



VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 34

Ressourceneffizienzpotenziale des Bauhauptgewerbes im Hochbau



VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 34: Ressourceneffizienzpotenziale des Bauhauptgewerbes im Hochbau

Autor:

Mario Wiest, VDI Zentrum Ressourceneffizienz

Wir danken Dr. Johannes Wall, Stabsbereichsleiter Nachhaltigkeit Ed. ZÜBLIN AG, für seine fachliche Unterstützung.

Die Kurzanalyse wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz erstellt.

Die Kurzanalysen des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen des Themas Ressourceneffizienz in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzanalysen einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder der Ressourceneffizienz.

Redaktion:

VDI Technologiezentrum GmbH
VDI-Platz 1
40468 Düsseldorf

Tel. +49 30-27 59 506-505
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © PantherMedia/silverjohn

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

**VDI ZRE Publikationen:
Kurzanalyse Nr. 34**

**Ressourceneffizienzpotenziale des
Bauhauptgewerbes im Hochbau**

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	6
TABELLENVERZEICHNIS	7
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	8
TEIL 1: KURZANALYSE	10
1 EINLEITUNG	11
2 DAS BAUHAUPTGEWERBE	14
2.1 Tätigkeiten und Struktur	14
2.2 Ressourcenverbrauch	16
3 RESSOURCENEFFIZIENZ UND -SCHONUNG BEIM BAU VON GEBÄUDEN	19
3.1 Bauen im Bestand	20
3.2 Optimierung der Baulogistik	22
3.2.1 Materialbeschaffung	23
3.2.2 Effiziente Baulogistiknetzwerke	25
3.2.3 Baustelleneinrichtung	27
3.2.4 Vorfertigung von Modulen und Elementen	35
3.3 Herstellung der Baugrube	37
3.4 Kreislaufgerechte Bauausführung	38
3.5 Einsparung von Wasser	39
3.6 Reduktion von lokalen Umweltwirkungen	41
3.6.1 Boden- und Gewässerschutz	41
3.6.2 Lärm- und Staubvermeidung	42
3.7 DGNB-Zertifizierung für nachhaltige Baustellen	42
3.8 Ressourceneffizienzmaßnahmen in Unternehmen des Bauhauptgewerbes	45

4	DIGITALISIERUNG IN DER BAUAUSFÜHRUNG	46
4.1	Building Information Modeling	46
4.1.1	BIM-basierter Gebäuderessourcenpass	47
4.1.2	Digitales Baulogistikmodell	47
4.2	Mobile Endgeräte	48
4.3	Sensor-Technik	49
4.4	Scanning-Technologien	51
4.5	Digitale Fertigung	51
4.6	Augmented Reality	52
5	ABWICKLUNG VON BAUPROJEKTEN	54
5.1	Integrierte Projektabwicklung	54
5.1.1	Werte und Kultur	55
5.1.2	Mehrparteienvertrag	56
5.1.3	Organisation	57
5.1.4	Methoden und Werkzeuge	58
5.2	Lean Construction	59
5.2.1	Last Planner System	59
5.2.2	Taktsteuerungstafel	60
5.2.3	5-W-Fragetechnik	60
5.2.4	Tägliche Kurzbesprechungen	61
5.2.5	Choosing by Advantages	61
5.2.6	Ishikawa-Diagramm	61
5.2.7	Definition von Leistungskennzahlen	62
6	FAZIT	64
	TEIL 2: FACHGESPRÄCH	67
7	DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS	68
7.1	Programm des Fachgesprächs	69
7.2	Ressourceneffizienz im Bauhauptgewerbe – Einführung	70
7.3	Studie „Die CO ₂ neutrale Baustelle“	73
7.4	Diskussion Teil I	75

7.5	Das DGNB-System für nachhaltige Baustellen	77
7.6	Nachhaltigkeit auf der Baustelle in der Praxis durch die Anwendung des DGNB-Systems	78
7.7	Diskussion Teil II	80
7.8	Zusammenfassung	81
	LITERATURVERZEICHNIS	82

