 auf den Markt (Komatsu 2017; zum Folgenden Will 2019, S. 46). Der elektrische Schwenkmotor bzw. -generator wandelt dabei die kinetische Energie des Oberwagens beim Abbremsen in elektrische Energie um. Diese so gewandelte Energie wird in Hochleistungskondensatoren, sogenannten Supercaps, gespeichert. Beim Beschleunigen des elektrischen Schwenkantriebs wird dieser sowohl über den vom Dieselmotor angetriebenen Generator als auch aus den Supercaps mit elektrischer Leistung versorgt; damit wird der Dieselmotor entlastet. Im Vergleich zu elektrischen Energiespeichern haben Hydrospeicher eine erheblich höhere Leistungsdichte. Nach Herstellerangaben erreichen moderne Hybridlösungen (inklusive effizienter Komponenten, Assistenzsystemen etc.) eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO₂-Emissionen von bis 40%. Erfahrungen aus der Praxis und Forschungsvorhaben zeigten jedoch, dass je nach Anwendung und betrachteten Prozessen die Einsparpotenziale zwischen 0 und 30% liegen können (Will 2019, S. 45).

¹⁸⁸ <https://www.keyou.de/technologie/> (15.3.2021)

Parallel dazu ermöglichen Antriebssysteme mit Speicherlösungen den Ausgleich kurzzeitiger Lastspitzen, die zwar regelmäßig, aber immer nur für wenige Sekunden abgerufen werden (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 46). Bei gleichem Leistungsvermögen der Maschine kann somit ein kleinerer Dieselmotor eingesetzt werden (Downsizing) bzw. muss durch den Hybridverbund ein geringerer Anteil der Leistung durch den Verbrennungsmotor erzeugt werden (Phlegmatisierung).¹⁸⁹ Diese Systeme sind technisch ausgereift, stehen dem Markt zur Verfügung und zählen durch stetige Optimierung auf der Komponenten- und Steuerungsebene neben der Start-Stopp-Funktion (wenn kein Energiebedarf für Fahr- und Arbeitsfunktionen besteht, wird unter Voraussetzung einer ausreichenden Kraftreserve für einen hydraulischen Start der Verbrennungsmotor abgeschaltet) zum Stand der Technik. Jedoch finden sämtliche erhältlichen Hybridkonzepte aufgrund des deutlich höheren Preises wenig Akzeptanz am Markt.

Elektrifizierung von Baumaschinen

Wie in Kapitel 6.3.4 gezeigt, geht der Trend zu elektrisch angetriebenen Baumaschinen. Eine Elektrifizierung des Antriebsstranges bietet diverse Vorteile: Sie ermöglicht neben der lokalen Emissionsfreiheit einen höheren Gesamtwirkungsgrad, vor allem im häufig auftretenden Teillastbereich. Nicht zuletzt sind digitale Steuerungsfunktionen sowie Automatisierungskonzepte einfacher umsetzbar und auch Rekuperationspotenziale (Energierückgewinnung aus dem Prozess z. B. durch generatorisches Bremsen) können genutzt werden, sofern der Arbeitsprozess diese Potenziale bietet (Will 2019, S. 46).

Im Bereich der E-Mobilität (Pkw) gibt es tagtäglich Meldungen über neue Produkte, dagegen befindet sich der Großteil der elektrifizierten Baumaschinen noch im Prototypenstatus bzw. im Stadium der Markteinführung (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 47). Die elektrischen Antriebslösungen müssen noch unter Beweis stellen, dass sie genauso leistungsfähig und robust sind wie die bewährten Verbrennungsmotoren. Dabei sind Unterschiede in Abhängigkeit des Einsatzgewichtes festzustellen. Sowohl die Kompaktklassen der Radlader als auch der Bagger bis zu einem Einsatzgewicht von ca. 5 t werden von einigen Herstellern als vollelektrische Varianten angeboten – sogenannte Zero-Emission-Baumaschinen (Cheng/Alstrom 2019; Wacker Neuson o.J., 2021a, 2021b). Charakteristisch für die Antriebssysteme ist die Verwendung von zwei Elektromotoren. Eine Einheit fungiert als zentraler Fahrtrieb, während der zweite E-Motor zur hydraulischen Versorgung der Arbeitsausrüstung dient, da Hydraulikzylinder zur Realisierung der notwendigen Kräfte benötigt werden. Als Betriebszeit wird in der Regel ein Werktag von 6 bis 8 Stunden angegeben (begrenzt durch die Speicherkapazität der Batterien). Neben dem Laden am 230 V-Spannungsnetz ermöglicht eine Schnellladefunktion eine 80%ige Aufladung innerhalb von 1 bis 2 Stunden. Voraussetzung dafür ist allerdings der Zugang zu einer Versorgungsspannung mit entsprechend hoher Leistungsfähigkeit, was auf Baustellen bisher meist nicht der Fall ist.

Batterieelektrische Maschinen größerer Leistungsklassen werden zwar auf Messen vorgestellt, befinden sich aber noch immer im Prototypenstatus, z. B. ein 11-t-Mobilbagger mit einer Akkukapazität von 146 kWh oder ein voll elektrisch betriebener 26-t-Bagger mit 120 kW Antriebsleistung (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 47). Das Batteriepack bringt ein Gewicht von 3,4 t auf die Waage und hat eine Kapazität von 300 kWh (Pon Cat 2021). Diese Beispiele deuten bereits die Grenzen der Elektrifizierung bei größeren Baumaschinen an. Wirtschaftliche Lösungen für größere Baumaschinen mit batterieelektrischem Antrieb sind aus heutiger Sicht nicht vorstellbar, zudem würden die erforderlichen Speicher den verfügbaren Bauraum um ein Vielfaches überschreiten. Bei Maschinen größerer Klassen finden sich deshalb ausschließlich dieselektrische oder kabelgebundene Antriebssysteme,¹⁹⁰ um den hohen Leistungs- und Energiebedarf der Baumaschinen abzudecken. Die stetige Weiterentwicklung der Technologien und Komponenten wird in Zukunft mehr möglich machen, dies führt aber nur zu einer Verschiebung der Grenze des technisch Möglichen und nicht zu einer Auflösung dieser Problematik.

Aktuell steht einer breiteren Anwendung vollelektrischer Baumaschinen noch entgegen, dass auf Baustellen in der Regel keine (ausreichende) Ladeinfrastruktur vorhanden ist (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 48). Schon heute müssen zur Bereitstellung der benötigten elektrischen Leistung (z. B. für Krane) teilweise Dieselaggregate an der Baustelle bereitgestellt werden. Die E-Mobilität ist jedoch nur dann ökologisch vorteilhaft, wenn regenerative Energieerzeugung zum Laden genutzt wird, z. B. im Rahmen der für die Energiewende notwendigen Sektorenkopplung (TAB 2012). Solange das nicht der Fall ist, sind auch vollelektrische Lösungen nicht wirklich

¹⁸⁹ beispielsweise <https://www.logset.com/de/harvester/logset-12h-gte-hybrid> (15.3.2021)

¹⁹⁰ Beispielfür kabelgebundene Systeme sind hier ein 210-t-Bagger mit 850 kW Antriebsleistung (Liebherr 2019a) oder ein Seilbagger mit 130 t Einsatzgewicht und einer Leistung von 550 kW (BAUER Maschinen 2019) zu nennen.

emissionsfrei, sondern bestenfalls lokal emissionsfrei – die Emissionen entstehen nur an anderer Stelle, nämlich im Kraftwerk. Der Akkumulator bestimmt zudem maßgeblich die Klimabilanz der Maschine. Bei der Betrachtung der CO₂-Reduzierung müssen unbedingt auch die aufwendige Herstellung und Entsorgung berücksichtigt werden. Gerade bei der Gewinnung der Akkumaterialien und der Herstellung der Batteriezellen wird viel Energie benötigt. Neben den fossilen Brennstoffen sind auch die für viele Lösungen benötigten Seltenen Erden als endlich anzusehen. Die Ressourcenknappheit und die Abhängigkeit von geopolitischen Interessen erfordern verschiedene Entlastungsstrategien wie die Förderung der Wissenschaft für neue Materialien sowie der Recyclingwirtschaft.

Für Baumaschinen gilt damit ebenso wie für Pkw, dass der ökologische Vorteil einer Elektrifizierung wesentlich von infrastrukturellen Rahmenbedingungen abhängt (regenerative Stromerzeugung, Recyclinginfrastruktur etc.). Anders aber als im Pkw-Bereich ist die E-Mobilität bei Baumaschinen mit ihrem erhöhten Energiebedarf nicht die Lösung aller Probleme – inwiefern der Einsatz von Batterien als Energiespeicher oder die Versorgung aus der Steckdose Sinn ergeben, hängt ganz vom Einsatzprofil ab (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 40 u. 86 f.). Deshalb wird es auch zukünftig nicht das eine, beste Antriebskonzept für alle Maschinentypen geben. Alle erwähnten Systeme – Verbrennungsmotor mit synthetischen (regenerativ erzeugten) Kraftstoffen, dieselektrische Hybridsysteme, Elektromotor und Batterie oder mit leitungsgebundener Versorgung oder gar mit einer Wasserstoffbrennstoffzelle – haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile und in unterschiedlichen Anwendungsbereichen ihre Berechtigung (Plieninger et al. 2018; Will et al. 2019b). Die Frage, wie lange der Dieselantrieb für Baumaschinen noch benötigt wird, hängt dabei wesentlich davon ab, wie intensiv an den alternativen Lösungen in den nächsten Jahren geforscht wird und wie schnell die benötigten infrastrukturellen Voraussetzungen geschaffen werden (z. B. Ladeinfrastruktur). Ohne finanzielle Anreize sowie gesetzliche Vorschriften wird sich diesbezüglich vermutlich wenig bewegen, da aus wirtschaftlicher Sicht der etablierte Dieselmotor auf absehbare Zeit konkurrenzlos ist.

7.6 Fazit und Handlungsfelder

Die Ausführungen in diesem Kapitel zeigen, dass die Umweltwirkungen der verschiedenen Innovationen differenziert zu beurteilen sind und eine eindeutige ökologische Bewertung zum jetzigen Zeitpunkt in den meisten Fällen kaum möglich ist. Dies gilt etwa für die Elektrifizierung von Baumaschinen, die insgesamt nur dann ökologisch vorteilhaft ist, wenn passende infrastrukturelle Voraussetzungen gegeben sind (Recyclingkonzepte, Strom aus regenerativen Quellen). Das Beispiel der elektrischen Antriebstechnik macht zudem deutlich, dass wirtschaftliche und ökologische Ziele nicht immer in Einklang stehen müssen und eine Abwägung oft schwierig ist. Dennoch hat vor allem die Kombination aus Wasserstoff, Brennstoffzelle und Elektromotor für Baumaschinen großes Potenzial und könnte eine nachhaltige Lösung für mittlere Maschinengrößen darstellen. Entsprechende Forschungsprojekte wären nötig und sinnvoll, um die offenen Fragen zu klären und dieses Potenzial zu erschließen. Allerdings findet das breite Anwendungsfeld der Baumaschinen bislang in keinem der zahlreichen bekannten Förderprogramme im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie Berücksichtigung, sondern es werden nur Straßen- und Schienenverkehr, Sonderverkehre (z. B. Kommunalfahrzeuge) sowie stationäre Anwendungen gefördert.

Eine Sonderrolle bei den betrachteten Technologien nimmt BIM ein, dessen Einsatz in der Planungsphase die Entscheidungsprozesse im Hinblick auf ökologisch nachhaltigeres Bauen verbessern kann – hier stehen somit die indirekten Umweltwirkungen im Vordergrund. Im Rahmen eines Bauprojekts können Varianten von Baukonstruktionen, Bauweisen oder -stoffen mit BIM analysiert und bewertet werden. Ferner hat BIM das Potenzial, ein Inventar zu erstellen, das Auskunft über das Bauteile und -stoffe im Gebäude gibt, wenn im Lebenszyklus der Rückbau ansteht. Da eine individuelle Erhebung ökologisch relevanter Daten von Baustoffen in der Praxis nicht durchführbar ist, ist man bei der Nachhaltigkeitsbewertung mit BIM auf standardisierte Datensätze baurelevanter Datenbanken (z. B. »ÖKOBAUDAT«) und Ökobilanzprogramme (z. B. »GaBi«) angewiesen. Die Prozesskettenanalyse in BIM bildet auf diese Weise ein Modell für die mit der Errichtung des Bauwerks verbundenen Umweltauswirkungen ab. Allerdings liegen nicht für alle Arbeitsschritte, eingesetzten Bauteile und technischen Ausrüstungen Ökobilanzdaten vor, sodass Vereinfachungen gemacht und Plausibilitätsannahmen getroffen werden müssen, was ökologischen Gebäudebewertungen mittels BIM Grenzen setzt. Automatisierte Ökobilanzierungen, etwa um Änderungen bei der Konstruktion oder der technischen Gebäudeausrüstung zu prüfen, können noch nicht zufriedenstellend durchgeführt werden. Dennoch ist insgesamt davon auszugehen, dass die verstärkte Nutzung von BIM wichtige Impulse zur Umsetzung von nachhaltigem Bauen setzen kann. Auf diese Weise lassen sich Aspekte wie Ressourcenschonung und Klimaschutz schon in der Planung optimal einbringen.

Der 3-D-Betondruck hingegen ist aus derzeitiger Sicht ökologisch eher ungünstig zu bewerten. Da der 3-D-Beton auf der Bindemittelgrundkonzeption des konventionellen Betons und damit auf Zementklinker aufbaut, übernimmt er als Rucksack dessen klimaschädliche Wirkungen und kreislaufwirtschaftliche Probleme. Die Herstellung von Zementklinker ist sehr CO₂-intensiv. Zudem erlauben zementgebundene Baustoffe, die auf Zementklinker basieren, am Ende ihres Lebenszyklus keine hochwertige Verwertung. Der 3-D-Beton verstärkt diese Probleme, da er aufgrund der speziellen technischen Anforderungen aus dem Zementportfolio diejenigen einsetzen muss, die ökologisch mit am ungünstigsten abschneiden. Somit besteht beim 3-D-Beton gegenüber dem herkömmlichen Beton noch größerer Druck, nach klima- und ressourcenfreundlichen Lösungen zu suchen. Allerdings ermöglicht es dünnwandiger 3-D-Betondruck, die gedruckten Strukturen aus bauphysikalischer und tragwerkplanerischer Sicht topologisch zu optimieren, was zur Reduktion des Materialverbrauchs führen kann.

Die Entwicklung von 3-D-Beton ist ein typisches Beispiel einer nachgeschalteten inkrementellen Technologie. Das traditionelle, auf Zementklinker basierende Baustoffsystem wird dabei nicht infrage gestellt, obwohl es ökologische Nachteile hat und sich damit die Nachhaltigkeitsziele voraussichtlich nicht erfüllen lassen. Inkrementelle Innovationen vermindern den Innovationsdruck in der traditionellen Baustoffindustrie, da sich mit ihnen die Anforderungen des Marktes, der bestehenden Zulassungsverfahren sowie Standards in der Regel weiterhin erfüllen lassen. Hinzu kommt, dass die mit inkrementellen Innovationen verbundenen Entwicklungs- und Herstellungskosten gegenüber den Forschungs- und Entwicklungskosten radikal neuer Lösungen gering sind. Da die Entwicklung völlig neuer innovativer Lösungen zudem äußerst risikobehaftet ist und aufgrund der bestehenden Prüfungs- und Zulassungsbedingungen mit sehr aufwendigen und langwierigen Zulassungsverfahren (15 bis 20 Jahre) zu rechnen ist, gibt es eine Gemengelage, die sich im Hinblick auf die erforderliche Entwicklung innovativer nachhaltigerer Lösungen eher als hinderlich erweist (Stemmermann/Achternbosch 2013).

Die Zementindustrie steht hinsichtlich Dekarbonisierung vor einer schwierigen Situation. Solange emissionsarme Alternativen zum CO₂-intensiven Zementklinker nicht zur kommerziellen Anwendungsreife gebracht werden können, bleiben die CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) als einzige Lösung. Bislang ist aber noch unklar, was CCS zum globalen Klimaschutz wirklich beitragen kann. Vor diesem Hintergrund sollten die Anstrengungen für die Entwicklung von weitgehend klimaneutralen Bindemitteln, die möglichst auch für den 3-D-Druck geeignet sind, intensiviert werden – umso mehr, als Investitionszyklen für Gebäude und ihre technischen Systeme in der Regel sehr lang sind und mitunter deutlich über 30 Jahre erreichen (BMW 2018). Werden Innovationspotenziale nicht rechtzeitig genutzt, wirkt sich das oft 50 bis 100 Jahre aus und erschwert die schnelle Reduktion der Treibhausgasemissionen.

Auch bei Carbon, dem Potenzial als innovatives Bewehrungsmaterial für Beton und 3-D-Beton nachgesagt wird, gibt es eine Reihe offener Fragen hinsichtlich einer ganzheitlichen ökologischen Bewertung. Carbonfasern führen aufgrund ihrer extremen Energieintensität bei ihrer Herstellung einen gewaltigen ökologischen Rucksack mit sich. Die Entsorgung von Carbonbeton ist noch weitgehend ungeklärt (LAGA 2019). Jedoch wird Carbonbeton das Potenzial nachgesagt, im Vergleich zu Stahlbeton schlankere Baukonstruktionen zu ermöglichen, womit sich der Bedarf an Beton reduzieren ließe. Doch inwieweit sich solche Einspareffekte tatsächlich realisieren lassen, ist unklar. Insgesamt gilt auch für den Carbonbeton, dass ein verstärkter Einsatz nur zu vertreten ist, wenn in der Gesamtbilanz keine negativen Umwelteffekte resultieren (LAGA 2019, S. 21).

Deutlich vielversprechender fällt die ökologische Bewertung des modularen und seriellen Bauens aus. Die Vorfertigung in Werkshallen kann insbesondere durch den Einsatz digitaler Fertigungsmethoden Produktionsabfälle minimieren, somit Ressourcen schonen und die Abfallentsorgung entlasten. Werden zudem noch hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit positiv bewertete Baustoffe eingesetzt, sind für die ökologische Gesamtbewertung besonders günstige Effekte zu erwarten. Insbesondere für den nachwachsenden Werkstoff Holz kann von der Planungsphase mit BIM über die digital optimierte Fertigung im Werk bis hin zum abfallarmen Zusammenfügen der Bauteile und Module eine weitgehend nachhaltige Gebäudeerrichtung erwartet werden. Holz punktet zudem als Kohlenstoffspeicher und hinsichtlich der Substitution endlicher Ressourcen. Eine Forcierung der Verwendung von Holz im Gebäudebau kann somit einen positiven Beitrag zum Klimaschutz und zur Ressourceneffizienz leisten. Der erforderliche Mehrbedarf an Holz könnte auf der Basis vorliegender Daten der Holzinventur gut gedeckt werden. Allerdings ergeben sich diesbezüglich langfristig Unsicherheiten aufgrund des Klimawandels. In den letzten Jahren führten Stürme, Dürre und Borkenkäferbefall zu Waldschäden in erheblichem Umfang, sodass unklar ist, in welchem Ausmaß sich der Holzbau auf lange Sicht forcieren lässt (Kap. 7.4). Der Entwicklung CO₂-armer mineralischer Baustoffe muss deshalb auch zukünftig ein wichtiges Augenmerk gelten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass neue Technologien, Prozesse und Produkte dringend gebraucht werden, um insbesondere den steigenden Wohnungsbaubedarf erfüllen zu können. Allerdings steht die Bauwirtschaft vor enormen Herausforderungen im Bereich Klima- und Ressourcenschutz – Innovationen im Bauwesen müssen deshalb verstärkt auch unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten beurteilt werden. Die Forderung nach mehr Nachhaltigkeit ist jedoch nicht immer mit dem Ziel vereinbar, Effizienz und Produktivität zu steigern. So sind mit dem allgegenwärtigen Massenbaustoff Beton in seiner aktuellen Zusammensetzung die zukünftigen ökologischen Anforderungen kaum zu meistern – eine Feststellung, an der auch neue additive Fertigungsverfahren nichts grundlegend ändern werden. Hier ist die prinzipielle Bereitschaft notwendig, auch radikal andere Wege zu gehen, wofür es dann starker politischer und (langfristig) finanzieller Unterstützung bedürfte. Insofern ist zu begrüßen, dass in der 2021 weiterentwickelten »Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie« das nachhaltige Bauen als einer der Transformationsbereiche in den Fokus genommen wird und mit einem ressortübergreifenden Aktionsplan vorangetrieben werden soll (Bundesregierung 2021). Über die finanzielle Förderung innovativer Produktentwicklungen und Verfahren hinaus kommt dem Staat als einem der größten Bauherren und Immobilienbesitzer Deutschlands eine wichtige Vorbildfunktion beim ökologischen Bauen zu. Der »Leitfaden Nachhaltiges Bauen« und das damit verknüpfte »Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen« sind zwar für Baumaßnahmen des Bundes verpflichtend anzuwenden, haben aber bei öffentlichen Baumaßnahmen der Länder und Kommunen nur empfehlenden Charakter (BMI 2019a). Hier wäre ein möglichst einheitliches Vorgehen mit einer konsequenteren Ausrichtung auf Nachhaltigkeit sicherlich wünschenswert. Nutzerfreundliche Instrumente, welche die Erstellung automatisierter Gebäudeökobilanzen ermöglichen (etwa das Onlinetool »eLCA«¹⁹¹ des BBSR), sowie die zugrunde liegenden Baustoffdatenbanken (wie »ÖKOBAUDAT«) sind dafür kontinuierlich weiterzuentwickeln und möglichst BIM-kompatibel auszugestalten, da sie den Schlüssel für eine umfassende Bilanzierung der Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerkes darstellen. Schließlich erscheint auch eine Überarbeitung der rechtlichen Rahmenbedingungen durchaus angebracht. Denn bislang sind Nachhaltigkeitsanforderungen nur unzureichend in den Vorschriften der MBO sowie den Bauordnungen der Länder (LBO) verankert (UBA 2015), was das ökologische Bauen – etwa den Einsatz klimaschonender und kreislauffähiger Baustoffe – erschweren oder gar verunmöglichen kann. Vieles deutet darauf hin, dass es ohne eine eindeutige und einheitliche Rechtsgrundlage, die sich stärker am Nachhaltigkeitsgedanken orientiert, kaum gelingen kann, das ökologische Bauen breiter in der Praxis zu etablieren.