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Struktur des Bauhauptgewerbes in Deutschland nach Beschäftigtengrößenklassen	14
Abbildung 2: Anteil am baugewerblichen Umsatz nach Beschäftigtengrößenklassen im Juni 2022	15
Abbildung 3: Zusammensetzung der Baustellenabfälle in Deutschland (2020)	18
Abbildung 4: THG-Emissionen im Lebenszyklus: Rückbau und Neubau gegenüber einer energetischen Sanierung © Wuppertal Institut	21
Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung des bauleistungsprozesses einer integrierten Kreislauflogistik	26
Abbildung 6: Verursachte CO ₂ -Emissionen in kt durch den Einsatz mobiler Maschinen im Vergleich zum Straßengüterverkehr in Deutschland	30
Abbildung 7: Ausstattung eines Baucontainers mit mobilen PV-Modulen zur Erzeugung von Strom auf der Baustelle © Hartl Energy GmbH	34
Abbildung 8: Reifenwaschanlage mit Wasser-Recycling © FRUTIGER Company AG/ MobyDick	40
Abbildung 9: Die Kriterien des DGNB-Zertifikats für nachhaltige Baustellen © DGNB	43
Abbildung 10: Zusammenspiel der Datenerfassung mithilfe von Bluetooth- oder GPS-Tags	50
Abbildung 11: Augmented Reality zeigt versteckte baurelevante Elemente auf einer Baustelle © DFKI	52
Abbildung 12: Exemplarisches Ishikawa-Diagramm zur Problemanalyse bei hohem Energieverbrauch auf einer Baustelle	62

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Übersicht zu den verschiedenen Arten der Vorfertigung
von Gebäuden

37

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AR	Augmented Reality
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
BG Bau	Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft
BGF	Bruttogrundfläche
BIM	Building Information Modeling
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
CDE	Common Data Environment (digitale Kollaborationsplattform)
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CO_{2e}	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
DFKI	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V.
EPD	Umweltproduktdeklaration
FIM	Fabrication Information Modeling
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GPS	Global Positioning System
H₂	Wasserstoff (molekular)
ha	Hektar
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure

HVO	Hydrogenated Vegetable Oils (Hydrierte Pflanzenöle)
IoT	Internet of Things
IPA	Integrierte Projektabwicklung
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kW	Kilowatt
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LBO	Landesbauverordnung
LED	Leuchtdioden
LPS	Last Planner System
ÖBV	Österreichische Bautechnik Vereinigung
ÖGNI	Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft
PV	Photovoltaik
RFID	Radio Frequency Identification
THG	Treibhausgas
UIP	Umweltinnovationsprogramm (Förderprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDI TZ	VDI Technologiezentrum GmbH
VDI ZRE	VDI Zentrum Ressourceneffizienz

TEIL 1: KURZANALYSE

1 EINLEITUNG

Die Errichtung von Gebäuden und Infrastruktur trägt wesentlich zu den nationalen jährlichen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) bei.¹ Global verursacht das gesamte Bauwesen min. 50 % aller Kohlenstoffdioxid-(CO₂-)Emissionen.² Ein Grund hierfür findet sich in den großen Rohstoffmengen, die insbesondere im Zuge von Neubaumaßnahmen eingesetzt werden: allein in Deutschland werden für die Errichtung und Instandhaltung der gebauten Umwelt jedes Jahr zwischen 550 und 600 Mio. t Gesteinskörnungen benötigt.³ Ein schonender(er) Umgang mit Ressourcen kann somit zur Reduktion der THG-Emissionen beitragen.

Die Art, wie gebaut wird, hat folglich entscheidenden Einfluss auf die Begrenzung der Erderwärmung und den Schutz natürlicher Lebensräume. Um zu vermeiden, dass planetare Belastbarkeitsgrenzen⁴ weiterhin überschritten werden, bedarf es im Bauwesen i. S. d. Gesamtheit des Bauschaffens daher einer Schonung von Ressourcen. Hieraus resultiert im Weiteren auch die Notwendigkeit einer gesteigerten Ressourceneffizienz beim Bau und Betrieb von Gebäuden. In den letzten Jahren hat die Energieeffizienz von Neubauten im Betrieb durch die Verschärfung gesetzlicher Vorgaben und die Anpassung von Förderbedingungen bereits kontinuierlich zugenommen. Zuletzt zeigte sich diese Entwicklung in der Novellierung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) zum 1. Januar 2023.⁵

Mit steigender Effizienz im Gebäudebetrieb gewinnt die Senkung der grauen Energie bzw. grauen Emissionen zunehmend an Relevanz. Graue Energie wird für den Abbau von Rohstoffen, die Herstellung von Bauteilen, den Transport von Menschen, Maschinen, Bauteilen und Materialien zur

¹ Vgl. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (2020), S. 1.

² Vgl. Weidner, S. et al. (2021), S. 970.

³ Vgl. Hauptverband der Deutschen Bauindustrie (2022), S. 8.

⁴ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2021).

⁵ Vgl. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2022).

Baustelle, den Einbau von Bauteilen in Gebäude sowie die Entsorgung benötigt. Die dabei entstehenden THG-Emissionen werden als graue Emissionen bezeichnet.⁶ Die Einsparpotenziale, die sich diesbezüglich ergeben, liegen insbesondere in den frühen Planungsphasen, da hier grundlegende Entscheidungen getroffen werden.⁷ So trägt z. B. das zirkuläre Bauen – von dem das Bauen im Bestand ein Teilaspekt ist – wesentlich zur Einsparung natürlicher Ressourcen bei.⁸ Nichtsdestotrotz ergeben sich auch im Rahmen der Bauausführung und des Bauhauptgewerbes Möglichkeiten zur Einsparung von Ressourcen und sog. grauer Energie, auf die in dieser Kurzanalyse eingegangen werden sollen. Schließlich beschäftigen sich die hierzu zählenden Unternehmen überwiegend mit dem Bau von Gebäuden, Straßen und Bahnverkehrsstrecken sowie mit Rückbauarbeiten⁹. Sie sind folglich an der Entstehung von direkten Umweltwirkungen beteiligt – wohlwissend, dass eine Abhängigkeit von der vorausgehenden Planung besteht.

Während Kapitel 2 der vorliegenden Kurzanalyse zunächst eine Erläuterung der Tätigkeitsfelder und Strukturen des Bauhauptgewerbes bietet und zeigt, wo die wesentlichen Ressourcenverbräuche im Hochbau entstehen, liegt das Hauptaugenmerk von Kapitel 3 auf den vielfältigen Ressourceneffizienzpotenzialen beim Errichten von Gebäuden. Basierend auf der Norm DIN EN 15804:2022-03 werden hier u. a. die Module „Transport“ (Modul A4 der Norm) und „Bau/Einbau“ (Modul A5) berücksichtigt.¹⁰ Die vorgelagerte Herstellungsphase (inklusive der Aspekte Rohstoffgewinnung, Transporte und Baustoffherstellung) wird im Zuge dieses Kapitels ebenso thematisiert – wohlwissend, dass das Bauhauptgewerbe keine bzw. nur geringe Möglichkeiten zur Einflussnahme auf die Materialwahl hat. In Form eines kurzen Exkurses werden in diesem Kapitel zudem – ergänzend und überblicksartig – die losgelöst von den Bautätigkeiten

⁶ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2023), S. 7.

⁷ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2019a), S. 14.

⁸ Vgl. Steger, S. et al. (2022), S. 5 f.

⁹ Vgl. Statistisches Bundesamt (2022a), S. 3.

¹⁰ Vgl. DIN EN 15804:2022-03.

des Bauhauptgewerbes erzielbaren Ressourceneffizienzpotenziale an den unternehmenseigenen Standorten betrachtet.

In Kapitel 4 werden anschließend digitale Methoden und Werkzeuge vorgestellt, die im Zuge der Bauausführung zum Tragen kommen und die bei der Einsparung von Ressourcen unterstützen können, um im Rahmen von Kapitel 5 auf die stetig komplexer und interdisziplinärer werdende Bauabwicklung einzugehen. Der Fokus des Kapitels liegt insbesondere auf der integrierten Projektabwicklung sowie dem Lean Construction.

Im abschließenden Fazit der Kurzanalyse sind die wesentlichen Erkenntnisse der vorausgegangenen Kapitel zusammengefasst mit dem Ziel, kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) der Bauwirtschaft einen Einblick in die aktuellen Möglichkeiten zur Einsparung von Ressourcen im Zuge der Bauausführung zu geben, um sich damit auseinanderzusetzen, mittelfristig Erfahrungen zu sammeln und so langfristig zur Ressourcenschonung im Bauhauptgewerbe beizutragen.