¹⁹¹ <https://www.bauteileditor.de/> (12.3.2021)

8 Bauen 4.0 – übergreifende Aspekte und Handlungsfelder

Im Vergleich zu anderen Branchen zeichnet sich die Bauindustrie durch eine verhältnismäßig geringe Produktivitätsentwicklung und eine geringe Innovationstätigkeit aus. Die Art und Weise, wie Bauwerke errichtet werden, ist in den letzten Jahrzehnten im Wesentlichen gleich geblieben. Mauerwerk und Beton (auf Portlandzementklinker basierend) bilden nach wie vor die hauptsächlichen Baustoffe. Die Planung findet zwar inzwischen am Computer statt, die elektronischen Planunterlagen werden jedoch meist weiterhin wie Papierdokumente behandelt und zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten separat ausgetauscht. Auch an der Maschinenteknik, die auf den Baustellen im Einsatz ist, hat sich in den letzten 10 bis 15 Jahren kaum Grundlegendes geändert. Diese Innovationssträgheit hat gewisse Gründe:¹⁹² Bauwerke sind in der Regel Einzelanfertigungen, die direkt an Ort und Stelle und unter sehr unterschiedlichen Bedingungen erstellt werden müssen. Standardisierte Prozesse zu etablieren und damit die Voraussetzung für Digitalisierung und Automatisierung zu schaffen, ist deshalb deutlich schwieriger als in anderen Industriebereichen, die in spezialisierten Fertigungshallen unter klar definierten und im Vorfeld bekannten Umgebungsbedingungen produzieren. Zudem gehört die Bauindustrie aus Sicherheitsgründen zu den wohl am stärksten reglementierten Bereichen überhaupt, was ebenfalls ein strukturelles Innovationshemmnis darstellt.

Eine Folge dieser Rahmenbedingungen ist, dass die Arbeitsproduktivität der Baubranche im Unterschied zu anderen Industrie- und Dienstleistungsbereichen seit Jahrzehnten auf einem relativ konstanten Niveau verharrt und konjunkturbedingte Schwankungen in der Nachfrage nach Bauleistungen hauptsächlich über die Zahl der Beschäftigten reguliert werden (Kap. 2). Diese Vorgehensweise stößt jedoch zunehmend an Grenzen: Angesichts des aktuellen Fachkräftemangels, der sich zukünftig aufgrund der demografischen Entwicklung noch verschärfen dürfte, ist die Bauindustrie kaum noch in der Lage, den stark wachsenden Wohnungsbaubedarf zu befriedigen. Hinzu kommen weitere Herausforderungen, wie die steigenden Anforderungen an Nachhaltigkeit und Klimaschutz, die mit den bestehenden, teils ineffizienten und ressourcenintensiven Verfahren kaum zu erfüllen sein werden.

Es besteht vor diesem Hintergrund weitgehender Konsens, dass die Produktivität im deutschen Bauwesen deutlich steigen muss, um die gesellschaftlichen Erwartungen in den Bereichen Wohnungs- bzw. Infrastrukturbau mit den begrenzt verfügbaren Ressourcen erfüllen zu können (Will 2019, S. 107). Von der Digitalisierung und Automatisierung der Bauprozesse werden diesbezüglich wesentliche Impulse erwartet.

Wie in den vorherigen Kapitel gezeigt, gibt es in den vier relevanten Innovationsbereichen BIM, additive Fertigungsverfahren, modulares/serielles Bauen, automatisierte Baumaschinen noch größere Handlungserfordernisse, wobei vor allem Forschung und Entwicklung sowie die Standardisierung herausstechen. Obwohl sich die verschiedenen Bereiche in vielen Aspekten teils grundlegend unterscheiden – sowohl in technischer als auch in anwendungsbezogener Hinsicht –, sollten ihre Perspektiven nicht isoliert betrachtet werden. Analog zur Industrie 4.0 ist auch beim Bauen 4.0 letztlich das Ziel, die digitalen Einzellösungen nahtlos miteinander zu vernetzen, um eine flexiblere, datenbasierte Steuerung der Planungs- und Bauprozesse zu ermöglichen und so Synergiepotenziale zu nutzen. So lautet eines der Ziele der Hightech-Strategie der Bundesregierung (2018b, S. 26), »mit einer ›digitalen Wertschöpfungskette Planen und Bauen‹ bis hin zu automatisiertem Bauen [...] den nationalen und weltweiten Neubaubedarf an Wohnraum in besserer Qualität, zu günstigeren Preisen und in kürzerer Zeit« decken zu wollen.

Digitalisierte Wertschöpfungsprozesse sind im Bauwesen jedoch eher die Ausnahme als die Regel. Zwar gibt es in der Vorfertigung bereits fast komplett automatisierte, meist größere Betriebe (Fertigteilwerke), die sich hinsichtlich der Digitalisierungstiefe unwesentlich von anderen Fertigungsindustrien unterscheiden (Mechtcherine 2019, S. 5). Grundsätzlich ist aber der digitale Vernetzungsgrad der Baubranche noch gering und gerade die Schnittstellen zwischen den bereits vorhandenen Werkzeugen der digitalen Bauplanung (CAD, BIM etc.) und den Werkzeugen der digitalen, automatisierten Produktion (additive Fertigung, modulare/serielle Verfahren, Baumaschinen etc.) sind noch unterentwickelt (Mechtcherine 2019, S. 165). Das betrifft etwa

¹⁹² In diesem Kontext ist auch wichtig, dass z. B. maßgebliche Prozesse der Zementchemie immer noch nicht so weit verstanden sind, um eine vorausschauende Einschätzung wichtiger Eigenschaften, wie z. B. die Dauerhaftigkeit bei neuartigen Betonen, zu ermöglichen, was das Beharren auf konventionellem Beton erklärt.

- › die Anbindung von Baumaschinen und (modularen/seriellen sowie additiven) Produktionsverfahren an BIM-Systeme und umgekehrt (Will 2019, S. 117),
- › die Erstellung von BIM-Modellen sowie die automatisierte Baufortschrittsüberwachung mithilfe von 3-D-Vermessung und KI-Methoden,
- › die Entwicklung von automatisierten Maschinen und Robotern, die für die (u. a. additive) Fertigung unter Baustellenbedingungen geeignet sind, sowie
- › die Optimierung der Baulogistik durch informationstechnische Vernetzung und datenbasierte Steuerung von Maschinen und Prozessen entlang der Lieferkette (z. B. über cloudbasierte Softwarelösungen).

Dies ist nur ein kleiner Ausschnitt an Forschungs- und Entwicklungsaspekten, die sich mit Blick auf die Thematik Bauen 4.0 ergeben. Über allem steht die Frage, welchen Beitrag die Digitalisierung zur nachhaltigeren Ausrichtung des außerordentlich energie- und ressourcenintensiven Bausektors leisten kann. Auch das ist in erster Linie eine Forschungs- und Entwicklungsaufgabe, die neben den beschriebenen Kerntechnologien vor allem die Baustoffe einbeziehen muss, die zukünftig energieeffizienter hergestellt und konsequent in die Kreislaufwirtschaft integriert werden müssen.

Neben einer strategischen Forschungs- und Innovationsförderung hängt es vor allem von koordinierten Normungsbestrebungen, der Schaffung geeigneter infrastruktureller Rahmenbedingungen sowie ausreichenden Ausbildungsstandards für zukünftige Fachkräfte ab, wie schnell eine digitale Wertschöpfungskette Planen und Bauen etabliert werden kann. Entsprechende Handlungsmöglichkeiten werden im Folgenden dargestellt.

8.1 Forschung und Entwicklung sowie Normung

Insgesamt verfügt Deutschland über eine starke Baumaschinenindustrie sowie eine gut entwickelte Forschungslandschaft und gehört in Bereichen wie der additiven Fertigung (3-D-Beton) gar zu den führenden Ländern. Dennoch ist festzustellen, dass deutsche Akteure in anderen innovativen Entwicklungsfeldern, wie etwa der Baurobotik, eine eher untergeordnete Rolle spielen (Kap. 6.2.4). Auffällig ist in diesem Zusammenhang, dass das Volumen der Forschungsförderung mit Bezug zum Bauwesen im Vergleich zu anderen Forschungsfeldern (z. B. der Bioökonomie) eher gering ausfällt und es kaum themenbezogene Förderprogramme gibt (Will 2019, S. 108) – eine positive Ausnahme ist das Programm »Zukunft Bau«¹⁹³ des BMI (2019b), das als Baustein der Hightech-Strategie 2019 ca. 17 Mio. Euro für »eine zukunftsweisende und nachhaltige Entwicklung von Bauwesen, Architektur sowie Bau- und Wohnungswirtschaft« zur Verfügung gestellt hat. Abgesehen davon existieren zahlreiche themenoffene Förderprogramme des BMBF und des BMWi, die für die Förderung technologischer Innovationen im Bauwesen infrage kommen (z. T. auch im Rahmen der Hightech-Strategie).

Angesichts des enormen, breitgefächerten Forschungsbedarfs erscheint neben einer Erhöhung der Fördermittel die Entwicklung einer koordinierten Forschungsstrategie sinnvoll, um die Ressourcen möglichst zielgerichtet einsetzen und Synergien nutzen zu können. Benötigt werden insbesondere langfristig orientierte Programme, die auch Folgeprojekte ermöglichen und ausreichende Sachmittel umfassen, damit Demonstratoren und Prototypen realisiert werden können (Will 2019, S. 108). Häufig erweist es sich als problematisch, dass die Förderung deutlich vor der Marktreife eines Produkts endet und die erarbeiteten Lösungsansätze nach Abschluss eines Projekts nicht weiterverfolgt werden.¹⁹⁴ Diesbezüglich vorbildhaft ist das modulare Forschungs- und Innovationsgebäude »NEST« der schweizerischen Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) in Dübendorf, das die konkrete Erprobung innovativer Technologien, Materialien und Systeme ermöglicht und so die Lücke zwischen Forschungslabor und Markt überwinden soll. Ein entsprechendes Test- und Demonstrationszentrum eröffnet zudem Möglichkeiten, unterschiedliche industrielle und akademische Akteure im Rahmen von koordinierten Forschungs- und Entwicklungsprojekten zusammenzubringen und so notwendige Synergien zu erzeugen (Mechtcherine 2019, S. 80), was auch für Deutschland sehr wünschenswert wäre.

Ein besonderes Augenmerk sollte darauf gelegt werden, dass sich neben größeren Konzernen auch KMU an den öffentlich geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekten beteiligen. Das ist nicht zuletzt mit Blick auf

¹⁹³ <https://www.zukunftbau.de/> (2.5.2022)

¹⁹⁴ Dies insbesondere vor dem Hintergrund, dass Innovationen im Bauwesen ein extrem zeitaufwendiges Prozedere in Bezug auf Prüf- und Regelwerkskonformität durchlaufen müssen, bevor sie angewendet werden können.

das Handlungsfeld Normung/Standardisierung bedeutsam, weil im Rahmen anwendungsorientierter Forschungsprogramme diesbezüglich relevante Vorarbeiten geleistet werden (Blind 2009, S. 7 f.) – es ist wichtig, dass die Perspektive der KMU hier frühzeitig einfließt. Zudem wäre eine nationale Normungsroadmap, wie sie für BIM entwickelt wird (DIN 2020), auch für andere Bereiche (vor allem neue mineralisch basierte Verbundwerkstoffe, Schnittstellen für die Automatisierung von Baumaschinen sowie Modulbau)¹⁹⁵ hilfreich, um ein strukturiertes, strategisches Vorgehen zu ermöglichen. Zu beachten ist dabei, dass Normen und Standards nicht nur auf nationaler, sondern vor allem auf europäischer (CEN) und internationaler Ebene (ISO) zu etablieren sind (Díaz et al. 2019, S. 210). Das erfordert entsprechende Gremienarbeit, die hauptsächlich von den Unternehmen zu tragen ist. Allerdings sind insbesondere KMU dazu kaum in der Lage. Hier wäre die Politik gefordert, im Zusammenspiel mit den Verbänden und Kammern dafür zu sorgen, dass die Interessen der deutschen Bauwirtschaft in den internationalen Normungsprozessen angemessen repräsentiert sind. Infrage kommen beispielsweise finanzielle Unterstützungsmaßnahmen. So honoriert das BMWi seit Anfang 2020 das entsprechende Engagement von KMU im Technologieförderprogramm »Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen« (WIPANO).¹⁹⁶ Jedoch ist das Angebot auf Unternehmen beschränkt, »die noch nie oder nicht innerhalb der letzten 3 Jahre an Normungs- oder Standardisierungsgremien anerkannter technischer Regelsetzer teilgenommen haben« (BMW 2020). Eine Ausweitung des Programms auf alle Unternehmen, die sich im Bereich Normung engagieren, wäre überlegenswert.

8.2 Infrastrukturelle Rahmenbedingungen

Die digitale Vernetzung der Bauwirtschaft entlang der Wertschöpfungskette und damit der Aufbau unternehmensübergreifender Wertschöpfungsnetzwerke scheitert derzeit nicht nur an den fehlenden herstellerübergreifenden Standards, sondern auch daran, dass die infrastrukturellen Voraussetzungen nicht gegeben sind. Für den freien Datenfluss werden erstens herstellernerneutrale Datenportale benötigt, zweitens eine flächendeckende Breitbandverfügbarkeit sowie drittens eine leistungsfähige Geodateninfrastruktur:

- › Über *cloudbasierte Datenportale* werden die auf der Baustelle anfallenden Maschinen- und Prozessdaten zwischen den Beteiligten nach zu vereinbarenden Regeln ausgetauscht (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 111 f.). Die meisten Maschinenhersteller verfolgen hier proprietäre Ansätze, was allerdings nicht der Realität einer gewöhnlichen Baustelle mit ihren heterogenen Maschinenparks entspricht. Benötigt werden unabhängige Portale, die einen herstellernerneutralen Zugang erlauben und auf die Bedürfnisse der kleinteiligen Bauwirtschaft zugeschnitten sind. Wichtig sind in diesem Zusammenhang vor allem die Aspekte Datenhoheit¹⁹⁷ und -sicherheit. Möglichkeiten für die Entwicklung einer entsprechenden Infrastruktur böten sich im Rahmen des deutsch-französischen Projekts »Gaia-X«, mit dem eine offene europäische Cloudplattform aufgebaut werden soll, die für unterschiedliche Anwendungen genutzt werden kann (BMW/BMBF 2019). In diesem Bereich ergäben sich auch Chancen für Neugründungen, die z. B. durch gezielte Förderprogramme angestoßen und unterstützt werden können. Erste Start-ups sind in diesem Bereich schon aktiv (z. B. Toolsense¹⁹⁸, Sharemac¹⁹⁹), aber auch etablierte Anbieter haben begonnen, sich auf diesem Feld zu engagieren (z. B. Proemion²⁰⁰ oder Bosch Mobility Solutions²⁰¹).
- › Zahlreiche Automatisierungsbestrebungen setzen eine *maschinenübergreifende Kommunikation* voraus, also die Übertragung von Daten zwischen einzelnen Maschinen oder zwischen Maschinen und übergeordneten Systemen (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 116). Die Übertragung von Statusmeldungen der Maschinen (z. B. für vorbeugende Wartung und statistische Auswertungen) oder von Prozessdaten (für Dokumentation und Abrechnung) ist mit den bestehenden Kommunikationsnetzen realisierbar, sofern am Standort der Baustelle eine entsprechende Netzabdeckung gegeben ist. Wenn aber die Kommunikation für eine direkte

¹⁹⁵ hier etwa in Bezug auf standardisierte Fügeverfahren

¹⁹⁶ <https://www.innovation-beratung-foerderung.de/INNO/Navigation/DE/WIPANO/wipano.html> (12.3.2021)

¹⁹⁷ Betriebsdaten haben häufig keinen Personenbezug und fallen deshalb nicht unter das Datenschutzrecht. Werden diese Daten auf cloud-basierten Datenportalen gespeichert, ist rechtlich oft unklar, wer sie in welcher Form wirtschaftlich nutzen darf. Vor allem kleinere Betriebe fürchten, mit der Nutzung von Datenplattformen die Hoheit über ihre Betriebsdaten zu verlieren (siehe zum Problem der Datenhoheit ausführlich TAB 2021).

¹⁹⁸ <https://toolsense.io/> (12.3.2021)

¹⁹⁹ <https://www.sharemac.de/de> (6.4.2021)

²⁰⁰ <https://www.proemion.com/de> (12.3.2021)

²⁰¹ <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/> (12.3.2021)

Beeinflussung der Bewegungsvorgänge einer Maschine genutzt werden soll, z. B. bei kollaborierenden oder ferngesteuerten Maschinen oder bei cloudgestützter Prozessführung, muss diese Kommunikation in Echtzeit und mit höchster Verfügbarkeit erfolgen (5G). Dafür sind die heute standardmäßig nutzbaren Kommunikationsnetze (max. LTE/4G) aufgrund zu geringer Bandbreite, zu großer Latenz, eingeschränkter Netzabdeckung und Zuverlässigkeit kaum geeignet. Da unklar ist, wann ein flächendeckendes 5G-Netz verfügbar sein wird, wäre eine mögliche Überbrückungsmaßnahme, den Aufbau privater 5G-Netze für Unternehmen (Campusnetze) zu fördern, um innovative Praxisanwendungen zu beschleunigen.