2 DAS BAUHAUPTGEWERBE

2.1 Tätigkeiten und Struktur

Das Bauhauptgewerbe ist neben dem Ausbau- und Bauhilfsgewerbe Teil der Bauwirtschaft und setzt sich aus folgenden Bereichen zusammen¹¹:

- Bau von Gebäuden,
- Bau von Straßen und Bahnverkehrsstrecken,
- Leitungstiefbau und Kläranlagenbau,
- sonstigem Tiefbau,
- Abbrucharbeiten und vorbereitenden Baustellenarbeiten sowie
- sonstigen spezialisierten Bautätigkeiten.

Diese vielfältigen Aufgaben wurden im Jahr 2022 von ca. 928.500 Personen übernommen¹². Die Branchenstruktur ist durch eine große Anzahl von Klein- und Kleinstunternehmen charakterisiert (vgl. Abbildung 1).

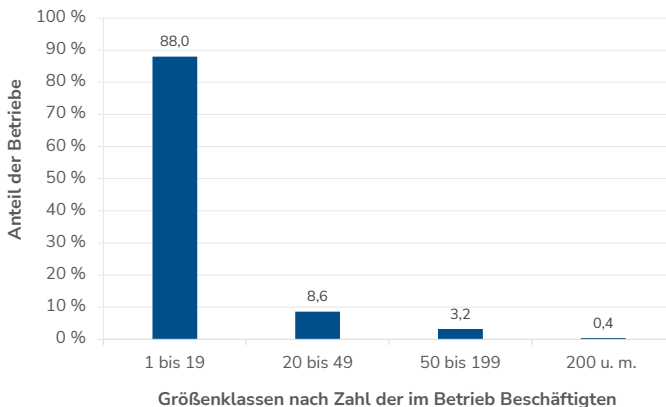


Abbildung 1: Struktur des Bauhauptgewerbes in Deutschland nach Beschäftigtengrößenklassen¹³

¹¹ Vgl. Statistisches Bundesamt (2022a), S. 3.

¹² Vgl. Statistisches Bundesamt (2022a), S. 14.

¹³ Eigene Darstellung auf Basis von Statistisches Bundesamt (2022a), S. 9.

Ungefähr 88 % der Betriebe haben zwischen einem und 19 Mitarbeitenden (Stand Juni 2022).¹⁴ Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) erwirtschafteten im Jahr 2020 etwa 84 % des Gesamtumsatzes im Bauhauptgewerbe.¹⁵

Der Schwerpunkt der Tätigkeiten liegt auf der Errichtung von Hoch- und Tiefbauten. Hieraus wird die Abhängigkeit des Bauhauptgewerbes vom Neubaugeschehen ersichtlich. Während kleinere Unternehmen in den vergangenen Jahrzehnten vorwiegend im Wohnungsbau beschäftigt waren, haben sich mittlere Bauunternehmen in allen Bausparten gleichermaßen betätigt. Für große Unternehmen zeigte sich insbesondere der gewerbliche Bau von großer Relevanz, während der Wohnungsbau eine untergeordnete Rolle spielte (vgl. Abbildung 2).¹⁶

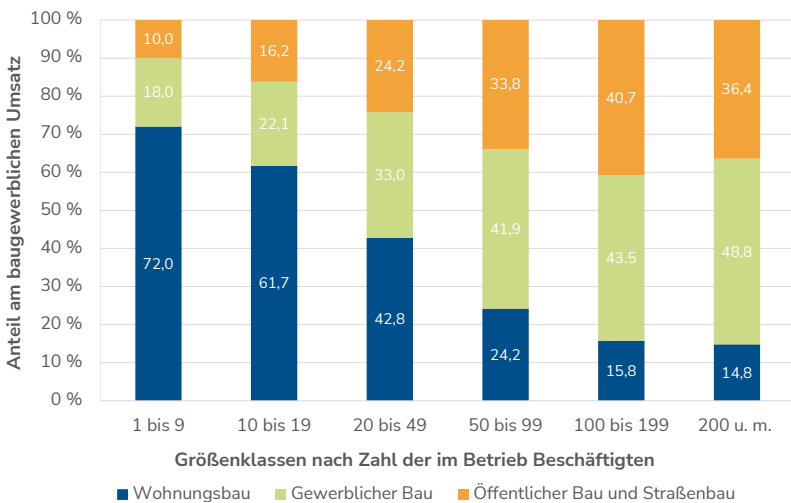


Abbildung 2: Anteil am baugewerblichen Umsatz nach Beschäftigtengrößenklassen im Juni 2022¹⁷

¹⁴ Vgl. Statistisches Bundesamt (2022a), S. 9.

¹⁵ Vgl. Statistisches Bundesamt (2022b).

¹⁶ Vgl. Kraus, P. (2023b), S. 5.

¹⁷ Eigene Darstellung auf Basis von Statistisches Bundesamt (2022), S. 23.

Zuletzt zeigte sich auch im Bauhauptgewerbe ein Rückgang der Auftrags-eingänge.¹⁸ Es ist anzunehmen, dass diese Entwicklung im Zusammen-hang mit zunehmenden Materialpreisen, gestiegenen Zinsen und man-gelnder Materialverfügbarkeit steht.¹⁹

2.2 Ressourcenverbrauch

Die Inanspruchnahme von natürlichen Ressourcen (Rohstoffe, Energieres-sourcen, Wasser, Luft, Fläche, Boden und Ökosystemleistungen) im Rah-men der Errichtung von Gebäuden resultiert im Ausstoß von THG-Emissi-onen. Deren Minimierung steht aktuell im Fokus, um Klimaschutzgesetz-teskonform die THG-Neutralität bis 2045²⁰ zu erreichen. Während insbe-sondere der Gebäudebetrieb und die Herstellung von Bauprodukten für einen hohen Anteil der Lebenszyklusemissionen von Gebäuden verant-wortlich sind, wird dem Bauhauptgewerbe bzw. der Gebäudeerrichtungs-phase ein Anteil von etwa 2,6 % an den betreffenden Emissionen zuge-sprochen.²¹ Dies kann sich jedoch in Abhängigkeit des individuellen Bau-projekts, der Berechnungsmethodik und der damit einhergehenden An-nahmen stark unterscheiden (vgl. Dokumentation des Fachgesprächs).

Darüber hinaus sorgt die steigende Anzahl von Niedrigenergie- bzw. Nullenergiehäusern dafür, dass perspektivisch die Errichtungsphase anstelle der Betriebsphase immer mehr in den Fokus der Auseinandersetzung gerückt wird.

Ein hoher Anteil der Emissionen resultiert derzeit aus der Nutzung fossiler Energieträger für Transporte. In Abhängigkeit des Standorts und der hauptsächlich eingesetzten Materialien wird angenommen, dass der An-teil der Emissionen, die durch die Transporte zur Baustelle verursacht wer-den, zwischen 5 und 10 % der Gesamtemissionen eines Gebäudes im

¹⁸ Vgl. Kraus, P. (2023a).

¹⁹ Vgl. Eckardt, L. (23. September 2022).

²⁰ Vgl. Thamling, N. und Rau, D. (2022), S. 6.

²¹ Vgl. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (2020), S. 14.

Lebenszyklus²² betragen können. Die Analyse eines hypothetischen Wohnungsbaus am Standort Wien kam zu dem Ergebnis, dass die CO₂-Emissionen in der Errichtungsphase in etwa 10 % der CO₂-Emissionen entsprechen, die von der Rohstoffbeschaffung bis zur Inbetriebnahme verursacht werden.²³ Dabei sind die Transportaktivitäten insgesamt für rund 77 % der Emissionen während des Baus²⁴ verantwortlich. Aufgrund vorherrschender Datenintransparenz bleibt die Ermittlung der transportbedingten Emissionen in der Errichtungsphase jedoch eine Herausforderung.

Fossile Energieträger kommen darüber hinaus auch auf der Baustelle selbst zum Einsatz. Baumaschinen werden nach wie vor überwiegend mit Dieselmotoren betrieben.²⁵ Sind im Rahmen der Errichtung von Gebäuden schwere Maschinen erforderlich, z. B. für Spezialtiefbauarbeiten, resultiert daraus ein entsprechend hoher Ressourcenverbrauch.²⁶

Weiterhin trägt der anfallende Baustellenabfall zu einem hohen Anteil der CO₂-Emissionen während der Bauausführung bei, insbesondere wenn die Herstellung, der Transport und das Abfallmanagement in die Bilanz integriert werden.²⁷ Im Jahr 2020 fielen in Deutschland 220,6 Mio. t mineralischen Bauabfalls an. Dieser setzt sich überwiegend aus Boden und Steinen (129,2 Mio. t) sowie aus Bauschutt (60 Mio. t), Straßenaufbruch (16,9 Mio. t), Bauabfällen auf Gipsbasis (0,7 Mio. t) und Baustellenabfällen (13,8 Mio. t) zusammen²⁸ (vgl. Abbildung 3).