- › *Geodateninfrastruktur*: Bauwerke entstehen immer in räumlichen Kontexten, deren Merkmale bislang aber kaum in die konkrete Bauwerksplanung einfließen, obwohl dies in vielen Fällen sehr sinnvoll wäre – etwa zur Beurteilung von Umweltauswirkungen (insbesondere bei größeren Infrastrukturprojekten) oder zur Gestaltung von Zuwegungen und Außenanlagen (Díaz et al. 2019, S. 166 ff.; DVW/Runder Tisch GIS 2019). Um raumbezogene Fragestellungen dieser Art beantworten zu können, muss das Gebäudemodell in ein digitales Umgebungsmodell (möglichst 3-D) eingebettet werden. Neben der digitalen Ad-hoc-Vermessung von Bestandsgebäuden und umgebendem Gelände mittels 3-D-Laserscan lässt sich dies prinzipiell durch die Integration von BIM und GIS erreichen. Allerdings ist die Interoperabilität von BIM und GIS noch eher mangelhaft. Sie scheitert häufig nicht nur an den technischen Herausforderungen des Datenaustauschs (Kaden et al. 2019), sondern auch an der fehlenden Datenverfügbarkeit. Besonders die Bundesländer und die Kommunen sind hier gefordert, ihren reichhaltigen Bestand an amtlichen Geobasis- und Geofachdaten (z. B. digitale Orthofotos, topografische Karten, Straßennetze, Liegenschaftskataster; Reuters 2019) über standardisierte Schnittstellen frei zur Verfügung zu stellen.²⁰²

Besondere Bedeutung für die Beschleunigung des Wohnungsbaus wird darüber hinaus der Digitalisierung planungsrechtlicher und bauaufsichtlicher Verfahren zugeschrieben (Bundesregierung 2018c, S. 11 f.). Aufgrund der dadurch zu erwartenden Synergieeffekte sowie aufgrund von Kosten- und Zeitersparnissen könnte die digitale Vereinfachung der Genehmigungsverfahren speziell für KMU ein wichtiger Anreiz sein, in den digitalen Wandel zu investieren. Allerdings erfüllen die Bauämter vielerorts noch nicht den erforderlichen Digitalisierungsstand, wie eine Umfrage des Ministeriums für Heimat, Kommunales, Bau und Gleichstellung des Landes Nordrhein-Westfalen von 2019 exemplarisch verdeutlicht: 90 % der Bauämter dieses Bundeslandes arbeiten nach wie vor papierbasiert (Joswig 2019; Terfehr 2019). Die aktuell laufenden Digitalisierungsbestrebungen der Baubehörden²⁰³ (im Rahmen der Umsetzung des OZG) sind deshalb eine unerlässliche Infrastrukturmaßnahme, die es zu intensivieren gilt. Von Beginn an wäre möglichst darauf zu achten, dass die Verfahren konsequent BIM-kompatibel ausgerichtet werden, da dies eine zentrale Voraussetzung ist für die Schaffung einer durchgängigen digitalen Prozesskette. Dafür ist u. a. die Weiterentwicklung der zugrunde liegenden Standards (XPlanung und XBau²⁰⁴, Kap. 3.1) sowie der »open-BIM«-Schnittstellen (IFC, BCF etc.) erforderlich, vor allem aber deren breite Implementierung in Städten und Kommunen. Durch die Bereitstellung der für Baugenehmigungen erforderlichen Planwerke (z. B. Bauleitpläne) über die bestehenden Geodateninfrastrukturen ließen sich in diesem Zusammenhang weitere Synergiepotenziale heben (Leitstelle XPlanung/XBau 2018, S. 13).

8.3 Fachkräftesicherung und Ausbildungsbedarfe

Das Berufsbild baustellennaher Berufe wird sich durch die Digitalisierung sowie die Automatisierung von Maschinen und Prozessen grundlegend verändern (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 114). Einerseits bleiben zwar die belastenden äußeren Bedingungen des Baustellenumfelds weitgehend bestehen (Wetter, Lärm, Staub), andererseits werden im Bauwesen zunehmend anspruchsvolle Hightechmaschinen und moderne Arbeitsmittel zum Einsatz kommen, was den Interessen jüngerer Generationen entgegenkommen dürfte. Die bevorstehende Veränderung ist deshalb vor allem auch eine Chance, die Bauberufe für junge Menschen wieder attraktiver zu machen und damit die Ausbildungszahlen in diesen Berufen zu erhöhen.

²⁰² Relevant hierfür ist die Richtlinie 2007/2/EG zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE), die in Deutschland durch das Gesetz über den Zugang zu digitalen Geodaten (Geodatenzugangsgesetz – GeoZG) umgesetzt wird (TAB 2021, S. 60 ff.).

²⁰³ <https://www.onlinezugangsgesetz.de/Webs/OZG/DE/umsetzung/themenfelder/bauen-und-wohnen/bauen-und-wohnen-node.html> (12.3.2021)

²⁰⁴ Verantwortlich dafür ist die Leitstelle Xplanung/XBau in Hamburg, deren Betrieb 2020 verlängert wurde (Kommune21 2020).

Eminent wichtig ist Letzteres auch deshalb, weil sich schon heute im Bauwesen ein Fachkräftemangel manifestiert, der in Deutschland und anderen Industrieländern zu einer Steigerung der Arbeitskosten insbesondere für qualifizierte Arbeitskräfte führt (dazu und zum Folgenden Mechtcherine 2019, S. 5 f.). Kurzfristig kann der Einsatz von weniger qualifizierten Arbeitskräften zwar dazu beitragen, die Kosten zu senken, dennoch schlägt sich dies erfahrungsgemäß negativ bei den finanziellen Aufwendungen für Nachtragsarbeiten nieder. Mit der fortschreitenden Digitalisierung werden immer mehr Fachkräfte benötigt, die über die erforderlichen Fähigkeiten zum Einsatz von BIM sowie zum Installieren, Bedienen und Warten von modernen Automatisierungstechnologien verfügen (Apt et al. 2019). Der Bedarf an solchen Arbeitskräften ist schon heute bei Weitem nicht gedeckt und wird sich zukünftig rapide erhöhen. Sollte es nicht gelingen, auf dem Arbeitsmarkt die benötigten Spezialist/innen in ausreichender Zahl bereitzustellen, könnte sich das als zentraler Hemmschuh für die Innovationsfähigkeit des Bauwesens erweisen.

Klassische Handwerksberufe, wie z. B. Maurer/in und Betonbauer/in, dürften durch die Reduzierung konventioneller Abläufe und Prozesse auf der Baustelle tendenziell eher an Bedeutung verlieren, gleichzeitig wird sich beispielsweise der Bedarf an Modulbauer/innen und -monteur/innen erhöhen, die im Umgang mit ortsfester und hochgradig automatisierter Produktionstechnik geschult werden müssen (Mechtcherine 2019, S. 135 f.). In allen Bauberufen (von Monteur/innen auf der Baustelle bis zu Architekt/innen und spezialisierten Ingenieur/innen) werden die Qualifikationsanforderungen dadurch teils massiv zunehmen, wobei es einer strukturellen Änderung und Erweiterung der Ausbildungsinhalte bedarf, und zwar sowohl in der berufsschulischen als auch der universitären Laufbahn (Apt et al. 2019; Díaz et al. 2019, S. 217). Der Umgang mit automatisierten Baumaschinen, komplexen Softwaretools, Cloudcomputing, VR und AR oder der Steuerungstechnik verschiedener Produktionsmaschinen wird übergreifend, wenn auch unterschiedlich akzentuiert und gewichtet, Teil der Ausbildung werden müssen.

Wichtig ist dabei zum einen, dass der Fokus nicht nur auf rein fachliche Fähigkeiten wie Software- und Maschinenkenntnisse gelegt wird, sondern vermehrt auch soziale Kompetenzen, wie vernetztes Denken und eine kooperative, ganzheitliche Arbeitsweise, gelehrt werden. Zum anderen müssen die Ausbildungsinhalte parallel zur technologischen Weiterentwicklung regelmäßig angepasst werden (dazu und zum Folgenden Will 2019, S. 112 f.). Unterstützt werden kann das durch moderne Ausbildungsmittel, wie beispielsweise interaktive Simulatoren oder Blended-Learning-Methoden. Lernformate dieser Art können den Umfang und die Qualität der Ausbildung unterstützen, da sie digitales Know-how nicht nur theoretisch vermitteln, sondern ganz praktisch fördern. Außerdem können an interaktiven Simulatoren auch neue und besonders kritische Situationen im Umgang mit komplexen Maschinen realitätsnah trainiert werden, was etwa für die Ausbildung zum Baugeräteführer wichtig ist – an realen Maschinen ist ein derartiges Training oft mit einem nicht unerheblichen Risiko für Mensch und Maschine verbunden.

Allerdings ist digitales Equipment teuer in der Anschaffung und erfordert sowohl entsprechend qualifiziertes Lehrpersonal als auch passende Ausbildungskonzepte. Die Modernisierung der Ausbildung muss dabei von den überbetrieblichen Ausbildungszentren, die für die Bauwirtschaft von besonderer Bedeutung sind, sowie den Berufsschulen ausgehen. Speziell Letztere haben großen Nachholbedarf bei der Digitalisierung, wie die Gewerkschaft Erziehung und Wissenschaft (George/Klinger 2019) in einer Studie kürzlich feststellte. Um sie fit für die Zukunft zu machen, reichen die im »DigitalPakt Schule«²⁰⁵ vorgesehen Mittel (insgesamt 5,5 Mrd. Euro über 5 Jahre ab 2019) demnach mit großer Sicherheit nicht aus. Hier werden deshalb verstärkte finanzielle Anstrengungen von Bund, Ländern und Kommunen benötigt, vermutlich auch weit über 2024 hinaus, um die im Koalitionsvertrag zur 19. Legislaturperiode (CDU/CSU/SPD 2018, S. 30) versprochene Modernisierung der Ausstattung sicherstellen zu können. Notwendig erscheint darüber hinaus eine Modernisierung der Ausbildungsinhalte im Sinne der zuvor skizzierten Anforderungen. Die von 1999 stammende Verordnung über die Berufsausbildung in der Bauwirtschaft (BauWiAusV) wurde durch die Bundesregierung überarbeitet, wobei das Thema Digitalisierung eine große Rolle spielte, und tritt neu im August 2022 in Kraft.²⁰⁶ Das betrifft insgesamt 19 Berufe der

²⁰⁵ <https://www.digitalpaktsschule.de/> (29.6.2022)

²⁰⁶ <https://www.bmwsb.bund.de/Webs/BMWSB/DE/themen/bauen/bauwesen/massnahmenpaket-baukostensenkung/massnahmenpaket-baukostenbegrenzung-node.html> (29.6.2022)

Bauwirtschaft.²⁰⁷ Die weitere konsequente Ausrichtung auf Automatisierung und Digitalisierung ist eine unabdingbare Voraussetzung, um diese Berufe zukunftsfest zu machen und die duale Ausbildung zu stärken. Es ist fast schon eine Selbstverständlichkeit, dass dies in enger Abstimmung mit Verbänden und Gewerkschaften (u. a. IG Bau, Industrie- und Handelskammern, Zentralverband des Deutschen Handwerks) erfolgen sollte sowie angelehnt an einschlägige Aus- und Weiterbildungsrichtlinien (wie z. B. VDI 2552 8.1²⁰⁸ oder der »BIM-Standard deutscher Architekten- und Ingenieurkammern«²⁰⁹).

Etwas anders gelagert ist die Situation bei den Universitäten und Hochschulen, die laut Art. 5 Abs. 3 Satz 1 Grundgesetz über die Freiheit der Lehre verfügen. Hier bestehen keine staatlichen Einflussmöglichkeiten, wie die akademische Ausbildung vor dem Hintergrund der Digitalisierung auszugestalten ist. Positiv zu vermerken ist, dass für Fachgebiete wie Robotik im Bauwesen oder Bauinformatik zunehmend neue Studiengänge und Fortbildungsangebote entstehen (z. B. TU Dresden 2019). Laut einer Zusammenstellung der Bundesarchitektenkammer²¹⁰ bieten mit Stand Frühjahr 2022 32 Universitäten und Fachhochschulen Ausbildungsmöglichkeiten zum Thema BIM an, teilweise basierend auf den BIM-Lehrinhalten, die der Arbeitskreis Bauinformatik für den deutschsprachigen Raum definiert hat.²¹¹ Derartige Curricula, die einheitliche Lehrstandards etablieren helfen, werden jedoch nicht nur für die universitäre Ausbildung benötigt, sie sind ebenso für die praxisnahe Fort- und Weiterbildung der Universitätsabsolventen unerlässlich (Architekt/innen, Bauingenieur/innen etc.).²¹² Grundsätzlich erfordert die Digitalisierung und insbesondere der kompetente Umgang mit BIM für alle Beteiligten die Bereitschaft, sich auf lebenslanges Lernen einzulassen. Voraussetzung dafür sind ausreichende und qualitativ hochwertige Fort- und Weiterbildungsangebote, vor allem aber auch eine entsprechende Weiterbildungskultur bei Unternehmen und ihren Mitarbeiter/innen (Kap. 3.5).

8.4 Schlussbemerkung

Die Bauwirtschaft steht vor vielfältigen Herausforderungen – Steigerung von Produktivität und Effizienz, steigende Anforderungen an Ressourcen- und Klimaschutz –, die ohne eine grundsätzliche technologische Modernisierung kaum zu meistern sein dürften. Forschungsförderung, Standardisierung/Normung und Fachkräftesicherung wurden als besonders herausragende Problem- und Handlungsfelder identifiziert, um die Zukunftsfähigkeit der Bauwirtschaft zu sichern. Zu berücksichtigen sind dabei die besonderen systemischen Rahmenbedingungen der Branche. Der Bausektor unterscheidet sich insofern maßgeblich von anderen Industriebereichen, als dieser außerordentlich langlebige Produkte schafft, die Nutzungsdauern von 50 bis 100 Jahren oder mehr haben. Hinzu kommt eine fast schon beispiellose Normung, die primär den hohen und umfangreichen sicherheitstechnischen Anforderungen an Gebäude geschuldet ist. Allein für die Zulassung inkrementeller Innovationen (etwa bei Baustoffen) ist mit einem Zeithorizont von 10 bis 15 Jahren zu rechnen.

Dies alles hat zur Folge, dass Innovationen in der Bauindustrie häufig als Risiko wahrgenommen werden, was wiederum erklärt, warum seit mehr als 150 Jahren weitgehend an bewährten Technologien festgehalten wird. Gleichzeitig wird damit auch deutlich, welche großen Herausforderungen die Digitalisierung für diesen Sektor mit sich bringt. Sie erfordert von allen Beteiligten die Bereitschaft, sich auf einen grundlegenden Strukturwandel einzulassen. Ohne Zweifel wird der digitale Wandel Zeit benötigen und die Forcierung der Technikentwicklung allein nicht ausreichend sein, damit Innovationen letztlich auch in der Praxis ankommen. Hinsichtlich der Umsetzungsfähigkeit von Innovationen in der Bauwirtschaft ist stattdessen ein wesentlich erweiterter Blickwinkel notwendig, der auch weiche kulturelle Aspekte einbezieht (Betriebsführung, Risikobereitschaft, Kommunikationskultur etc.).

²⁰⁷ nämlich Hochbaufacharbeiter/in; Ausbaufacharbeiter/in; Tiefbaufacharbeiter/in; Maurer/in; Beton- und Stahlbetonbauer/in; Feuerungs- und Schornsteinbauer/in; Bauwerksmechaniker/in für Abbruch und Betontrenntechnik; Zimmerer/in; Stuckateur/in; Fliesen-, Platten- und Mosaikleger/in; Estrichleger/in; Wärme-, Kälte- und Schallschutzisolierer/in; Trockenbaumonteur/in; Straßenbauer/in; Rohrleitungsbauer/in; Kanalbauer/in; Brunnenbauer/in; Spezialtiefbauer/in; Gleisbauer/in

²⁰⁸ <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdibs-mt-2552-blatt-81-building-information-modeling-qualifikationen-basiskenntnisse> (12.3.2021)

²⁰⁹ <https://www.bak.de/berufspolitik/digitalisierung/bim-standard-deutscher-architekten-und-ingenieurkammern/> (12.3.2021)

²¹⁰ <https://www.bak.de/berufspolitik/digitalisierung/bim-standard-deutscher-architekten-und-ingenieurkammern/> (12.3.2021)

²¹¹ <http://www.gacce.de/bim.php> (12.3.2021)

²¹² Ein Beispiel für einen einheitlichen Fort- und Weiterbildungsstandard ist der »BIM-Standard deutscher Architekten- und Ingenieurkammern« (<https://www.bak.de/berufspolitik/digitalisierung/bim-standard-deutscher-architekten-und-ingenieurkammern/>; 12.3.2021).

Angesichts der Kleinteiligkeit der Baubranche werden digitale Anwendungen nur dann erfolgreich sein, wenn sie den Anforderungen und Bedürfnissen der KMU gerecht werden. Diese sollten deshalb Gelegenheit haben, die Innovations- und Standardisierungsprozesse mitzugestalten, damit letztlich auch integrative Lösungsansätze resultieren. Dafür müssen entsprechende Strukturen geschaffen bzw. ausgebaut werden (z. B. regionale Kompetenz- und Demonstrationszentren, Informations- und Beratungsangebote, niederschwellige Fördermaßnahmen).

Bei der Modernisierung der Baubranche spielen neben wirtschaftlichen auch ökologische Ziele eine wichtige Rolle. Die Digitalisierung bietet grundsätzlich große Potenziale für eine nachhaltigere Ausrichtung des Bausektors, vor allem wenn es gelingt, Prozessinnovationen beispielsweise im Holzmodulbau oder in der BIM-Nachhaltigkeitsbewertung stärker zu etablieren. Bei der Überführung dieser Innovationen in die Praxis sowie generell beim ökologischen Bauen kommt dem Staat als großem Bauherrn eine wichtige Vorbild- und als Gesetzgeber eine wichtige Steuerungsfunktion zu. Vor allem die verstärkte Verankerung von Nachhaltigkeitsaspekten im Bauordnungsrecht wäre diesbezüglich ein wichtiges Signal. Daneben sollte aber auch der Neu- bzw. Weiterentwicklung von ressourcen- und klimaschonenderen Baustofftechnologien, insbesondere neuartige Zementssysteme, ein wichtiges Augenmerk gelten, da sich mineralische Materialien nicht komplett durch Holz substituieren lassen. Angesichts der systemisch bedingten Innovationsträgheit der Baubranche und Baustoffindustrie ist hier die Politik gefordert, entsprechende Forschungsansätze mit gezielten, langfristig orientierten und möglichst ressortübergreifend abgestimmten Förderprogrammen zu unterstützen.