²² Vgl. Weidner, S. et al. (2021), S. 975.

²³ Vgl. Obernosterer, R. et al. (2021), S. 73.

²⁴ Vgl. Obernosterer, R. et al. (2021), S. 71.

²⁵ Vgl. Heidt, C. et al. (2020), S. 68.

²⁶ Vgl. Obernosterer, R. et al. (2021), S. 87.

²⁷ Vgl. Obernosterer, R. et al. (2021), S. 71.

²⁸ Vgl. Kreislaufwirtschaft Bau (2023), S. 6.

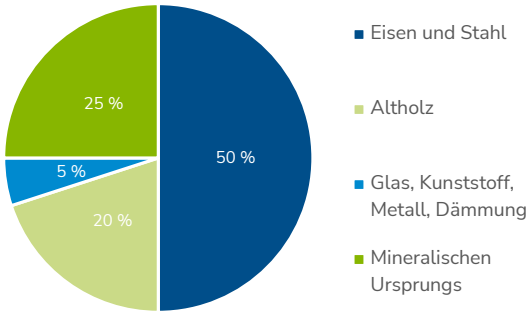


Abbildung 3: Zusammensetzung der Baustellenabfälle in Deutschland (2020)²⁹

Eine Verwertung der Materialressourcen erfolgt größtenteils durch Verfüllung von überflüssigen Steinbrüchen und Abgrabungen sowie auf Deponien und im Straßenunterbau. Mittels Recyclings konnten rund 13,2 % des Bedarfs an Gesteinskörnungen gedeckt werden.³⁰ Die Recyclingrate der Baustellenabfälle lag insgesamt jedoch bei lediglich 1,6 %, obwohl die anfallenden Materialfraktionen Eisen, Stahl, Holz, Glas, Kunststoff und Metall, sofern sie sortenrein vorliegen, recycelbar sind.³¹

²⁹ Eigene Darstellung auf Basis von Kreislaufwirtschaft Bau (2023), S. 9.

³⁰ Vgl. Kreislaufwirtschaft Bau (2023), S. 10.

³¹ Vgl. Kreislaufwirtschaft Bau (2023), S. 9.

3 RESSOURCENEFFIZIENZ UND -SCHONUNG BEIM BAU VON GEBÄUDEN

Baustellen und Bauprojekte sind in der Regel komplex und individuell. Ebenso vielseitig sind die Gewerke des Bauhauptgewerbes und deren Aktivitäten. In Abhängigkeit des Bauvorhabens und der jeweiligen Spezialisierung ist es möglich, dass zahlreiche Unternehmen – parallel oder sukzessive – auf einer Baustelle arbeiten. Die Randbedingungen unterscheiden sich dabei je nach Standort, Bauwerksart, Lebenszyklusphase, Budget und Kompetenzen der beteiligten Bauunternehmen. Daraus ergeben sich unterschiedliche Potenziale der erreichbaren Ressourceneffizienz.

Bedeutung von Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung

Gemäß der Richtlinie VDI 4800 Blatt 1 bezeichnet **Ressourceneffizienz** „das Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz“³². Der Nutzen wird hierbei als ein Produkt, eine Funktion oder funktionelle Einheit definiert. Der Einsatz (auch Aufwand) bezeichnet die Menge der benötigten natürlichen Ressourcen zur Erzielung des Nutzens. Zu den natürlichen Ressourcen zählen Primärrohstoffe, Energiressourcen, Wasser, Luft, Fläche und Boden sowie Ökosystemleistungen.³³

Ressourcenschonung bezeichnet die absolute Einsparung von eingesetzten natürlichen Ressourcen. Durch eine Steigerung der Ressourceneffizienz ist dies möglich, wenn der Nutzen bei verringertem Ressourcenaufwand konstant bleibt. Es können jedoch auch bei gleichbleibender Ressourceneffizienz Ressourcen geschont werden, wenn sich Nutzen und Aufwand reduzieren.³⁴

³² VDI 4800 Blatt 1:2016-02.

³³ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02.

³⁴ Vgl. Entwurf VDI 4800 Blatt 1:2023-08.