9 Literatur

9.1 In Auftrag gegebene Gutachten

Díaz, J.; Busch, N.; Hofmann, M.; Krug, F.; Potpara, M. (2019): Innovative Technologien, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft – Themenfeld 2: Digitales Planen und Bauen: Anwendungsperspektiven im Wohnungs(neu)bau. Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen

Mechtcherine, V. (2019): Fertigungsverfahren und neue Verbund- und Werkstoffe für das Bauen 4.0. Dresden

Will, F. (2019): Automatisierte Baumaschinen und Robotik. GWT-TUD GmbH, Dresden

9.2 Weitere Literatur

3Dnatives (2018): 3D-Druck: Die Zukunft des Häuserbaus? 5.2.2018, www.3dnatives.com/de/zukunft-des-hauserbaus-050220181/#! (21.4.2022)

Achenbach, H.; Rüter, S. (2016): Ökobilanz-Daten für die Erstellung von Fertighäusern in Holzbauweise. Thünen Report 38, Braunschweig

Achternbosch, M. (2018): Technikfolgenabschätzung zum Thema Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen. In: Nolting, U.; Dehn, F.; Haist, M.; Link, J. (Hg.): Betone der Zukunft. Herausforderungen und Chancen. Karlsruhe

Achternbosch, M.; Dewald, U.; Nieke, E.; Sardemann, G. (2018): Why it is so hard to develop new binder systems for mass application? In: ZKG International 70(9), S. 68–79

Achternbosch, M.; Dewald, U.; Nieke, E.; Sardemann, G. (2019): Towards a low-carbon post OPC era – external framing conditions. In: ZKG International 72(9), S. 46–60

Achternbosch, M.; Kupsch, C.; Nieke, E.; Sardemann, G. (2011): Climate-Friendly Production of Cement: A Utopian Vision? Klimaschonende Produktion von Zement: eine Utopie? In: GAIA 20(1), S. 31–40

Ackerstaff, J. (2019): Modulares Bauen – ein nachhaltiges Konzept. 19.8.2019, www.deutsches-ingenieurblatt.de/archiv-bauplaner/artikel/2019/bp-7-2019/26362-modulares-bauen-ein-nachhaltiges-konzept/ (21.4.2022)

AEC/BIM (2017): Der richtige Einstieg in BIM. 8.3.2017, <https://blog.nupis.de/einstieg-open-bim-closed-bim/> (21.4.2022)

Agora Energiewende; Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin

Airteam (2018): 3D-Vermessung: LiDAR VS Photogrammetrie. 12.7.2018, www.airteam.ai/blog/14/3d-vermessung-lidar-vs-photogrammetrie/ (21.4.2022)

Albus, J. (2017): Serielle Fertigungstechniken und Bautypologien. In: DETAIL 7–8, S. 14–18

Algermissen, D. (2020): Zukünftige Schlackenerzeugung in einer CO₂-armen Stahlindustrie. In: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Senk, D.; Wotruba, H.; Antrekowitsch, H.; Pomberger, R.: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 7 – Asche, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –. Neuruppin, S. 182–191

Apt, W.; Peters, R.; Glock, G.; Goluchowicz, K.; Krabel, S.; Strach, H.; Priesack, K.; Bovenschulte, M. (2019): QuaTOQ – Qualität der Arbeit, Beschäftigung und Beschäftigungsfähigkeit im Wechselspiel von Technologie, Organisation und Qualifikation – Branchenbericht: Baugewerbe –. Forschungsbericht 522/6, Bundesministerium für Arbeit und Soziales; Institut für Innovation und Technik -iit-, Berlin

ARGE BIM4RAIL (2019): Endbericht zur wissenschaftlichen Begleitung von 13 Pilotprojekten zur Anwendung von BIM im Schienenwegebau. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin

- Asadi, E.; Li, B.; Chen, I.-M. (2018): Pictobot: A Cooperative Painting Robot for Interior Finishing of Industrial Developments. In: IEEE Robotics & Automation Magazine 25(2), S. 82–94
- Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten (AHO) (2019): Leistungen Building Information Modeling – die BIM-Methode im Planungsprozess der HOAI. Schriftenreihe des AHO, Berlin
- Azhar, S. (2011): Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. In: Leadership and Management in Engineering 11(3), S. 241–252
- B_I Baumagazin (2018): Vemcon: Teilautomatik für Kompaktbagger. 16.11.2018, www.bi-medien.de/artikel-30221-bm-vemcon-copilot-nachruestloesung.bi (21.4.2022)
- B_I Medien (2019): Bauindustrie erwartet Wachstum von 8,5 Prozent. 17.6.2019, <https://bi-medien.de/fachzeitschriften/baumagazin/wirtschaft-politik/prognose-angehoben-bauindustrie-erwartet-wachstum-von-8-5-prozent> (21.4.2022)
- BAK (Bundesarchitektenkammer) (o. J.): BIM für Architekten. Leistungsbild, Vertrag, Vergütung. Berlin, https://www.ak-berlin.de/fileadmin/user_upload/Faltblaetter/bim-bak-broschuere-web.pdf (21.4.2022)
- BAK; BIngK (Bundesingenieurkammer); Bundeskammer der ZiviltechnikerInnen (2018): Gemeinsame Erklärung der deutschen Bundesarchitektenkammer (BAK), der deutschen Bundesingenieurkammer (BIngK) und der österreichischen Bundeskammer der ZiviltechnikerInnen. www.arching.at/fileadmin/user_upload/redakteure/BIM/BIM_Erklaerung_Version_Linz.pdf (21.4.2022)
- Barankay, T. (2016): Modulare Bauformen – Trend oder Zukunftsmodell? DETAIL, 7.11.2016, https://www.detail.de/de/de_de/artikel/modulare-bauformen-trend-oder-zukunftsmodell-28818/ (21.4.2022)
- Barbosa, F.; Mische, J.; Parsons, M. (2017): Improving construction productivity. McKinsey, 18.7.2017, www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/improving-construction-productivity# (21.4.2022)
- Barlish, K.; Sullivan, K. (2012): How to measure the benefits of BIM – A case study approach. In: Automation in Construction 24, S. 149–159
- Baublatt (2019): Ferndiagnose und -wartung gehört die Zukunft. Baublatt 403, S. 33
- BAUER Maschinen GmbH (2017): BAUER Assistant Positioning System. www.ecanet.com/uploads/files/Resources/BAUER-APS.pdf (21.4.2022)
- BAUER Maschinen GmbH (2019): Bauer MC 96. Elektroantrieb. Schrobenuhausen, www.bauer.de/export/shared/documents/pdf/bma/datenblatter/MC_96_Seilbagger_DE_905_673_1.pdf (21.4.2022)
- BAUER Maschinen GmbH (2020): Assistenzsysteme. www.bauer.de/export/shared/documents/pdf/bma/datenblatter/Assistenzsysteme_DE_EN_905_806_1_2.pdf (21.4.2022)
- Baugewerbe (2019): Die autonome Walze kommt. 15.4.2019, www.baugewerbemagazin.de/maschinensteuerung/ausgezeichnetes-design---die-autonome-walze-kommt.htm (21.4.2022)
- BauInfoConsult GmbH(2019a): Deutsche Baubranche verursachte 17,8 Milliarden Euro Fehlerkosten in 2018. 19.9.2019, www.pressebox.de/pressemitteilung/bauinfoconsult-gmbh/Deutsche-Baubranche-verursachte-17-8-Milliarden-Euro-Fehlerkosten-in-2018/boxid/973860 (21.4.2022)
- BauInfoConsult GmbH (2019b): Europäischer Vergleich: Deutschland im Mittelfeld beim Einsatz von Fertigbauteilen. 1.2.2019, www.pressebox.de/pressemitteilung/bauinfoconsult-gmbh/Europaeischer-Vergleich-Deutschland-im-Mittelfeld-beim-Einsatz-von-Fertigbauteilen/boxid/940824 (21.4.2022)
- BBS (Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V.) (2018): Mineralische Bauabfälle. Monitoring 2016. Berlin

- BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) (2017): Kostengünstiges Bauen durch Vereinheitlichung und Deregulierung des Bauordnungsrechts. BBSR-Online-Publikation Nr. 27/2017, Bonn
- BBSR; Zukunft Bau (2020): Konzept für die nahtlose Integration von Building Information Modeling (BIM) in das behördliche Bauantragsverfahren. bim-bauantrag.blogs.ruhr-uni-bochum.de/wp-content/uploads/2020/09/Abschlussbericht_2020-09-14_rev1.pdf (21.4.2022)
- BDF (Bundesverband Deutscher Fertigung e. V.) (o.J.): Wirtschaftliche Lage der deutschen Fertigungindustrie. www.fertigung.de/bdf/unsere-branchen/index.html#&panel1-1&panel2-1 (21.4.2022)
- Becerik-Gerber, B.; Rice, S. (2010): The perceived value of building information modeling in the US building industry. In: *Journal of Information Technology in Construction* 15, S. 185–201
- Berkel, M. (2021): Klimaneutrale Zementproduktion. In: *VDI Nachrichten* Nr. 7, 19.2.2021, S. 18
- Bernhardt, H.; Bauerdick, J.; Mederle, M.; Reger, M. (2017): *Drohnen in der Landwirtschaft*. München
- Bertschek, I.; Niebel, T.; Ohnemus, J. (2019): *Zukunft Bau. Beitrag der Digitalisierung zur Produktivität in der Baubranche*. BBSR-Online-Publikation 9/2019, Bonn
- Betonverbände und Serviceorganisationen aus Baden-Württemberg (2019): *Geschäftsbericht 2018/2019*. Fachverband Beton- und Fertigteilewerke Baden-Württemberg e. V., Ostfildern
- Beuthan, T. (2017): BIM-Erlass des Bauministeriums: Folgen für Vergabe, Vertragsgestaltung, Honorar. *momentum Magazin*, 23.5.2017, <https://momentum-magazin.de/de/bim-erlass-des-bauministeriums-folgen-fuer-vergabe-vertragsgestaltung-honorar/> (21.4.2022)
- BIM World MUNICH (2019): *Ergebnisse der BIM Umfrage bei Teilnehmern der BIM World MUNICH 2019*. www.immo-kom.com/marktstudie/ (21.4.2022)
- Biscopio, M.; Kampen, R. (2017): *Zusammensetzung von Normalbeton – Mischungsberechnung*. InformationsZentrum Beton GmbH (Hg.), *Zement-Merkblatt Betontechnik B20*, Erkrath
- Blind, K. (2009): *Standardisierung als Katalysator für Innovationen*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., www.inno.tu-berlin.de/fileadmin/a38335100/Aktuelles/Brosch_Prof_Blind_akt.pdf (21.4.2022)
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2020a): *Daten und Fakten zum deutschen Forschungs- und Innovationssystem. Bundesbericht Forschung und Innovation 2020*. https://www.bundesbericht-forschung-innovation.de/files/BMBF_BuFI-2020_Datenband.pdf (21.4.2022)
- BMBF (2020b): *Klima schützen mit Carbonbeton*. https://www.innovation-strukturwandel.de/strukturwandel/de/report/_documents/artikel/j-m/klima-schuetzen-mit-carbonbeton.html (21.4.2022)
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2018): *Klima schützen. Werte schaffen. Ressourcen effizient nutzen*. Bonn
- BMEL (2020): *Waldschäden: Bundesministerium veröffentlicht aktuelle Zahlen*. Pressemitteilung Nr. 40/2020, 26.2.2020, Bonn/Berlin
- BMF (Bundesministerium der Finanzen) (2017): *Monatsbericht des BMF*. Berlin
- BMI (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat) (2019a): *Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden*. Berlin, www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bauen/leitfaden-nachhaltiges-bauen.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (21.4.2022)
- BMI (2019b): *BMI startet Innovationsprogramm Zukunft Bau*. Pressemitteilung, 22.7.2019, www.bmi.bund.de/SharedDocs/pressemitteilungen/DE/2019/07/20190715-clb-berlin-pm-zukunft-bau.html (21.4.2022)
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2016a): *Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Berlin

- BMU (2016b): Bundesregierung beschließt Wohnungsbau-Offensive. Pressemitteilung Nr. 051/16, 9.3.2016, www.bmu.de/pressemitteilung/bundesregierung-beschliesst-wohnungsbau-offensive/ (21.4.2022)
- BMU; BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2017): Bauministerium und Wirtschaftsministerium initiieren den Branchendialog »Digitaler Hochbau«. Pressemitteilung Nr. 305/17, 14.9.2017, www.bmu.de/pressemitteilung/bauministerium-und-wirtschaftsministerium-initiieren-den-branchendialog-digitaler-hochbau/ (21.4.2022)
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2015): Bericht der Baukostensenkungskommission im Rahmen des Bündnisses für bezahlbares Wohnen und Bauen. Berlin
- BMUB (2016): Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden. Berlin
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (2011): Innovationsstrategien am Bau im internationalen Vergleich. BMBV-Online-Publikation Nr. 07/2011, Bonn
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2015): Stufenplan Digitales Planen und Bauen. Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken. Berlin
- BMVI (2017): Umsetzung des Stufenplans Digitales Planen und Bauen. Erster Fortschrittsbericht. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/bim-umsetzung-stufenplan-erster-fortschrittsbe.pdf?__blob=publicationFile (21.4.2022)
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2018): 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Innovationen für die Energiewende. Berlin
- BMWi (2019): Strategie gegen Fachkräftemangel in der Bauwirtschaft. Bundesregierung diskutiert Maßnahmen mit Bauverbänden und Baugewerkschaft. Pressemitteilung, 13.3.2019, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2019/20190313-strategie-gegen-fachkraeftemangel-in-der-bauwirtschaft.html (21.4.2022)
- BMWi (2020): Altmaier: Wir unterstützen Normungsarbeit von KMU jetzt finanziell. Technologieförderprogramm WIPANO ausgebaut und bis Ende 2023 verlängert. Pressemitteilung, 3.1.2020, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200103-altmaier-wir-unterstuetzen-normungsarbeit-von-kmu-jetzt-finanziell.html (21.4.2022)
- BMWi; BMBF (2019): Das Projekt GAIA-X. Eine vernetzte Dateninfrastruktur als Wiege eines vitalen, europäischen Ökosystems. Berlin, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/das-projekt-gaia-x.pdf?__blob=publicationFile&v=16 (21.4.2022)
- Bock, T. (2012): Automatisierte Hochbaustellen. Baurobotik/Hightech. In: IBR – Information zur Bau-Rationalisierung 41(1), S. 21–26
- Bock, T.; Linner, T. (2011): Von der automatisierten Vorfertigung zum Robotereinsatz auf der Baustelle. In: IBR – Information zur Bau-Rationalisierung 40(5/6), S. 16–18
- BOMAG (2012): BOMAG Verdichtungsmess- und Dokumentationssysteme. Die gläserne Baustelle zum Greifen nah. <https://docplayer.org/5837360-Technik-bomag-verdichtungsmess-und-dokumentationssysteme-die-glaeserne-baustelle-zum-greifen-nah.html> (21.4.2022)
- Borchardt, A.; Schwerm, D. (2000): Modernes Bauen mit Betonfertigteilen. Stand und Entwicklungstendenzen im Hochbau. In: Beton- und Stahlbetonbau 95(10), S. 592–596
- Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (2015): Building Information Modeling. Wiesbaden
- Borrmann, A.; Lang, W.; Petzold, F. (2018): Digitales Planen und Bauen. Schwerpunkt BIM. Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V. www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Planung-und-Koordination/2018/Downloads/Studie-Digitales-Planen-und-Bauen.pdf (21.4.2022)

- Bosch, G.; Zühlke-Robinet, K. (1999): Der Bauarbeitsmarkt in Deutschland. Zum Zusammenhang von Produktionsstrukturen, Arbeitsmarkt und Regulierungssystem. In: Industrielle Beziehungen 6(3), S. 239–267
- Bosch, G.; Zühlke-Robinet, K. (2000): Der Bauarbeitsmarkt. Soziologie und Ökonomie einer Branche. Frankfurt a.M./New York
- Bosold, D.; Grünewald, A. (2020): Risse im Beton. InformationsZentrum Beton GmbH (Hg.), Zement-Merkblatt Betontechnik B18, Erkrath
- Braun, S.; Rieck, A.; Bullinger, S.; Köhler-Hammer, C.; Walz, A.; Bauer, W. (2019): FUCON 4.0 – nachhaltiges Bauen durch digitale und parametrische Fertigung. Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 2995, Stuttgart
- Braun, S.; Rieck, A.; Köhler-Hammer, C. (2015): Ergebnisse der BIM-Studie für Planer und Ausführende. »Digitale Planungs- und Fertigungsmethoden«. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart, <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/5ce84f21-d304-451b-a37b-6c0680da4933/content> (21.4.2022)
- Breitenbücher, R. (2021): Die neue Normengeneration DIN 1045 – Wegweiser hin zu einer verbesserten Betonbauqualität. Ruhr-Universität Bochum, Bochum
- Brinkmeier, B. (2016): Geniale Kabine: Steuerungszentrale mit Massagefunktion. B_I Medien, 15.4.2016, www.bi-medien.de/artikel-8964-bm-genius-cab-sitz-von-grammer.bi (21.4.2022)
- Bryde, D.; Broquetas, M.; Volm, J. (2013): The project benefits of Building Information Modelling (BIM). In: International Journal of Project Management 31(7), S. 971–980
- BRZ Organisation und Bauinformatik (2016): IT-Trends in der Baubranche 2016. Status quo und Perspektiven. Nürnberg
- Bundesregierung (2017): Dritter Bericht der Bundesregierung über die Wohnungs- und Immobilienwirtschaft in Deutschland und Wohngeld- und Mietenbericht 2016. Unterrichtung durch die Bundesregierung. Deutscher Bundestag, Drucksache 18/13120, Berlin
- Bundesregierung (2018a): Einführung von Building Information Modeling im Hoch- und Infrastrukturbau. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Daniel Föst, Frank Sitta, Grigorios Aggelidis, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/5066 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/6028, Berlin
- Bundesregierung (2018b): Forschung und Innovation für die Menschen. Die Hightech-Strategie 2025. Berlin, www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Forschung_und_Innovation_fuer_die_Menschen.pdf (21.4.2022)
- Bundesregierung (2018c): Gemeinsame Wohnraumoffensive von Bund, Ländern und Kommunen. Ergebnisse des Wohngipfels am 21. September 2018 im Bundeskanzleramt. www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2018/ergebnisse-wohngipfel.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (21.4.2022)
- Bundesregierung (2018d): Wohn- und Mietgipfel im Kanzleramt. 15.9.2018, www.bundesregierung.de/bregde/aktuelles/wohn-und-mietgipfel-im-kanzleramt-1523918 (21.4.2022)
- Bundesregierung (2019): Wohnungspolitische Bilanz der Bundesrepublik Deutschland seit 2006. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Caren Lay, Dr. Gesine Löttsch, Lorenz Gösta Beutin, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE – Drucksache 19/12348 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/12786, Berlin
- Bundesregierung (2021): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021. Berlin, www.bundesregierung.de/resource/blob/998006/1873516/3d3b15cd92d0261e7a0bcde8f43b7839/2021-03-10-dns-2021-finale-langfassung-nicht-barrierefrei-data.pdf?download=1 (21.4.2022)
- Buswell, R.; Leal de Silva, W.; Jones, S.; Dirrenberger, J. (2018): 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. In: Cement and Concrete Research 112, S. 37–49

- Buswell, R.; Soar, R.; Gibb, A.; Thorpe, A. (2007): Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. In: Automation in Construction 16(2), S. 224–231
- Butz, C.; Ergün, B. (2016): Industrie 4.0 in der Bauwirtschaft – Potenziale und Herausforderungen von Building Information Modeling (BIM) für kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Beuth Hochschule für Technik Berlin, Bericht Nr. 02/2016, Berlin
- Butzin, A.; Rehfeld, D. (2009): Innovationsbiographien in der Bauwirtschaft. Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 2718, Stuttgart
- Cab Concept Cluster (2016): Success built on cooperation. https://www.cabconceptcluster.com/wp-content/uploads/2016/04/Genius_Cab_web_DE.pdf (21.4.2022)
- Cao, D.; Li, H.; Wang, G. (2017): Impacts of building information modeling (BIM) implementation on design and construction performance: a resource dependence theory perspective. In: Frontiers of Engineering Management 4(1), S. 20–34
- Cao, V. (2019): Digitizing construction sites with Scaled Robotics. TechCrunch, 2.8.2019, <https://techcrunch.com/2019/08/02/digitizing-construction-sites-with-scaled-robotics/> (21.4.2022)
- Castagnino, S.; Rothballer, C.; Renz, A.; Filitz, R.; Gerbert, P. (2016): The Transformative Power of Building Information Modeling. 8.5.2016, www.bcg.com/de-de/publications/2016/engineered-products-infrastructure-digital-transformative-power-building-information-modeling (21.4.2022)
- Caterpillar (2017): Der neue Cat® 988K XE Radlader mit elektrischem Antrieb bietet eine höhere Verbrauchsleistung und geringere Gesamtkosten der Investition. <https://press.lectura.de/de/article/der-neue-cat-988k-xe-radlader-mit-elektrischem-antrieb-bietet-eine-hoehere-verbrauchsleistung-und-geringere-gesamtkosten-der-investition/38529> (21.4.2022)
- CDU/CSU; SPD (2018): Ein neuer Aufbruch für Europa. Eine neue Dynamik für Deutschland. Ein neuer Zusammenhalt für unser Land. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 19. Legislaturperiode. Berlin, www.cdu.de/system/tdf/media/dokumente/koalitionsvertrag_2018.pdf?file=1 (21.4.2022)
- Cepeda, R. (2012): Wood-based 3D printing for space innovation in emergency and social housing production. Thesis, University of British Columbia. Vancouver
- Chelson, D. (2010): The Effects of Building Information Modeling on Construction Site Productivity. Dissertation, College Park
- Chen, Y.; Veer, F.; Çopuroğlu, O. (2017): A critical review of 3D concrete printing as a low CO₂ concrete approach. In: Heron 62(3), S. 167–194
- Cheng, T.; Alstrom, Å. (2019): Volvo ECR25 Electric Top Benefits. VOLVO, 13.8.2019, <https://www.volvoce.com/global/en/news-and-events/news-and-stories/2019/volvo-ecr25-electric-top-benefits/> (21.4.2022)
- Chua, Y.; Liew, J.; Pang, S. (2018): Robustness of Prefabricated Prefinished Volumetric Construction (PPVC) High-rise Building. Universitat Politècnica de València, Valencia, S. 913–919
- Cohrs, H.-H. (2017): Der Mensch ist alternativlos. baumaschinendienst, 30.8.2017, www.baumaschinendienst.de/artikel/der-mensch-ist-alternativlos-6025/ (21.4.2022)
- Concrete Construction (2015): Mobile drilling robot from nLink. 18.2.2015, www.concreteconstruction.net/products/mobile-drilling-robot-from-nlink_c (21.4.2022)
- Coppola, M. (2012): Industrielle Beziehungen zwischen Konflikt und Stabilität. Eine qualitative Studie über den Arbeitskonflikt um den Landesmantelvertrag im Bauhauptgewerbe 2007/2008. Dissertation, Freiburg
- Coss, M. (2017): Digitaler Wandel in der Bauindustrie. Munich Re, 3.7.2017, www.munichre.com/topics-online/de/infrastructure/digital-trends-construction-industry.html (21.4.2022)
- Dainty, A.; Leiringer, R.; Fernie, S.; Harty, C. (2017): BIM and the small construction firm: a critical perspective. In: Building Research & Information 45(6), S. 696–709