3.1 Bauen im Bestand

Bevor die Entscheidung für einen Neubau getroffen wird, sollte stets geprüft werden, ob bereits bestehende Gebäude um- bzw. weitergenutzt werden können. Dies kann je nach Bedarf mit einer Sanierung, Modernisierung, Erweiterung oder Adaptierung verbunden werden. Die Entscheidung für ein solches Vorhaben liegt für gewöhnlich nicht bei den Unternehmen des Bauhauptgewerbes. Sie können sich jedoch grundsätzlich dafür einsetzen und je nach Sinnhaftigkeit z. B. im Rahmen neuartiger Projektentwicklungsformen wie der integrierten Projektentwicklung (vgl. Kapitel 5) den entscheidungstragenden Instanzen nahelegen.

Für gewöhnlich spart das Bauen im Bestand mehr Ressourcen im Vergleich zu einem Neubau mit eventuell vorgelagertem Rückbau. Die benötigte Rohstoffmenge ist geringer, weniger Transporte sind erforderlich und die Energieeffizienz des bestehenden Gebäudes kann potenziell verbessert werden. Zudem kann die in der Vergangenheit zur Errichtung und Bauproduktion benötigte Energie, insbesondere für die Primärtragkonstruktion des Gebäudes, eingespart werden.^{35,36} Darüber hinaus ergibt sich beim Bauen im Bestand eine geringere Flächeninanspruchnahme als beim Neubau. Täglich werden in Deutschland ca. 55 Hektar (ha) Land für den Neubau in Anspruch genommen und versiegelt – das entspricht einer Fläche von 78 Fußballfeldern. Ziel der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie ist es, den Flächenverbrauch bis zum Jahr 2030 auf 30 ha zu begrenzen. Bis 2050 soll ein Netto-Null-Flächenverbrauch erreicht werden.³⁷

³⁵ Vgl. Weidner, S. et al. (2021), S. 971.

³⁶ Vgl. Steger, S. et al. (2022), S. 5 – 8.

³⁷ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023).

Abriss und Neubau gegenüber Sanierung

Eine Szenarioanalyse des Wuppertal Instituts von 2022 untersuchte, inwieweit energetisches Sanieren im Vergleich zu Abriss und Neubau zur Schonung von Energieressourcen, natürlichen Rohstoffen und Reduzierung von THG-Emissionen beiträgt. Die Lebenszyklusbetrachtung von drei Beispielgebäuden zeigte u. a., dass Modernisierungen ökologische Vorteile mit sich bringen, insbesondere bei der Umstellung in Bestandsbauten von Erdgas auf Fernwärme oder Wärmepumpenheizung. Der Materialbedarf für die Sanierung der untersuchten Gebäude lag zwischen 2,3 und 46 t. Ein vergleichbarer Neubau benötigt 1.276 bis 7.070 t. Während der Nutzungsphase bis zum Jahr 2070 liegen die verursachten THG-Emissionen sanierter Bestandsgebäude deutlich unter denen des Neubaus, trotz angenommener ineffizienterer Gebäudehülle. Das liegt u. a. daran, dass die Errichtung von Neubauten mit großen Mengen von THG-Emissionen einhergeht (vgl. Abbildung 4)³⁸.

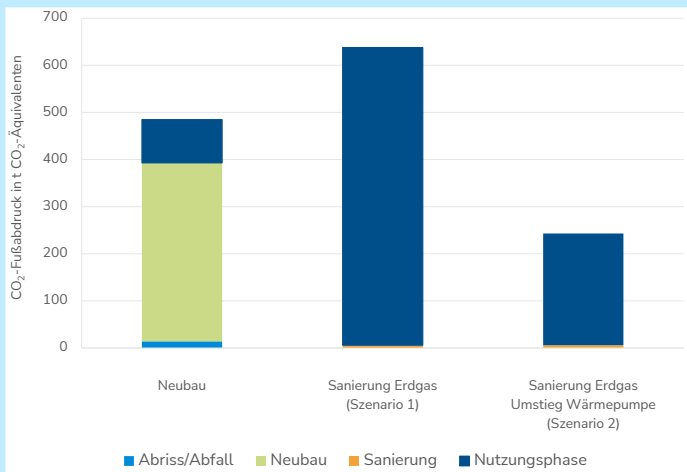


Abbildung 4: THG-Emissionen im Lebenszyklus: Rückbau und Neubau gegenüber einer energetischen Sanierung © Wuppertal Institut³⁹

³⁸ Vgl. Steger, S. et al. (2022), S. 5 – 8.