- DB AG (Deutsche Bahn AG) (2019): BIM-Strategie. Implementierung von Building Information Modeling (BIM) im Vorstandsressort Infrastruktur der Deutschen Bahn AG.
www.deutschebahn.com/resource/blob/3985436/edf737542c2ee3bc3ea17173f5af33aa/Implementierung-von-BIM-im-VR-I-data.pdf (21.4.2022)
- DBZ (Deutsche Bauzeitschrift) (2018): Sonderheft »Modulbau«. Gütersloh
- DBZ (2019): Shotcrete 3D Printing (SC3DP) – 3D-Drucken von großformatigen Betonbauteilen. In: DBZ 02/2019, www.dbz.de/artikel/dbz_Shotcrete_3D_Printing_SC3DP_3D-Drucken_von_grossformatigen_3303061.html (21.4.2022)
- De Laubier, R.; Wunder, M.; Witthöft, S.; Rothballer, C. (2018): Will 3D printing remodel the construction industry? The Boston Consulting Group, <https://www.bcg.com/de-de/publications/2018/will-3d-printing-remodel-construction-industry> (21.4.2022)
- De Schutter, G.; Lesage, K.; Mechtcherine, V.; Nerella, V.; Habert, G.; Agusti-Juan, I. (2018): Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials. In: Cement and Concrete Research 112, S. 25–36
- Dehn, F.; Nolting, U.; Link, J.; Mercedes Kind, V. (2020): Ressourceneffizienter Beton – Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis: 15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
- Dellmann, K.; Pedell, K. (1994): Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. Stuttgart
- Deutsche Betonbauteile (2019): Pressemitteilung. Gründung Deutsche Betonbauteile. Betonfertigteilverbände starten gemeinsame wirtschaftspolitische Interessenvertretung. Burgwedel
- Deutsche Telekom AG (2016a): Digitalisierungsindex Mittelstand. Der digitale Status quo des deutschen Mittelstandes. www.digitalisierungsindex.de/wp-content/uploads/2016/11/Digitalisierungsindex_Gesamt.pdf (26.6.2020)
- Deutsche Telekom AG (2016b): Digitalisierungsindex Mittelstand. Der digitale Status quo im deutschen Baugewerbe. www.digitalisierungsindex.de/wp-content/uploads/2016/11/Digitalisierungsindex_Baugewerbe.pdf (26.6.2020)
- Deutsche Telekom AG (2017): Digitalisierungsindex Mittelstand. Der digitale Status quo im deutschen Baugewerbe. www.digitalisierungsindex.de/wp-content/uploads/2017/11/Digitalisierung-Studie-Baugewerbe-web.pdf (26.6.2020)
- Deutsche Telekom AG (2019a): Digitalisierungsindex Mittelstand 2018/2019. Der digitale Status quo des deutschen Mittelstandes. www.digitalisierungsindex.de/wp-content/uploads/2019/11/techconsult_Telekom_Digitalisierungsindex_2019_GESAMTBERICHT.pdf (26.6.2020)
- Deutsche Telekom AG (2019b): Digitalisierungsindex Mittelstand 2018/2019. Der digitale Status Quo im deutschen Baugewerbe. www.digitalisierungsindex.de/wp-content/uploads/2019/11/techconsult_Telekom_Digitalisierungsindex_2019_Baugewerbe.pdf (26.6.2020)
- Deutz AG (2019): Investor presentation. Präsentation, Köln,
www.deutz.com/fileadmin/contents/com/ir/Presentations/EN/2019/DEUTZ_Investor_Presentation_February_2019.pdf (21.4.2022)
- Dewald, U.; Achternbosch, M. (2016): Why more sustainable cements failed so far? Disruptive innovations and their barriers in a basic industry. In: Environmental Innovation and Societal Transitions 19, S. 15–30
- Die Deutsche Bauindustrie (2018): Kapazitätssituation im deutschen Bauhauptgewerbe. Schwerpunkt Wohnungsbau. Positionspapier, Berlin
- DIN (DIN Deutsches Institut für Normung) (2020): Startschuss für Normungsroadmap BIM. 24.6.2020,
www.din.de/de/din-und-seine-partner/presse/mitteilungen/startschuss-fuer-normungsroadmap-bim-721010 (21.4.2022)

- Dixit, S.; Mandal, S.; Thanikal, J.; Saurabh, K. (2019): Evolution of studies in construction productivity: A systematic literature review (2006–2017). In: *Ain Shams Engineering Journal* 10(3), S. 555–564
- Dong, Y.; Milentis, J.; Pramanik, A. (2018): Additive manufacturing of mechanical testing samples based on virgin poly (lactic acid) (PLA) and PLA/wood fibre composites. In: *Advances in Manufacturing* 6(1), S. 71–82
- Doosan (2019): Neue Vorbereitung für Leica, Trimble and Xsite für Doosan Bagger. 16.4.2019, <https://press.lectura.de/de/article/neue-vorbereitung-fuer-leica-trimble-and-xsite-fuer-doosan-bagger/46560> (21.4.2022)
- Dorffmeister, L. (2019): Bautätigkeit in Europa verliert deutlich an Dynamik. Ausgewählte Ergebnisse der Euroconstruct-Winterkonferenz 2019. Branchen und Sektoren. In: *ifo Schnelldienst* 72, S. 54–61
- Dorffmeister, L. (2020): Europäisches Bauvolumen bricht 2020 um 11,5 Prozent ein. Ausgewählte Ergebnisse der EUROCONSTRUCT – Sommerkonferenz 2020. In: *ifo Schnelldienst* 73(7), S. 77–82
- Dupraz, P. (2013): Wohnhaus in Colloges-sous-Salève. In: *DETAIL* 5, S. 524–526
- Dutczak, M. (2018): Entscheidend ist die Qualität! Modulbauweise als Alternative zu konventionellem Bauen. In: *DBZ Sonderheft* 6, S. 4–7
- DVW (Der Deutsche Verein für Vermessungswesen e. V. – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement); Runder Tisch GIS e. V. (2019): Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0, Bühl/München, www.dvw.de/images/anhang/1162/11dvw-merkblattleitfadengeodaesieundbim2019.pdf (21.4.2022)
- E.VITA (2017): Baustelle: So baggert man den Energiekosten-Berg kleiner. 18.10.2017, www.evita-energie.de/blog/baustelle-so-baggert-man-den-energiekosten-berg-kleiner.php (21.4.2022)
- EBAWE Anlagentechnik GmbH (2014): Hochmoderne Umlaufanlage zur Produktion von Betonfertigteilen in China. In: *BWI – BetonWerk International* 5, S. 234–240
- Ebert, E. (2020): Schwache Produktivität am Bau: wo liegen die Potenziale für das effiziente Bauen? 16.7.2020, Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Planen und Bauen, <https://www.kompetenzzentrum-planen-und-bauen.digital/kos/WNetz?art=News.show&id=756> (21.4.2022)
- Edwards, D. (2019): Scaled Robotics integrates mobile robot into construction site. *Robotics & Automation*, 3.9.2019, <https://roboticsandautomationnews.com/2019/09/03/scaled-robotics-integrates-mobile-robot-into-construction-site/25325/> (21.4.2022)
- Egger, M.; Hausknecht, K.; Liebich, T.; Przybylo, J. (2013): BIM-Leitfaden für Deutschland. Information und Ratgeber. https://www.akbw.de/fileadmin/download/Freie_Dokumente/Kammer/BIM_Leitfaden_f%C3%BCr_Deutschland_Endbericht.pdf (21.4.2022)
- Ehle, P. (2019): BIM im Infrastrukturbau. *AEC/BIM*, 7.8.2019, <https://blog.nupis.de/bim-im-infrastrukturbau/> (21.4.2022)
- Ehm, M.; Hesse, C. (2014): 3D-Laserscanning zur Erfassung von Gebäuden – Building Information Modeling (BIM). In: *Bautechnik* 91(4), S. 243–250
- EK (Europäische Kommission) (2003): Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. (2003/361/EG). In: *Amtsblatt der Europäischen Union*, Brüssel, S. L 124/36–L 124/38
- EK (2011): Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa. KOM(2011) 571 endgültig, Brüssel
- Emprechtinger, F. (2018): Innovationen Baustoffe und -elemente. Wie der modulare Hausbau die Bauindustrie beeinflusst. *Lead Innovation*, 20.11.2018, www.lead-innovation.com/blog/modulare-hausbau (21.4.2022)
- Ensenmeier, K. (o. J.): CAD, CAM und Building Information Modeling. <https://handwerk-digital.org/cad-cam> (21.4.2022)

- Eschenbruch, K.; Malkwitz, A. (2014): Maßnahmenkatalog zur Nutzung von BIM in der öffentlichen Bauverwaltung unter Berücksichtigung der rechtlichen und ordnungspolitischen Rahmenbedingungen. Gutachten zur BIM-Umsetzung. Forschungsprogramm Zukunft Bau.
www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/bim-massnahmenkatalog.pdf?__blob=publicationFile (21.4.2022)
- EUROCONSTRUCT (2019): New challenges for European construction after 2020. 29.12.2019,
www.euroconstruct.org/ec/press/pr2019_88 (21.4.2022)
- Eurostat (2020): BIP pro Kopf in den Regionen der EU. Regionales BIP pro Kopf 2018 reichte im Jahr 2018 von 30 % bis 263 % des EU-Durchschnitts. Regionale Unterschiede bei der Arbeitsproduktivität sind geringer. Pressemitteilung, 5.3.2020, https://ec.europa.eu/eurostat/documents/portlet_file_entry/2995521/1-05032020-AP-DE.pdf/4df03011-0b54-98fb-4e44-76ed23d2df8c (21.4.2022)
- Fabricius, M. (2018): Maschine könnte bald den Menschen am Bau ersetzen. Welt, 11.10.2018,
www.welt.de/finanzen/immobilien/article181895232/Bauroboter-Maschine-koennte-bald-den-Menschen-am-Bau-ersetzen.html (21.4.2022)
- Faulstich, M.; Vodegel, S.; Fedianina, E.; Franke, M.; Degener, P.; Aigner, J.; Reh, K. (2016): Umweltschutzgerechte Verwertung nicht etablierter Stoffströme in Abfallverbrennungsanlagen. Umweltbundesamt (Hg.), Texte 18/2015, Dessau-Roßlau
- Favier, A.; De Wolf, C.; Scrivener, K.; Habert, G. (2018): A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry: Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050. ETH Zürich,
www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/301843/AB_SP_Decarbonisation_report_Final-v2.pdf?sequence=14&isAllowed=y (21.4.2022)
- Feifel, S.; Walk, W.; Wursthorn, S. (2010): Die Ökobilanz im Spannungsfeld zwischen Exaktheit, Durchführbarkeit und Kommunizierbarkeit. In: *Environmental Sciences Europe* 22(1), S. 46–55
- Feucht, T.; Lange, J.; Erven, M. (2019): 3-D-Printing with Steel: Additive Manufacturing of Connection Elements and Beam Reinforcements. In: *ce/papers* 3(3–4), S. 343–348
- Forschungskuratorium Textil e. V. (2014): Bauen mit Fasern. Textilbeton und -membranen für die Architektur des 21. Jahrhunderts. www.textilforschung.de/uploads/2014-03-21-17-31-19-41-1.pdf?utm_source=baulinks&utm_campaign=baulinks (21.4.2022)
- Fraunhofer IAP (Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung) (2019): Biobasierte Carbonfasern – Nachhaltige Hochleistung für den Leichtbau. Potsdam-Golm, 1.10.2019,
www.iap.fraunhofer.de/de/Pressemitteilungen/2019/biobasierte-carbonfasern.html (21.4.2022)
- Fuchs, F. (2020): Druckfrisch. In: *Süddeutsche Zeitung* 18.11.2020, S. 30
- FVB (Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e. V.) (2015): Ermittlung des Baumaschinenbestandes in Deutschland. Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e. V. Nr. 47,
https://fvb.vdma.org/documents/6296991/19334646/47_FVB_Baumaschinenbestand_2015.pdf/cd6e62cb-abe5-437f-9f76-47452b1c6243 (21.4.2022)
- García de Soto, B.; Agustí-Juan, I.; Hunhevicz, J.; Joss, S.; Graser, K.; Habert, G.; Adey, B. (2018): Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall. In: *Automation in Construction* 92, S. 297–311
- Gärtner, S.; Hienz, G.; Keller, H.; Paulsch, D. (2012): Ökobilanz der kaskadierten Nutzung nachwachsender Rohstoffe am Beispiel Holz – eine Einordnung. In: *UmweltWirtschaftsForum* 20(2–4), S. 155–164
- George, R.; Klinger, A. (2019): Mehrbedarfe für eine adäquate digitale Ausstattung der berufsbildenden Schulen im Lichte des Digitalpakts. Gewerkschaft Erziehung und Wissenschaft, Frankfurt a.M.,
www.gew.de/fileadmin/media/publikationen/hv/Bildung-digital/2019-09-Digitale-Ausstattung-web.pdf (21.4.2022)

- Gerichtshof der Europäischen Union (2019): Urteil des Gerichtshofs (Vierte Kammer). 4. Juli 2019.
»Vertragsverletzung – Dienstleistungen im Binnenmarkt – Richtlinie 2006/123/EG – Art. 15 – Art. 49 AEUV – Niederlassungsfreiheit – Honorare für Architekten und Ingenieure für Planungsleistungen – Mindest- und Höchstsätze«. <https://www.aho.de/wp-content/uploads/2019/07/17377-Urteil-040719.pdf> (21.4.2022)
- Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. (2015): Additive manufacturing technologies. 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. New York u. a. O.
- Giel, B.; Issa, R. (2013): Return on Investment Analysis of Using Building Information Modeling in Construction. In: *Journal of Computing in Civil Engineering* 27(5), S. 511–521
- Goger, G.; Piskernik, M.; Urban, H. (2018): Studie: Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen. Berichte aus Energie- und Umweltforschung Nr. 2/2018, Wien
- Grasmeder, J. (2019): Hochleistungspolymere – eine Einführung (Teil 1). Victrex, 20.8.2019, www.victrex.com/de/global/blog-posts/2017/high-performance-polymers-explained-part-1 (21.4.2022)
- Gray, D. (2019): No one behind the wheel: The new workforce driving Australia’s mines. *The Sydney Morning Herald*, 27.4.2019, www.smh.com.au/business/companies/no-one-behind-the-wheel-the-new-workforce-driving-australia-s-mines-20190411-p51dd2.html (21.4.2022)
- Grayson, W. (2018): How Komatsu’s autonomous haul trucks work and what it takes to implement the technology at a working mine. *Equipment World*, 3.10.2018, www.equipmentworld.com/how-komatus-autonomous-haul-trucks-work-and-what-it-takes-to-implement-the-technology-at-a-working-mine/ (21.4.2022)
- Grieser, F. (2019): Business mit 3D-Druck. *Mittelstandswiki*, 20.11.2019, www.mittelstandswiki.de/wissen/Additive_Fertigung (21.4.2022)
- Grimm, R. (2018a): Was bedeutet serielles Bauen? Fassade und Massivbau. *BaustoffWissen*, 9.1.2018, www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/fassade_und_massivbau/serielles-bauen-definition-prototypen-modulbauweise-projektbeispiele-gewobag-berlin-spandau-woodie-hamburg-wilhelmsburg/ (21.4.2022)
- Grimm, R. (2018b): Was sind BIM-Objekte? *BaustoffWissen*, 18.1.2018, www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/fassade_und_massivbau/bim-objekte-definition-bim-bibliotheken-building-information-modeling-planungssoftware/ (21.4.2022)
- Grimm, R. (2019): Mauerziegel drucken. *BaustoffWissen*, 10.1.2019, www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/forschung_technik_trends/mauerwerksziegel-3d-drucker-forschungsprojekt-unipor-tu-darmstadt-bau-2019/ (21.4.2022)
- Gruber, U.; Donaubaue, A.; Krause, K.-U. (2019): BIM und GIS Interoperabilität – Datenformate, Standards, Integrationsmöglichkeiten. In: *DVW/Runder Tisch GIS (Hg.): Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0, Buhl/München*, S. 59–86
- Grundke, M.; Wildemann, H. (2017): *Modularisierung im Hausbau*. München
- Guntermann, B. (1997): *Schlüsselfertiges Bauen – Logistik im Ausbau bei schlüsselfertiger Bauausführung*. Diplomarbeit, Dortmund
- Haberle, H.; Stimpel, R. (2016): »Partnerschaft auf Augenhöhe«. *Deutsches Architektenblatt*, 30.6.2016, www.dabonline.de/2016/06/30/partnerschaft-auf-augenhoehe-interview-bauindustrie-hoai-bauherr-wettbewerbe-haftung/ (21.4.2022)
- Hack, N.; Wangler, T.; Mata-Falcón, J.; Dörfler, K.; Kumar, N.; Walzer, A.; Graser, K.; Reiter, L.; Richner, H.; Buchli, J.; Kaufmann, W. et al. (2017): *Mesh Mould: An On Site, Robotically Fabricated, Functional Formwork*. 11th High Performance Concrete and Concrete Innovation Conference. Tromsø

- Hafner, A.; Rüter, S.; Ebert, S.; Schäfer, S.; König, H.; Cristofaro, L.; Diederichs, S.; Kleinhenz, M.; Krechel, M. (2017): Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau). Ruhr-Universität, Bochum
- Halatsch, J. (2019): Der digitale Zwilling macht nachhaltiges Bauen möglich. In: DVW/Runder Tisch GIS (Hg.): Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0, Bühl/München, S. 191–193
- Haufe Online (2018): Normen und Wohnungsbau: Die Niederlande machen es besser. 21.9.2018, www.haufe.de/immobilien/entwicklung-vermarktung/marktanalysen/normen-und-wohnungsbau-die-niederlande-machen-es-besser_84324_471812.html (12.3.2021)
- HDB (Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V.) (2019): Bauwirtschaft im Zahlenbild 2019. Berlin, https://www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Zahlen_Fakten/Bauwirtschaft-im-Zahlenbild/Bauwirtschaft-im-Zahlenbild_2019-A5-final.pdf (21.4.2022)
- HDB (2020a): Stellungnahme im Rahmen der öffentlichen Anhörung zum Thema Digitalisierung des Bauens am 15.1.2020. Deutscher Bundestag, Ausschuss für Bau, Wohnen, Stadtentwicklung und Kommunen, Ausschussdrucksache 19(24)161, Berlin
- HDB (2020b): Bauwirtschaft im Zahlenbild 2020. Berlin, https://www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Zahlen_Fakten/Bauwirtschaft-im-Zahlenbild/Bauwirtschaft-im-Zahlenbild_2020_final_Inhalt_verlinkt.pdf (21.4.2022)
- Heinkel Modulbau GmbH (2020): European Championships München 2022: Heinkel Modulbau (Blaubeuren) errichtet dreigeschossiges Bürogebäude in Modulbauweise im Olympiapark. 2.7.2020, https://heinkel-modulbau.de/wp-content/uploads/1/2020/07/HEI_Olympiapark_Muenchen_02072020.pdf (21.4.2022)
- Heipke, C. (2017): Photogrammetrie und Fernerkundung – eine Einführung. In: Heipke, C. (Hg.): Photogrammetrie und Fernerkundung. Berlin/Heidelberg, S. 1–27
- Hellmann, R. (2019): Vom Laserscan zum BIM-Modell – Bestandsdaten effizient in BIM-Projekte überführen. In: DVW/Runder Tisch GIS (Hg.): Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0, Bühl/München, S. 129–131
- Helmus, M.; Meins-Becker, A.; Kelm, A.; Quessel, M.; Kaufhold, M.; Röhr, C.; Pilling, A. (2018): BIM-Leitfaden für den Mittelstand. Wie viel BIM trägt ein Mittelstandsprojekt? Zukunft Bauen 19, Bonn
- Henke, K.; Talke, D.; Winter, S. (2016): Additive Manufacturing of Building Elements by Extrusion of Wood Concrete. World Conference on Timber Engineering, Wien
- Hennig, P.; Schnell, S.; Riedel, T. (2019): Rohstoffquelle Wald – Holzvorrat auf neuem Rekord. In: AFZ-DerWald 74(14), S. 24–27
- Henßler, S. (2020): Holcim bringt erste vollelektrische 5-Achs-Betonfahrmischer auf die Baustelle. Elektroauto-News, 15.2.2020, www.elektroauto-news.net/2020/holcim-vollelektrische-5-achs-betonfahrmischer-baustelle (21.4.2022)
- Hermann, K. (1993): Schalungstrennmittel. In: Cementbulletin 60–61(15), S. 1–8
- Hernández, H.; Grassano, N.; Tübke, A.; Amoroso, S.; Csefalvay, Z.; Gkotsis, P. (2020): The 2019 EU Industrial R&D Investment Scoreboard. EUR 30002 EN, Europäische Kommission, Luxemburg
- Herrmann, E.; Westphal, T. (2017): Building Information Modeling I Management Band 2. Digitale Planungswerkzeuge in der interdisziplinären Anwendung. München
- Hintersteiner, K. (2015): Kennzeichen und Aspekte des industriellen Bauens – Anwendbarkeit im Holzbau. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz
- Hirsch-Kreinsen, H. (2008): »Low-Technology«: A Forgotten Sector in Innovation Policy. In: Journal of Technology Management & Innovation 3(3), S. 11–20
- Hohmann, A. (2019): Ökobilanzielle Untersuchung von Herstellungsverfahren für CFK-Strukturen zur Identifikation von Optimierungspotentialen. Technische Universität München, Garching
- Holcim (Deutschland) AG (2009): Betonpraxis. Der Weg zu dauerhaftem Beton. Sehnde-Höver

- Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e. V. (2020): Lagebericht 2020. Berlin
- Horstmann, V. (2018): Vergleichende Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von Carbonbeton. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar
- Hosseini, M.; Banihashemi, S.; Chileshe, N.; Namzadi, M.; Udaaja, C.; Rameezdeen, R.; McCuen, T. (2016): BIM adoption within Australian Small and Medium-sized Enterprises (SMEs): an innovation diffusion model. In: CEB 16(3), S. 71–86
- Ingenieurbau Online (2018): Nachhaltiges Bauen mit BIM. 14.12.2018, www.ingenieurbau-online.de/news/newsdetail/nachhaltiges-bauen-mit-bim (21.4.2022)
- IRP (International Resource Panel) (2017): Assessing global resource use: A systems approach to resource efficiency and pollution reduction. A Report of the International Resource Panel. UNEP (United Nations Environment Programme), Paris
- Jack, S. (2017): Robotergestützte Automation in der Element-Produktion. Güdel AG, Langenthal, www.forum-holzbau.com/pdf/18_IHF2017_Guedel.pdf (21.4.2022)
- Jacqueline O. (2019): MIT-Forscher entwickeln Technologie für transparentes, 3D-gedrucktes Glas. 3Dnatives 15.1.2019, <https://www.3dnatives.com/de/3d-gedrucktes-glas-150120191/#!> (21.4.2022)
- Jekko S.r.l. (2019): Product Catalog Vacuum & Tools. www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/3471/Cata--769-logo-manipuladores-de-cristales-Jekko.pdf (15.9.2021)
- Jeschke, S.; Jakobs, E.-M.; Dröge, A. (2013): Exploring Uncertainty. Ungewissheit und Unsicherheit im interdisziplinären Diskurs. Textlinguistik & Technikkommunikation, Wiesbaden
- Joswig, M. (2020): Die digitale Baugenehmigung. In: Stember, J.; Eixelsberger, W.; Spichiger, A.; Neuron, A.; Habel, F.-R.; Wundara, M. (Hg.): Handbuch E-Government. Technikinduzierte Verwaltungsentwicklung. Wiesbaden, S. 1–21
- Jung-Lundberg, S. (2019): Anwendung von Building Information Modeling (BIM) im Bereich kleinerer und mittelgroßer Wohnungsbaumaßnahmen. Entwicklung eines Modells zur Ermittlung des wirtschaftlichen und bauprozessualen Nutzens. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Universität der Bundeswehr München, München
- Kaden, R.; Seuß, R.; Kolbe, T. (2019): Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu CAD und GIS. In: DVW/Runder Tisch GIS (Hg.): Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0, Buhl/München, S. 49–57
- Kai, L.; Hui, Z.; Yanlin, G.; Zhi, Y. (2010): Principle of FDM Rapid Prototyping of PE/Wood Flour Composites. In: Journal of Northern Forestry University 38(10), S. 126–128
- Kappel, M. (2012): Angewandter Straßenbau. Straßenfertiger im Einsatz. Wiesbaden
- Kappelt, H. (2020): Von Status quo bis Paradigmenwechsel. DETAIL, 17.1.2020, https://www.detail.de/de/de_de/von-status-quo-bis-paradigmenwechsel-35157 (21.4.2022)
- Karl, C.; Musialek, A.; Malkwitz, A. (2015): Das Berufsbild BIM-Manager – Welche Kompetenzen sind gefragt? momentum Magazin, 3.12.2015, <https://momentum-magazin.de/de/das-berufsbild-bim-manager-welche-kompetenzen-sind-gefragt/> (21.4.2022)
- Karl, C.; Spengler, A. (2018): Was kostet BIM – und was nutzt es? In: Build-Ing. 1, S. 34–37
- Karl, C.; Spengler, A. (2019): BIM beginnt im Kopf. In: Build-Ing. (2), S. 50–54
- Kaufhold, J.; Kohl, J.; Nerella, V.; Schroefl, C.; Wenderdel, C.; Blankenstein, P.; Mechtcherine, V. (2019): Wood-based support material for extrusion-based digital construction. In: Rapid Prototyping Journal 25(4), S. 690–698
- Kaufmann, H.; Krötsch, S.; Winter, S. (2017): Atlas Mehrgeschossiger Holzbau. DETAIL Atlas, München

- Kelly, D.; Ilozor, B. (2016): A Quantitative Study of the Relationship between Project Performance and BIM Use on Commercial Construction Projects in the USA. In: *International Journal of Construction Education and Research* 15(1), S.3–18
- Keppner, B.; Kahlenborn, W.; Richter, S.; Jetzke, T.; Lessmann, A.; Bovenschulte, M. (2018): Die Zukunft im Blick: 3D-Druck. Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen. Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau
- KfW Research (2018): KfW-Digitalisierungsbericht Mittelstand 2018. Frankfurt a. M., https://argebaurecht.com/fileadmin/user_upload/KfW-Digitalisierungsbericht-2018.pdf (21.4.2022)
- Khoshnevis, B. (1999): Contour Crafting – State of Development. In: *10th Solid Freeform Fabrication Proceedings*. The University of Texas, Austin, S. 743-750
- Klein, J.; Stern, M.; Franchin, G.; Kayser, M.; Inamura, C.; Dave, S.; Weaver, J.; Houk, P.; Colombo, P.; Yang, M.; Oxman, N. (2015): Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass. In: *3D Printing and Additive Manufacturing* 2(3), S. 92–105
- Kleusberg GmbH & Co. KG (2019): Digitalisierung und BIM im modularen Bauen. 22.1.2019, www.pressebox.de/pressemitteilung/kleusberg-gmbh-co-kg/Digitalisierung-und-BIM-im-modularen-Bauen/boxid/939232 (21.4.2022)
- Kloubert, H.-J.; Wallrath, W. (2010): Intelligente Asphaltverdichtung. In: *Gestrata Journal* 130, S. 14–22
- Knöke, M. (2016): Von wegen »Wie Sand am Meer«. In: *Helmholtz Perspektiven* 1–2, S. 6–14
- Kocijan, M. (2018): Digitalisierung im Bausektor. In: *ifo Schnelldienst* 71(1), S. 42–45
- Kohl, J.; Kaufhold, J.; Burkhardt, H. (2018): Additive Fertigung mit holzbasierten Materialien. *Materialien – Prozesse – Anwendungsfelder*. Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH (Hg.), Dresden
- Komatsu Europe International N. V. (2017): Discover Hybridtechnologie. www.komatsu.eu/-/media/sites/komatsu/discover/discover_hybrid_technology_de.ashx?v=8b54e1ad66d34cb690c4342878120b03 (22.4.2022)
- Kommune21 (2020): Datenformate werden weiterentwickelt. 12.8.2020, www.kommune21.de/meldung_34511_Datenformate+werden+weiterentwickelt.html (21.4.2022)
- König, H. (o.J.): Erstellung von Ökobilanzen. Informationsdienst Holz, <https://informationsdienst-holz.de/urbaner-holzbau/kapitel-3-zukunftsaehiger-baustoff/die-erstellung-von-oekobilanzen/> (21.4.2022)
- König, M. (2019): »BIM4RAIL« – Ergebnisse der DB BIM-Pilotprojekte. In: *bahn manager* 2, S. 20–21
- Kopf, F.; Kortmann, J. (2018): Großtechnische Umsetzung von Abbruch-, Rückbau- und Recyclingversuchen an Carbonbetonbauteilen. In: *Tagungsband zum 29. BBB-Assistententreffen*. Braunschweig, S. 162–169
- Koppelhuber, J. (2017): Holzbau in der Bauwirtschaft – ein Paradigmenwechsel hin zum Industriellen Bauen. 10. Europäischer Kongress (EBH 2017) Köln, 18.–19. Oktober 2017, www.forum-holzbau.com/pdf/17_EBH2017_Koppelhuber.pdf (21.4.2022)
- Koschany, A. (2020): Die serielle Planung ist eine Herausforderung. *Primfo.de*, 4.5.2020, <https://primfo.de/die-serielle-planung-ist-eine-herausforderung/> (21.4.2022)
- Kotz, F.; Arnold, K.; Bauer, W.; Schild, D.; Keller, N.; Sachsenheimer, K.; Nargang, T.; Richter, C.; Helmer, D.; Rapp, B. (2017): Three-dimensional printing of transparent fused silica glass. In: *Nature* 544(7650), S. 337–339
- Kreißig, J. (2016): BIM, Nachhaltigkeit und Zertifizierung. *DGNB Blog rund um Nachhaltiges Bauen*, 16.9.2016, <https://blog.dgnb.de/bim-nachhaltigkeit-zertifizierung/> (21.4.2022)
- Krippendorf, W.; Biehler, H.; Holt, G.; Schwarz-Kocher, M. (2015): Kennziffer »Produktivität«. Bedeutung und Anwendungsmöglichkeiten am Beispiel der Metall- und Elektroindustrie in Ostdeutschland. Otto Brenner Stiftung, Frankfurt a. M.

- Krüger, R. (2018): Digitalisierungsstrategie für fertigende KMU des Baugewerbes. In: Tagungsband zum 29. BBB-Assistententreffen. Braunschweig, S. 171–179
- Krzywinski, J.; Will, F. (2019): Concepts of future digital Workspaces for industrial Vehicles. In: International VDI Conference – HMI in Off-Highway Machines, 26.–27. Juni 2019, Berlin
- Küchlin, D. (2021): Die neue Zementnorm DIN EN 197-5 für CEM 11/C- und CEM VI-Zemente ist erschienen. September 2021. In: Newsletter-technik HeidelbergCement, S. 1–2
- Küchlin, D. (2021): Die neue Zementnorm DIN EN 197-5 für CEM 11/C- und CEM VI-Zemente ist erschienen. September 2021. In: Newslettertechnik HeidelbergCement, S. 1–2
- Kuenzel, R.; Teizer, J.; Mueller, M.; Blickle, A. (2016): SmartSite: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects. In: Automation in Construction 71(1), S. 21–33
- Kurath, J. (2019): Eine neue Bauweise für den Hoch- und Brückenbau mit Carbonbeton. Vortrag zum 13. Schweizer Betonforum am 5. Juni 2019, Zürich
- Kurmann, F. (2018): Baubranche auf dem Automatisierungstrip. VDI Nachrichten, 1.11.2018, www.vdi-nachrichten.com/fokus/baubranche-auf-dem-automatisierungstrip/ (21.4.2022)
- Kurmann, F. (2019): Schritt für Schritt zur Roboterbaustelle. In: VDI Nachrichten (21/22), S. 20–21
- LAGA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall) (2019): Entsorgung faserhaltiger Abfälle., https://www.laga-online.de/documents/bericht-laga-ausschuss-entsorgung-faserhaltige-abfaelle_juli-2019_1574075541.pdf (21.4.2022)
- Lam, T.; Mahdjoubi, L.; Mason, J. (2017): A framework to assist in the analysis of risks and rewards of adopting BIM for SMEs in the UK. In: Journal of Civil Engineering and Management 23(6), S. 740–752
- Lambertz, M.; Theißen, S.; Höper, J.; Wimmer, R.; Meins-Becker, A.; Zibell, M. (2020): Ökobilanzierung und BIM im Nachhaltigen Bauen. Köln u. a. O., https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBaualitaet/2019/oekobilanz-bim/Endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (21.4.2022)
- Landau, K. (2001): Rationalisierungseffekte und Ergonomie des Ein-Mann-Mauerns. In: Mauerwerk 5(1), S. 24–30
- Langenberg, S. (2012): Das Konzept »Ersatz«? Probleme bei der Reparatur industriell gefertigter Bauteile. In: Technikgeschichte 79(3), S. 255–272
- Lazarevic, D.; Kautto, P.; Antikainen, R. (2020): Finland’s wood-frame multi-storey construction innovation system: Analysing motors of creative destruction. In: Forest Policy and Economics 110, Artikel 101861
- Leitstelle XPlanung/XBau (2018): Handreichung Xplanung XBau. Hamburg, <https://www.staedtetag.de/files/dst/docs/Publikationen/Weitere-Publikationen/2020/handreichung-xplanung-xbau-2-auflage.pdf> (21.4.2022)
- Liebherr (2015): Komfortabel und individuell einstellbar: Die neue Litronic-Kransteuerung für Liebherr-Turmdrehkrane. 16.4.2015, <https://www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/komfortabel-und-individuell-einstellbar-die-neue-litronic-kransteuerung-f%C3%BCr-liebherr-turmdrehkrane.html> (21.4.2022)
- Liebherr (2019a): Elektrisierend: Liebherr Mining. www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/elektrisierend-liebherr-mining.html (21.4.2022)
- Liebherr (2019b): Aktive Personenerkennung für Liebherr-Radlader mit EuroTest-Preis der BG Bau ausgezeichnet. 13.6.2019, www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/aktive-personenerkennung-fuer-liebherr-radlader-mit-eurotest-preis-der-bg-bau-ausgezeichnet.html (21.4.2022)
- Liebich, T.; Bormann, A.; Elixmann, R.; Eschenbruch, K.; Hausknecht, K.; Häußler, M.; Hochmuth, M.; König, M. (2018): Wissenschaftliche Begleitung der BMVI Pilotprojekte zur Anwendung von BIM im Infrastrukturbau. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur,

- www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/wissenschaftliche-begleitung-anwendung-bim-infrastrukturbau-2018.pdf?__blob=publicationFile (21.4.2022)
- Liese, J. (2015): Studentenwohnheim in SantCugat del Vallés. In: DETAIL 4, S. 316–321
- Lindemann, H.; Kloft, H.; Hack, N. (2018): Gradual Transition Shotcrete 3D Printing. Conference: Advances in Architectural Geometry 2018. Braunschweig
- Linder (2012): Betonfertigteile im Hochbau. DETAIL, https://www.detail.de/de/de_de/betonfertigteile-im-hochbau-8791 (21.4.2022)
- Linner, A. (2019): Wie wohnt es sich im Holzhochhaus? Die Vor- und Nachteile. Wohnglück, 17.11.2019, <https://wohnglueck.de/artikel/wohnen-im-holzhochhaus-21161> (21.4.2022)
- Lloret Fritschi, E. (2016): Smart Dynamic Casting – A digital fabrication method for non-standard concrete structures. Dissertation, Zürich
- Lowke, D.; Dini, E.; Perrot, A.; Weger, D.; Gehlen, C.; Dillenburger, B. (2018): Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. In: Cement and Concrete Research 112, S. 50–65
- Lu, N.; Korman, T. (2010): Implementation of Building Information Modeling (BIM) in Modular Construction: Benefits and Challenges. In: Ruwanpura, J.; Mohamed, Y.; Lee, S. (Hg.): Construction Research Congress 2010. Banff, S. 1136–1145
- Ludwig, L. (2014): Positionserfassung in Hydraulikzylindern. fluid.de, 20.12.2014, www.fluid.de/unbekanntekategorien/positionserfassung-hydraulikzylindern-117.html (21.4.2022)
- Mahler, B.; Idler, S.; Nusser, T.; Gantner, J. (2019): Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus. Umweltbundesamt (Hg.), Texte Nr. 132/2019, Dessau-Rosslau
- Mantau, U. (o.J.): Holzbedarf und Holzaufkommen in Deutschland. INFRO – Informationssysteme für Rohstoffe. www.landesverband-lippe.de/wp-content/uploads/180420-NRW-Mantau-togo.pdf (21.4.2022)
- Mauro, D. (2019): Vom Drohnenflug zum 3D-CAD- und BIM-Modell – Photogrammetrie zur hochpräzisen Bestandserfassung. In: DVW/Runder Tisch GIS (Hg.): Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0, Bühl/München, S. 135–137
- McAuley, B.; Hore, A.; West, R. (2017): BICP Global BIM Study – Lessons for Ireland’s BIM Programme. Construction IT Alliance Limited, <https://arrow.tudublin.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1016&context=beschrecrep> (21.4.2022)
- McDonald, G. (2017): Construction Robot Can ›Print‹ a Building in 14 Hours. Seeker, 28.4.2017, www.seeker.com/tech/robotics/construction-robot-can-print-a-building-in-14-hours (21.4.2022)
- Mechtcherine, V.; Bos, F.; Perrot, A.; da Silva, W.; Nerella, V.; Fataei, S.; Wolfs, R.; Sonebi, M.; Roussel, N. (2020a): Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. In: Cement and Concrete Research 132(2), Artikel 106037
- Mechtcherine, V.; Buswell, R.; Kloft, H.; Bos, F.; Hack, N.; Wolfs, R.; Sanjayan, J.; Nematollahi, B.; Ivaniuk, E.; Neef, T. (2021): Integrating reinforcement in digital fabrication with concrete: A review and classification framework. In: Cement and Concrete Composites 119, Artikel 103964
- Mechtcherine, V.; Michel, A.; Liebscher, M.; Schneider, K.; Großmann, C. (2019a): Neue Carbonfaserbewehrung für digitalen automatisierten Betonbau. In: Beton- und Stahlbetonbau 114(12), S. 947–955
- Mechtcherine, V.; Michel, A.; Liebscher, M.; Schneider, K.; Großmann, C. (2020b): Mineral-impregnated carbon fiber composites as novel reinforcement for concrete construction: Material and automation perspectives. In: Automation in Construction 110, Artikel 103002
- Mechtcherine, V.; Nerella, V. (2018a): 3-D-Druck mit Beton: Sachstand, Entwicklungstendenzen, Herausforderungen. In: Bautechnik 95(4), S. 275–287

- Mechtcherine, V.; Nerella, V. (2018b): Integration der Bewehrung beim 3D-Druck mit Beton. In: Beton- und Stahlbetonbau 113(7), S. 496–504
- Mechtcherine, V.; Nerella, V. (2019): Beton-3D-Druck durch selektive Ablage. In: Beton- und Stahlbetonbau 114(1), S. 24–32
- Mechtcherine, V.; Nerella, V.; Will, F.; Näther, M.; Otto, J.; Krause, M. (2019b): Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. In: Automation in Construction 107(3), Artikel 102933
- Meier, S. (2002): Ökologische Modernisierung, Umweltmanagement und organisationales Lernen. Eine Analyse organisationaler Lernprozesse beim Aufbau eines Umweltmanagementsystems in Kleinbetrieben der Baubranche. Landesinstitut So-zialforschungsstelle Dortmund, Beiträge aus der Forschung Nr. 125, Dortmund
- Memmler, P.; Klupp, M.; Nowak, R.; Renz, M. (2017): Die Wohnungswirtschaft Norddeutschland und Thüringen. Marktstudie 2017 Serielles Bauen. Verband norddeutscher Wohnungsunternehmen e. V.; Verband Thüringer Wohnungs- und Immobilienwirtschaft e. V., Hamburg
- Meurers, G. (2019): Warum BIM Chefsache ist. BIM gehört in jede Unternehmensstrategie eines Ingenieurbüros. In: liNear aktuell 1, S. 14–18
- Mittelstand 4.0 Agentur Kommunikation (2018): Digitalisierung der mittelständischen Bauwirtschaft in Deutschland. Staturevaluation und Handlungsempfehlungen. (Tauchert, J.; Thiessen, T.) BSP Business School Berlin GmbH (Hg.), Berlin
- MOBA (Mobile Automation AG) (2013): Moba-Matic und Big Sonic-Ski. Nivellierung auf höchstem Niveau. Limburg, www.lvt-waller.de/pdf/brochuere-moba.pdf (21.4.2022)
- MOBA (2017): Weltneuheit PAVE-TM revolutioniert den Straßenbau – das patentierte System zur Schichtdickenmessung von MOBA. 8.10.2017, <https://moba-automation.com/news-press/article/weltneuheit-pave-tm-revolutioniert-den-strassenbau-das-patentierete-system-zur-schichtdickenmessung-von-moba> (21.4.2022)
- MOBA (2019): Pave IR Solutions. http://moba-automation.dk/fileadmin/Documents/Brochures/Paving_Quality/Brochure_Pave-IR_DE.pdf (21.4.2022)
- Moro, J. (2019): Baukonstruktion – vom Prinzip zum Detail. Band 1 Grundlagen. Berlin/Heidelberg
- Müller, M. (2019): Wunderwaffe serielles Bauen? Ein Mittel, aber für den Kampf gegen die Wohnungsnot braucht es mehr! In: aktuell 25(1), S. 8–9
- Näther, M.; Nerella, V.; Krause, M.; Kunze, G.; Mechtcherine, V.; Schach, R. (2017): Beton-3D-Druck – Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton. Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 3024, Stuttgart
- NBS (National Building Specification) (2011): Building Information Modelling. www.thenbs.com/-/media/uk/files/pdf/bimresearchreport_2011-03.pdf?la=en (21.4.2022)
- NBS (2016): International BIM Report 2016. www.thenbs.com/-/media/uk/files/pdf/nbs-international-bim-report-2016.pdf?la=en (21.4.2022)
- NBS (2020): 10th annual BIM report. www.thenbs.com/knowledge/national-bim-report-2020 (21.4.2022)
- Nematollahi, B.; Vijay, P.; Sanjayan, J.; Nazari, A.; Xia, M.; Nerella, V.; Mechtcherine, V. (2018): Effect of Polypropylene Fibre Addition on Properties of Geopolymers Made by 3D Printing for Digital Construction. In: Materials 11(12), Artikel 2352
- Nerella, V.; Krause, M.; Mechtcherine, V. (2020): Direct printing test for buildability of 3D-printable concrete considering economic viability. In: Automation in Construction 109, Artikel 102986
- Netzwerk Baumaschinen der Offensive Gutes Bauen (2019): Personen-/Objekterkennung, Warnung in Gefahrenbereichen. Leitfaden. Kassel, www.netzwerk-baumaschinen.de/material/download/nwBMA_Personen-Objekterkennung.pdf (21.4.2022)

- Neugebauer, T. (2004): Ein Radlader wird selbstständig. In: Hebezeuge und Fördermittel 44, S. 144–145
- Neumair, S.-M.; Haas, H.-D. (2018): Geografisches Informationssystem (GIS). Gabler Wirtschaftslexikon, 9.2.2018, <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/geografisches-informationssystem-gis-36424/version-259877> (21.4.2022)
- Neumann, E.; Hirsch, K.; Westermeier, U. (2018): Intelligente Assistenzsysteme für Gelände- und Objekterkennung. In: ATZ Offhighway 11(1), S. 38–43
- Neuner, M.; Dusold, J. (2019): Verbundwerkstoffe: Wie das Recycling von CFK funktioniert. Produktion, 12.8.2019, www.produktion.de/technik/verbundwerkstoffe-wie-das-recycling-von-cfk-funktioniert-271.html (21.4.2022)
- Ning, F.; Cong, W.; Qiu, J.; Wei, J.; Wang, S. (2015): Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. In: Composites Part B: Engineering 80, S. 369–378
- Nördinger, S. (2018): Metalldruck per Lichtbogen – so geht’s! Produktion, 6.7.2018, www.produktion.de/trends-innovationen/id-3d-metalldruck-per-lichtbogen-so-gehts-391.html (21.4.2022)
- Oberti, I.; Plantamura, F. (2015): Is 3D printed house sustainable? CISBAT 2015. École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne
- Ogura, H.; Nerella, V.; Mechtcherine, V. (2018): Developing and Testing of Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC) in the Context of 3D-Printing. In: Materials 11(8), Artikel 1375
- Ohk, J. (2019): MIT-Forscher entwickeln Technologie für transparentes, 3D-gedrucktes Glas. 3D-Druck News, 15.1.2019, www.3dnatives.com/de/3d-gedrucktes-glas-150120191/#! (21.4.2022)
- Pacher, K. (2018): BIM als kooperative Arbeitsmethode: Die künftige Rolle bauindustrieller Unternehmen im BIM-Prozess. In: Bauindustrie aktuell, S. 8–13
- Palzer, U.; Janorschke, B.; Kott, M.; Lützkendorf, I.; Pritzel, C.; Rebel, B.; Schalling, K.; Stange, V. (2015): Einfluss von typisierten und vorgefertigten Bauteilen oder Bauteilgruppen auf die Kosten von Neubauten und Bestandsmodernisierungen. IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, Weimar
- Panda, B.; Paul, S.; Hui, L.; Tay, Y.; Tan, M. (2017): Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment. In: Journal of Cleaner Production 167, S. 281–288
- Partnerschaft Deutschland (PD – Berater der öffentlichen Hand GmbH) (2019): Digitales Baugenehmigungsverfahren NRW. Abschlussbericht der 1. Projektphase. Berlin, www.mhkgb.nrw/sites/default/files/media/document/file/Abschlussbericht_DigitalesBaugenehmigungsverfahren_NRW_1.Projektphase_270619.PDF (21.4.2022)
- Parvan, K. (2012): Estimating the impact of building information modelling (BIM) utilization on building project performance. Dissertation, College Park
- Pegna, J. (1995): Application of Cementitious Bulk materials to Site Processed Solid Freeform Construction. In: In: 6th Solid Freeform Fabrication Proceedings. University of Texas, Austin, S. 40–45
- Pekrul, S. (2006): Strategien und Maßnahmen zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Bauunternehmen. Ein Branchenvergleich mit dem Anlagenbau. Technische Universität Berlin, Mitteilungen Heft 32, Berlin
- Peter, N. (2001): Lexikon der Bautechnik. 10.000 Begriffsbestimmungen, Erläuterungen und Abkürzungen. Heidelberg
- Pfeifer, M.; Kraushaar, M.; Lintz, H. (2020): Der digitale Bauantrag. Der Weg zur schnellen Baugenehmigung. In: DBZ 01/2020, www.dbz.de/artikel/dbz_Der_digitale_Bauantrag_Was_sich_Architekten_wuenschen_3463787.html (21.4.2022)
- Plieninger, R.; Biebach, J.; Brehmer, T.; Baaske, M. (2018): Hybrid-Antriebe für Offhighway-Anwendungen. In: ATZ Offhighway 11(4), S. 24–31

- Poirier, E.; Staub-French, S.; Forgues, D. (2015): Embedded contexts of innovation. In: Construction Innovation 15(1), S. 42–65
- Pon Cat (2021): Worlds Largest Battery-Electric Excavator – CAT 323F Z-line – Electric Feel. https://www.youtube.com/watch?v=o_97v_pLj6c (21.4.2022)
- Prognos AG (2019): Wer baut Deutschland? Inventur zum Bauen und Wohnen 2019. Studie zum Wohnungsbautag 2019. (Koch, T.; Neumann, M.) Berlin
- Przerwok, S. (2018): Alles neu macht der Mai – oder BIM? Baurecht 2.0, 8.5.2018, www.baurechtzweinnull.de/2018/05/08/alles-neu-macht-der-mai-oder-bim/ (21.4.2022)
- Purkus, A.; Lüdtkke, J.; Jochem, D.; Rüter, S.; Weimar, H. (2020): Entwicklung der Rahmenbedingungen für das Bauen mit Holz in Deutschland: Eine Innovationssystemanalyse im Kontext der Evaluation der Charta für Holz 2.0. Thünen Report Nr. 78, Braunschweig
- Purr, K.; Osiek, D.; Lange, M.; Adlunger, K. (2016): Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess. Position März 2016. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Putzmeister (2017): Ergonic® 2.0 Systeme. http://www.tornokone.fi/wp-content/uploads/2017/05/BP_4691_DE.pdf (21.4.2022)
- PwC (PricewaterhouseCoopers) (2018): Baubranche aktuell. Wachstum 2020 – Digitalisierung und BIM. Berlin
- Rada, U. (2011): Der ganze Kiez in einem Haus. Taz, 31.1.2021, <https://taz.de/Hoehchstes-Holzhaus-Deutschlands/!5744719/> (21.4.2022)
- Rehbock, E. (2018): Sind neuartige Faserbetone nachhaltig? bvse, 11.1.2018, <https://www.bvse.de/gut-informiert-mineralik/nachrichten-mineralik/2603-sind-neuartige-faserbetone-nachhaltig.html> (21.4.2022)
- Rein, S. (2019): Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe. Berechnungen für das Jahr 2018. BBSR-Online-Publikation Nr. 17/2019, <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2019/bbsr-online-17-2019.html> (21.4.2022)
- Rein, S. (2020): Bericht zur Lage und Perspektive der Bauwirtschaft 2020. BBSR-Analysen kompakt Nr. 02/2020, Bonn
- Rein, S.; Schmidt, C. (2012): Die bauwirtschaftliche Entwicklung in Europa. BBSR-Analysen kompakt Nr. 11/2012, Bonn
- Rein, S.; Schmidt, C. (2018): Bautätigkeit in Europa – Beschäftigungsstrukturen und Produktivität. BBSR-Analysen kompakt Nr. 13/2018, Bonn
- Rempel, S.; Kulas, C. (2017): Fußgängerbrücke in Albstadt. Brückenbau im 21. Jahrhundert. Beton Bauteile Edition 2017. Gütersloh
- Reuters, M. (2019): Geodaten umfassend nutzen. In: DVW/Runder Tisch GIS (Hg.): Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0, Bühl/München, S. 188–190
- Richter, C. (2020): Praxisleitfaden zu Anforderungen an Bauteile von Raumzellengebäuden als Stahltragkonstruktion aus Gründen des Brandschutzes. Version 1.0 Ausgabe November 2020. CBI Center Building and Infrastructure Engineering GmbH, BFT Cognos GmbH (Hg.), Aachen
- Riedel, T.; Hennig, P. (2019): Wald- und Holzbodenfläche unverändert. In: AFZ-DerWald 74(14), S. 22–23
- Röhl, K.-H. (2008): Die Zukunft der Familienunternehmen in Deutschland. Potenziale und Risiken in der globalen Wirtschaft. IW-Analysen Nr. 38, Köln
- RWK Kompetenzzentrum (2019): Digitalisierung und Beschäftigung in der Bauwirtschaft (Autoren: Hoffmann, C.; Kuchenbecker, M.; Leis, T.). RKW Rationalisierungs- und Innovationszentrum der Deutschen Wirtschaft e. V., Eschborn
- Sauer, M. (2019): Composites-Marktbericht 2019. Der globale CF- und CC-Markt 2019. Carbon Composites e. V., Augsburg

- Schaller, J.; Reith, L.; Freller, S.; Gnädiger, J. (2019): Planungsoptimierung von Ingenieur- und Umweltplanung durch Integration von BIM und GIS. In: DVW/Runder Tisch GIS (Hg.): Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0, Bühl/München, S. 176–178
- Schmidt, T. (2015): Potentialbewertung generativer Fertigungsverfahren für Leichtbauteile. Light Engineering für die Praxis. Berlin/Heidelberg
- Schmitz, F. (2019): Herausragendes aus der Kohlenstoffinventur 2017. In: AFZ-DerWald 74(14), S. 34–36
- Schwarz, T. (2018): Erhebungen und Systematik in den Baugewerbestatistiken. In: Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 5, S. 32–37
- SCHWENK (2018): Recyclingbeton – Baustoff der Zukunft? www.schwenk.de/recyclingbeton-baustoff-der-zukunft/ (21.4.2022)
- Schwerdtner, P.; Kumlehn, F.; Schütte, J. (2018): Kostengünstiger Wohnungsbau: Identifikation bestehender Hemmnisse für den Einsatz von Raummodulen im Wohnungsbau. Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 3097, Stuttgart
- Schwing-Stetter (2019): UltraEco/UltraLife Fahrmischer. www.schwing.cz/wp-content/uploads/2019/09/Ultra_Eco_UltraLife_10312055_DE.pdf (21.4.2022)
- Seifert, M. (2015): Stahl-Leichtbauweise (1). Eine Bauweise mit Chancen. www.metallbau-magazin.de/artikel/mb_Stahl-Leichtbauweise_1__2333943.html (21.4.2022)
- Sezer, A.; Bröchner, J. (2014): The construction productivity debate and the measurement of service qualities. In: Construction Management and Economics 32(6), S. 565–574
- Sharry, Z. (2018): Top Ten Heavy Equipment Manufacturers. [iseekplant](http://iseekplant.com), 25.10.2018, <https://blog.iseekplant.com.au/blog/top-ten-heavy-equipment-manufacturers> (21.4.2022)
- Shimizu (2018): The Shimizu Smart Site autonomous robots can transform a job site! 26.4.2018, www.shimz.co.jp/en/topics/construction/item12/ (21.4.2022)
- Silbe, K.; Díaz, J. (Hg.) (2017): BIM-Ratgeber für Bauunternehmer. Grundlagen, Potenziale, erste Schritte. Köln
- Skand.Baunews (2019): Big data soll die Produktivität erhöhen. 23.7.2019, <https://skandbaunews.e-ls.de/2019/07/23/big-data-bauwesen/> (21.4.2022)
- Slaughter, E. (1998): Models of Construction Innovation. In: Journal of Construction Engineering and Management 124(3), S. 226–231
- Smits, W.; van Buiten, M.; Hartmann, T. (2017): Yield-to-BIM: impacts of BIM maturity on project performance. In: Building Research & Information 45(3), S. 336–346
- Spiegel Online (2019): Bisher rund 180.000 Anträge auf Baukindergeld. 31.12.2019, <https://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/baukindergeld-wird-intensiv-genutzt-bisher-180-000-antraege-a-1303215.html> (21.4.2022)
- Stahn, B. (2019): Wer packt mit an? Fachkräftemangel am Bau. [B_I Medien](http://B_I_Medien), 10.9.2019, www.bi-medien.de/artikel-35462-bm-fachkraeftemangel-baubranche-stahn.bi (21.4.2022)
- Stange, M. (2020): Building Information Modelling im Planungs- und Bauprozess. Eine quantitative Analyse aus planungsökonomischer Perspektive. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2008): Klassifikationen der Wirtschaftszweige. Mit Erläuterungen. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2019a): 31111-0005: Baugenehmigungen im Fertigteilbau (Neubau): Deutschland, Jahre, Gebäudeart/Bauherr. Verfügbarer Zeitraum: 2001–2019. www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=31111-0005&byypass=true&levelindex=0&levelid=1600685248939#abreadcrumb (21.4.2022)
- Statistisches Bundesamt (2019b): 31121-0003: Baufertigstellungen im Fertigteilbau (Neubau): Deutschland, Jahre, Gebäudeart/Bauherr. Verfügbarer Zeitraum: 2001–2019. www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=31121-0003&byypass=true&levelindex=0&levelid=1600685248939#abreadcrumb (21.4.2022)

- genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=31121-0003&bypass=true&levelindex=1&levelid=1615822543696#abreadcrumb (21.4.2022)
- Statistisches Bundesamt (2019c): Produzierendes Gewerbe. Tätige Personen und Umsatz der Betriebe im Baugewerbe 2018. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2019d): Ausgewählte Daten für die Bauwirtschaft. März 2019, Wiesbaden, https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publicationen/Downloads-Querschnitt/bauwirtschaft-1020210191034.pdf?__blob=publicationFile (21.4.2022)
- Statistisches Bundesamt (2020a): 81000-0017: VGR des Bundes – Produktivität, Arbeitnehmerentgelt, Bruttolöhne und -gehälter, Lohnstückkosten: Deutschland, Jahre, Wirtschaftsbereiche. Verfügbarer Zeitraum: 1991–2020. www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=81000-0017&bypass=true&levelindex=1&levelid=1615822435183#abreadcrumb (21.4.2022)
- Statistisches Bundesamt (2020b): Bauen und Wohnen. Baugenehmigungen/Baufertigstellungen nach der Bauweise 2019. Lange Reihen z. T. ab 1960. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2020c): Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach überwiegend verwendetem Baustoff 2019. Lange Reihen ab 2000. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2020d): Bautätigkeit und Wohnungen 2019. Bautätigkeit. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2020e): Statistik der Baufertigstellungen 2019. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2020f): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen 2019. Inlandsproduktberechnung. Detaillierte Jahresergebnisse. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2021a): Bauen und Wohnen. Baugenehmigungen/Baufertigstellungen nach der Bauweise 2020. Lange Reihen z. T. ab 1960. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2021b): 31121-0003: Baufertigstellungen im Fertigteilm (Neubau): Deutschland, Jahre, Gebäudeart/Bauherr. Verfügbarer Zeitraum: 2001–2021. <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=31121-0003&bypass=true&levelindex=0&levelid=1657031754373#abreadcrumb> (21.4.2022)
- Stellmach, H. (2016): Fehlerfrei baggern für jedermann. *B_I Medien*, 4.4.2016, www.bi-medien.de/artikel-8762-bm-cat-grade-control-mit-assist.bi (21.4.2022)
- Stemmermann, P.; Achternbosch, M. (2013): Dekarbonisierung im Baustoffsektor. In: Drenckhahn, D. (Hg.): *Rolle der Wissenschaft im Globalen Wandel. Vorträge anlässlich der Jahresversammlung vom 22. bis 24. September 2012 in Berlin, Halle/Stuttgart*, S. 313–332
- Stern, S.; Strube, G.; Lotz, C.; Kutz, A. (2018): *Infrastruktur & Wohnen: Deutsche Ausbauziele in Gefahr (Öffentlicher Sektor)*. McKinsey & Company, Berlin u. a. O.
- Stifterverband (2020): *Forschung und Entwicklung in der Wirtschaft 2018*. Essen, <https://www.stifterverband.org/download/file/fid/8823> (21.4.2022)
- Stone, T. (2015): Moba and Volz Consulting set up new joint venture for process optimization in road construction. *iVT International*, 22.5.2015, www.ivtinternational.com/news/construction/moba-and-volz-consulting-set-up-new-joint-venture-for-process-optimization-in-road-construction.html (21.4.2022)
- Stowe, K.; Zhang, S.; Teizer, J.; Jaselskis, E. (2015): Capturing the Return on Investment of All-In Building Information Modeling: Structured Approach. In: *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 20(1), Artikel 4014027
- Straßmann, B. (2020): Ein Haus, das aus dem 3-D-Drucker kommt. *Zeit Online*, 21.10.2020, www.zeit.de/2020/44/moderner-gebaeudebau-3d-drucker-haus-pilotprojekt-fortschritt (21.4.2022)
- Stürmer, S.; Kulle, C. (2017): Untersuchung von Mauerwerksabbruch (verputztes Mauerwerk aus realen Abbruchgebäuden) und Ableitung von Kriterien für die Anwendung in Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Beton mit Typ 2 Körnung) für den ressourcenschonenden Hochbau.. *Deutsche Bundesstiftung, Osnabrück*

- Süddeutsche Zeitung (2020): Das Problem wird sich noch verschärfen. 28.2.2020, www.sueddeutsche.de/muenchen/susanne-niewalda-baubranche-das-problem-wird-sich-noch-verschaerfen-1.4825364 (21.4.2022)
- Sydow, A.; Kurath, J.; Steiner, P. (2019): Extrem leichte Brücke aus vorgespanntem Carbonbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau 114(11), S. 869–876
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2012): Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. (Autor/innen: Peters, A.; Doll, C.; Kley, F.; Möckel, M.; Plötz, P.; Sauer, A.; Schade, W.; Thielmann, A.; Wietschel, M.; Zanker, C.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 153, Berlin
- TAB (2017): Additive Fertigungsverfahren (3-D-Druck). (Autor/innen: Caviezel, C.; Grünwald, R.; Ehrenberg-Silies, S.; Kind, S.; Jetzke, T.; Bovenschulte, M.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 175, Berlin
- TAB (2021): Digitalisierung der Landwirtschaft: Gesellschaftliche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Effekte. (Autor/in: Kehl, C.; Meyer, R.; Steiger, S.) Teil II des Endberichts zum TAB-Projekt, TAB-Arbeitsbericht Nr. 194, Berlin
- TAB (2022): Urbaner Holzbau. (Kind, S.; Bogenstahl, C.; Jetzke, T.; Richter, S.) TAB-Kurzstudie Nr. 3, Berlin
- Tadano DEMAG GmbH (2019): IC-1 Plus. Das Demag Traglast-Ermittlungs-System. https://assets.onetadano.com/celum_assets/documents/brochure_ic-1-plus_a4_de.pdf (21.4.2022)
- Taylor, J. (2005): Three perspectives on innovation in interorganizational networks: systemic innovation, boundary object change, and the alignment of innovations and networks. Dissertation, Stanford
- TB Verlag (2014): Kommunikative Krane. In: Maschinen & Technik (Dez. 2014/Jan. 2015), S. 64–65
- Terfehr, S. (2019): BIM im Baugenehmigungsverfahren. Build-Ing. 29.11.2019, www.build-ing.de/fachartikel/detail/bim-im-baugenehmigungsverfahren/ (21.4.2022)
- The Business Research Company (2020): The Global Construction Market. Construction Market – By Type (Building Construction, Heavy And Civil Engineering Construction, Specialty Trade Contractors, And Land Planning And Development), By End-User Sector (Public, Private), And By Region, Opportunities And Strategies – Global Forecast To 2030. www.thebusinessresearchcompany.com/report/construction-market (21.4.2022)
- Theiler, M.; Tulke, J.; König, M.; Krause, K.-U. (2019): BIM-basierter Bauantrag+. In: DVW/Runder Tisch GIS (Hg.): Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0, Buhl/München, S. 209–211
- Thiel, F. (2017): BIM und das Urheberrecht. Vergabe24, 27.11.2017, www.vergabe24.de/blog/bim-und-das-urheberrecht/ (21.4.2022)
- Thomä, J.; Zimmermann, V. (2016): Innovationshemmnisse in KMU. Eine empirische Analyse unter Berücksichtigung des Handwerks. Göttinger Beiträge zur Handwerksforschung Nr. 6, Göttingen
- Trends der Zukunft (2016): Hadrian X: Roboter baut ein komplettes Haus in zwei Tagen. 29.7.2016, www.trendsderzukunft.de/hadrian-x-roboter-baut-ein-komplettes-haus-in-zwei-tagen/ (21.4.2022)
- Trümer, A. (2020): Calcinierte Tone als Puzzolane der Zukunft – Von den Rohstoffen bis zur Wirkung im Beton. Dissertation. Weimar
- TU Dresden (2019): 1. Deutsches Industrieseminar zum Thema Beton-3D-Druck und andere digitale Betonbauverfahren. 4.9.2019, https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/ifb/das-institut/news/1-deutsches-industrieseminar-zum-thema-beton-3d-druck-und-andere-digitale-betonbauverfahren?set_language=de (21.4.2022)
- UBA (Umweltbundesamt) (2015): Nachhaltigkeitsaspekte in den Bauordnungen der Länder – Empfehlung der Kommission Nachhaltiges Bauen beim Umweltbundesamt (KNBau) an die ARGEBAU zur Überarbeitung der Musterbauordnung. Dessau-Roßlau

- UBA (2016): Das anthropogene Lager. 10.2.2016, www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/das-anthropogene-lager#das-anthropogene-lager-als-sekundarrohstoffquelle (21.4.2022)
- UBA (2017): Urban Mining. 8.5.2017, www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining#strategie-zur-kreislaufwirtschaft (21.4.2022)
- UBA (2018a): Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2018. Dessau-Roßlau
- UBA (2018b): Die Zukunft im Blick: 3D-Druck. Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen. Dessau-Roßlau
- UBA (2020a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 –2018. Umweltbundesamt, Climate Change Nr. 22/2020, Dessau-Roßlau
- UBA (2020b): Luftschadstoff-Emissionen in Deutschland. 3.7.2020, www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland (21.4.2022)
- UBA (2021): Treibhausgas-Emissionen. 11.2.2021, www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen (12.3.2021)
- Uhlendorf, T. (2017): Sicherung des Projekterfolgs durch einen verlässlichen Planungsprozess. Konferenzband des 27. BBB-Assistententreffens in der Technischen Universität Dresden. Dresden, S. 217–226
- VDBUM (Verband der Baubranche, Umwelt- und Maschinentechnik e. V.) (2019): Auf Knopfdruck. Automatische Baggersteuerung erhöht die Produktivität und senkt die Kosten. In: VDBUM Info 3, S. 37
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2019): Building Information Modeling. VDI-Richtlinien zur Zielerreichung. www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/ueber_uns/fachgesellschaften/GBG/dateien/Bauen-und-Gebaedetechnik-Bautechnik-Agenda-Building-Information-Modeling.pdf (21.4.2022)
- VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) (2018): Deutsche Baumaschinenindustrie in der Mitte des Booms. 16.2.2018, Bauhof, <https://www.bauhof-online.de/d/vdma-deutsche-baumaschinenindustrie-in-der-mitte-des-booms/> (21.4.2022)
- VDMA (2018): Die deutsche Baumaschinen- und Baustoffanlagenindustrie Stand März 2018. Frankfurt a. M.
- VDMA (2019): MiC 4.0 startet mit ihren konkreten Arbeiten. 27.8.2019, <https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/1263187> (21.4.2022)
- VDZ (Verein Deutscher Zementwerke) (Hg.) (2008): Zement-Taschenbuch. Düsseldorf
- VDZ (2020): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2019. Düsseldorf
- VDZ (o. J.): Zementindustrie in Deutschland 2019. <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/zahlen-und-daten/zementindustrie-in-deutschland> (14.7.2021)
- Vemcon GmbH (o. J.): Der Vemcon Copilot zur Teilautomatisierung von Baumschienen. www.vemcon.de/wp-content/uploads/2018/10/2018_08_Vemcon_Infoblatt_Copilot_web.pdf (21.4.2022)
- Verband unbemannte Luftfahrt (2019): Analyse des deutschen Drohnenmarktes. www.bdl.aero/wp-content/uploads/2019/02/VUL-Marktstudie_Deutsch_final.pdf (21.4.2022)
- Vidalakis, C.; Abanda, F.; Oti, A. (2020): BIM adoption and implementation: focusing on SMEs. In: Construction Innovation 20(1), S. 128–147
- Vogl, B.; Abdel-Wahab, M. (2015): Measuring the Construction Industry's Productivity Performance: Critique of International Productivity Comparisons at Industry Level. In: Journal of Construction Engineering and Management 141(4), Artikel 4014085
- Vollert Anlagenbau GmbH (2014): Neukaledonien setzt auf Fertigteilbauweise. In: BetonWerk International 4, S. 218–222

- Volvo (2011): Volvo Wheel Loaders L110G, L120G. www.volvoce.com/-/media/volvoce/global/global-site/product-archive/documents/03-wheel-loaders/10-volvo-g-series/v-1120g/brochure_1110g_1120g_t4i_en_21_20026571_b.pdf?v=uVk9Pw (21.4.2022)
- Von Heyl, J. (2016): Kritische Betrachtung der klassischen Bauabwicklung in Deutschland. Konferenzband des 27. BBB-Assistententreffens in der Technischen Universität Dresden. Dresden, S.235-245
- Von Oppen, S. (2019): Digitalisierung: Endlich die Welt retten? In: Regionalausgabe Ost des Deutschen Architektenblattes 4, S.8–9
- Wacker Neuson (2021a): EZ17e – Der erste elektrische Minibagger von Wacker Neuson. www.wackerneuson.de/de/produkte/bagger/zero-tail-kettenbagger/model/ez17e/ (21.4.2022)
- Wacker Neuson (2021b): WL20e – Innovativ, elektrisch, emissionsfrei – der Radlader mit Elektroantrieb. www.wackerneuson.de/de/produkte/radlader/knickgelenkte-radlader/model/wl20e/ (21.4.2022)
- Wacker Neuson (o.J.): DW15e – Der Elektro-Raddumper mit Allrad Antrieb. www.wackerneuson.de/de/produkte/dumper/raddumper/model/dw15e/ (21.4.2022)
- Walberg, D.; Brosius, O.; Schulze, T.; Cramer, A. (Hg.) (2015): Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden. Vergleich von massiven Bauweisen mit Holzfertigtbauten aus kostenseitiger, bautechnischer und nachhaltiger Sicht. Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen, Bauforschungsbericht 68, Kiel
- Wangler, T.; Lloret, E.; Reiter, L.; Hack, N.; Gramazio, F.; Kohler, M.; Bernhard, M.; Dillenburger, B.; Buchli, J.; Roussel, N.; Flatt, R. (2016): Digital Concrete: Opportunities and Challenges. In: RILEM Technical Letters 1, S.67–75
- WBW (Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik) (2018): Erhöhung der stofflichen Nutzung von Holz in Gebäuden im Einklang mit der Rohstoffverfügbarkeit. Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirates Waldpolitik November 2018. Berlin
- Webner, J.; Lautner, E. (2004): Intelligente Baumaschinensteuerungen und alternative Antriebssysteme. In: Baumaschinentechnik 2004: Forschung, Entwicklung, Innovation. Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen 26, Frankfurt a. M., S.41–48
- Wehrle, K. (2018): Wettbewerb und Qualität in der bundesdeutschen Bauwirtschaft. Mindest- und Höchstsätze der HOAI. Deutsches Ingenieurblatt, 12.2.2018, <https://www.ingenieurbau-online.de/deutsches-ingenieurblatt/archiv/fachartikeldetail/wettbewerb-und-qualitaet-in-der-bundesdeutschen-bauwirtschaft> (21.4.2022)
- Wehrmann, W.; Torno, S. (2015): Laubholz für tragende Konstruktionen. Zusammenstellung zum Stand von Forschung und Entwicklung. Stand Juli 2015. Cluster-Initiative Forst und Holz in Bayern gGmbH, Freising
- Weimar, H.; Jochem, D. (Hg.) (2013): Holzverwendung im Bauwesen. Eine Marktstudie im Rahmen der »Charta für Holz«. Thünen-Report 9, Braunschweig
- Welp, I.; Grundke, M. (2017): Organisationale Herausforderungen im modularen Hausbau und der Bauwirtschaft. In: Der Betriebswirt 58(3), S.26–33
- Westphal, T. (2018): Sanieren mit BIM. BundesBauBlatt, www.bundesbaublatt.de/artikel/bbb_Sanieren_mit_BIM_3117019.html (21.4.2022)
- Wienerberger (2018): Wienerberger erforscht mit Fastbrick die Zukunft des Bauens. 5.9.2018, www.wienerberger.com/de/presse/presseaussendungen/20180903-wienerberger-erforscht-mit-fastbrick-die-zukunft-des-bauens.html (21.4.2022)
- Wiiw (The Vienna Institute for International Economic Studies) (2019): EU KLEMS Growth and Productivity Accounts. Release 2019. The EU KLEMS data repository. <https://euklems.eu> (13.5.2020)
- Will, F.; Hänel, F.; Stenzel, C. (2019b): Antriebstechnik für Baumaschinen: Wohin geht die Reise? In: GesteinsPerspektiven 4, S.64–69

- Winkelmann, N. (2019): Highspeed-3D-Drucker für Hochleistungskunststoffe. Springer, 10.4.2019, www.springerprofessional.de/additive-fertigung/polymerwerkstoffe/highspeed-3d-drucker-fuer-hochleistungskunststoffe/16613430 (21.4.2022)
- Winter, S. (2018): Bauen mit Weitblick. Abschlussbericht Forschungsvorhaben: Bauen mit Weitblick. Systembaukasten für den industrialisierten sozialen Wohnungsbau. München
- Wirtgen Group (o. J.): WITOS FleetView – Big data für Baumaschinen. www.wirtgen-group.com/de-de/news-und-media/wirtgen-group/big-data/ (21.4.2022)
- Wischniewski, T. (2018): Baubranche goes digital: »Grüne« Gebäude mit BIM und EPDs. 17.1.2018, www.umweltdialog.de/de/wirtschaft/digitalisierung/2018/Baubranche-goes-digital-Gruene-Gebaeude-mit-BIM-und-EPDs.php (21.4.2022)
- Witt, E.; Anton, C. (Hg.) (2020): Additive Fertigung. Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen: Kurzfassung der Stellungnahme. Halle u. a. O.
- Wörle, J. (2019): Altholz: Nur ein Viertel wird recycelt. Kreislaufwirtschaftsgesetz und Altholzverordnung werden überarbeitet. Deutsche Handwerkszeitung, 30.10.2019, www.deutsche-handwerkszeitung.de/altholz-nur-ein-viertel-wird-recycelt/150/32542/395124 (2.2.2021)
- Wu, C.; Xu, B.; Mao, C.; Li, X. (2017): Overview of BIM maturity measurement tools. In: Journal of Information Technology in Construction 22, S. 34–62
- Zwiehner, T.; Spreitzer, P. (2019): Warum BIM (noch) nicht die erwartete Produktivitätssteigerung bringt. In: Stahlbau 88(5), S. 499–505

10 Anhang

10.1 Abbildungen

	Seite
Abb. 2.1 Reale Wohnungsbauinvestitionen in ausgewählten EU-Ländern	28
Abb. 2.2 Entwicklung der Bauinvestitionen nach ausgewählten Bausparten	29
Abb. 2.3 Baufertigstellungen und Baugenehmigungen von Wohnungen.....	30
Abb. 2.4 Betriebe, baugewerblich tätige Personen und baugewerblicher Umsatz nach Beschäftigungsgrößenklassen im Bauhauptgewerbe in Deutschland Ende Juni 2018.....	32
Abb. 2.5 Tätige Personen Ende Juni 2018 nach der Stellung im Beruf im Bauhauptgewerbe in Deutschland	33
Abb. 2.6 Entwicklung der Arbeitsproduktivität (Bruttowertschöpfung je Erwerbstätigenstunde) in ausgewählten Wirtschaftszeigen in Deutschland.....	36
Abb. 2.7 Veränderung der preisbereinigten Bruttowertschöpfung je Erwerbstätigenstunde im Baugewerbe.....	37
Abb. 2.8 Die Entwicklung der Arbeitsproduktivität in ausgewählten EU-Ländern.....	39
Abb. 2.9 Schematische Darstellung des Wertschöpfungssystems Bauwirtschaft.....	41
Abb. 2.10 Prozentuale Verteilung der Tätigkeiten an der Gesamtbauzeit.....	43
Abb. 3.1 Zusammenführung der verschiedenen Fachmodelle in einem Koordinationsmodell.....	51
Abb. 3.2 Aufwandsverlagerung und Einfluss auf Kostenentwicklung: BIM und traditionelle Planungsmethode im Vergleich	53
Abb. 3.3 Organisation von BIM-Projekten.....	61
Abb. 3.4 Inhalte der Auftraggeberinformationsanforderungen (AIA) und des BIM-Abwicklungsplan (BAP).....	62
Abb. 3.5 Inhalte einschlägiger VDI-Richtlinien.....	63
Abb. 4.1 Prinzip der additiven Fertigung	78
Abb. 4.2 Entwicklung der Projekte auf dem Gebiet des 3-D-Drucks mit Beton	80
Abb. 4.3 3-D-Maschine: Manipulator und Druckkopf	86
Abb. 4.4 Einschätzung zur Umsetzbarkeit des 3-D-Drucks in der Bauindustrie.....	91
Abb. 5.1 Fertigstellung neuer Wohngebäude in Deutschland insgesamt und im Fertigteilbau errichtet.....	99

	Seite
Abb. 5.2	Fertigstellungen von neuen Wohngebäuden im Fertigteilbau nach verwendetem Baumaterial..... 100
Abb. 5.3	Herstellung von Betonfertigteilen mit einer automatisierten Palettenumlaufanlage 103
Abb. 6.1	Bestandsentwicklung verschiedener Baumaschinentypen in Deutschland von 1992 bis 2013..... 115
Abb. 6.2	Abhängigkeit der Antriebssysteme von Arbeitszyklus und Leistungsbedarf..... 130
Abb. 7.1	Lebenszyklusanalyse eines Gebäudes..... 136

10.2 Tabellen

Tab. 2.1	KMU-Schwellenwerte der EU-Kommission seit 1.1.2005..... 31
Tab. 2.2	Sektorale Rangfolge der FuE-Aufwendungen sowie die FuE-Intensität der aufgeführten Sektoren über insgesamt 2.500 internationale Unternehmen 2018/2019 44
Tab. 3.1	Ergebnisse quantitativer Untersuchungen zu BIM-Potenzialen..... 70

10.3 Kästen

Kasten 3.1	Digitale Baugenehmigung 55
Kasten 3.2	BIM-Leistungsniveau 1 58
Kasten 3.3	Wichtige BIM-Akteure in Deutschland 59
Kasten 3.4	Der Imperativ der Trennung von Planung und Ausführung in Deutschland 65
Kasten 4.1	Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton 83
Kasten 4.2	Vergleich der Bauzeit von konventioneller zu 3-D-Betontechnologie..... 87
Kasten 5.1	Die digitale Produktion von Betonfertigteilen 101
Kasten 5.2	Robotik und neue digitale Verfahren: Möglichkeiten für den Holzbau – das Beispiel »DFAB HOUSE« 105
Kasten 6.1	Bauroboter im Hochbau..... 125
Kasten 6.2	Automatisiertes Fahren 128
Kasten 7.1	Neuartige Zementsysteme..... 142
Kasten 7.2	Verwendung und Verfügbarkeit von Holz in Deutschland 149

10.4 Abkürzungen

AIA	Auftraggeberinformationsanforderungen
AR	Augmented Reality
BAK	Bundesarchitektenkammer
BAP	BIM-Abwicklungsplan
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BCF	BIM Collaboration Format (Datenaustauschnittstellen)
BIM	Building Information Modeling
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEL	Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMUB	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
buildingSMART	Standardisierungsorganisation
BWS	Bruttowertschöpfung
CAD	Computer-aided Design
CAM	Computer-aided Manufacturing
CCS	Carbon Capture and Storage
CEN	Europäisches Komitee für Normung
CF	Carbonfaser
CNC	Computerized-Numerical-Control
CONPrint3D	Concrete ON-site 3D-Printing
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIW	Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung
EN	Europäische Norm
EPD	Environmental Product Declaration (Umweltproduktdeklaration)
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EU	Europäische Union
EU KLEMS	Analyse der Inputs von Kapital (K), Arbeit (L), Energie (E), Material (M) und Dienstleistungen (S) auf EU-Ebene
FDM	Fused Deposition Modeling
FuE	Forschung und Entwicklung
GaBi	ganzheitliche Bilanzierung (Markennamen für Ökobilanzsoftware)
GIS	geografische Informationssysteme
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HDB	Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V.
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
IFC	Industry Foundation Classes (Datenaustauschnittstellen)

ISO	Internationale Organisation für Normung
IT	Informationstechnologie
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KI	künstlichen Intelligenz
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LCA	Life Cycle Assessment
MBO	Musterbauordnung
MCF	Mineral-Impregnated Carbon Fiber Reinforcement
NACE	Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne (statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft)
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
OZG	Onlinezugangsgesetz
SDC	Smart Dynamic Casting
SLS	Selective Laser Melting bzw. Lasersintern
VBUM	Verband der Baubranche, Umwelt- und Maschinentechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke e. V.
VgV	Verordnung über die Vergabe öffentlicher Aufträge (Vergabeverordnung)
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
VOL	Vergabe- und Vertragsordnung für Leistungen
VR	Virtual Reality
WZ	Wirtschaftszweig (Begriff der Produktionsstatistik)