³⁹ Steger, S. et al. (2022), S. 7.

Weiternutzung eines Gebäudes in Wien

Eine Studie der Werner Sobek AG von 2021 untersuchte anhand eines Altbaus mit einer Bruttogesamtfläche von 80.000 m² im Althan-Quartier in Wien, inwieweit sich eine Kernsanierung und Aufstockung im Vergleich zu einem Abriss und Neubau auf den Ressourcenverbrauch auswirken.

Die Weiternutzung der Stahlbetonstruktur des bestehenden Gebäudes führte zu einer Einsparung von 18.500 t CO₂-Äquivalenten (CO₂e) und 132.000 t Rohstoffen. Darüber hinaus ergab die Studie, dass sich die Bauzeiten reduzierten und es zu einer geringeren Lärm- und Staubbelastung käme. Außerdem ließen sich 20.000 LKW-Fahrten vermeiden, die bei einem herkömmlichen Abriss und Neubau nötig wären.⁴⁰

3.2 Optimierung der Baulogistik

Die Baulogistik zu verbessern, stellt eine Möglichkeit dar, den Ressourcenverbrauch des Bauhauptgewerbes zu reduzieren. Potenziale ergeben sich u. a. in der Beschaffung, der Verbesserung logistischer Prozesse sowie der geeigneten Wahl der Baustelleneinrichtung inklusive aller Maschinen und Geräte. Auch die Bauweise selbst wirkt sich auf die Optimierungspotenziale der Baulogistik aus. Die Potenziale stehen dabei in engem Zusammenhang mit der Digitalisierung logistischer Prozesse (vgl. Kapitel 4.1 sowie Kapitel 4.3).

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die folgend vorgestellten Maßnahmen nur zum Teil unmittelbar durch einzelne Unternehmen innerhalb eines Bauprojekts umsetzbar sind. Eine übergeordnete Optimierung der Baulogistik befähigt KMU dazu, die individuelle Ressourceneffizienz zu steigern.

⁴⁰ Vgl. Weidner, S. et al. (2021), S. 971.

3.2.1 Materialbeschaffung

Grundsätzlich sollte bei der Materialbeschaffung auf Regionalität und eine ressourcenschonende Herstellung geachtet werden. Verlässliche Informationen zum Herstellungsprozess sind in den Umweltproduktdeklarationen (EPD) der herstellenden Unternehmen zu finden. Hemmnisse bzw. Hürden liegen hier u. a. im Kostendruck und darin, dass Unternehmen ggf. noch keine EPD für ihre jeweiligen Produkte vorlegen können. Zudem ist häufig die Auskunft zu den Transportdistanzen nur bedingt ableitbar, da je nach Systemgrenze u. U. lediglich die Transporte von der Rohstoffgewinnung bis zum Werkstor abgebildet werden. Neben der Herkunft spielt auch das Materialgewicht mit Blick auf die Transportemissionen eine wesentliche Rolle, weshalb leichte Materialien mit gleicher Funktion bevorzugt werden sollten.⁴¹

Insbesondere die Wahl der Hauptmaterialien einer Gebäudekonstruktion hat Auswirkungen auf die gesamtheitliche Ressourceneffizienz eines Gebäudes, wenn der Ressourcenaufwand über den gesamten Lebenszyklus – von der Rohstoffgewinnung bis zum Rückbau – betrachtet wird.⁴² Konkrete Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen liegen z. B. in der Wiederverwendung von rückgebauten Baustoffen und Bauprodukten, in der Verwendung von Sekundärrohstoffen, im Bauen im Bestand und im Einsatz nachwachsender Rohstoffe aus nachhaltigem Anbau. In Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten und Beschaffenheit des Bodens lassen sich z. B. der Bodenaushub und die Baustelleneinrichtung wiederverwenden.⁴³

Im klassischen Planungsablauf können KMU des Bauhauptgewerbes aktuell keinen oder nur begrenzten Einfluss auf die Materialarten nehmen, da sie in der Regel definierte Aufträge erfüllen und die vorausgegangene Planung umsetzen. Durch neuartige Projektabwicklungsformen wie die

⁴¹ Vgl. Rinne, R. et al. (2022), S. 12.

⁴² Vgl. Weidner, S. et al. (2021), S. 971 – 975.

⁴³ Vgl. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2023).

integrierte Projektabwicklung (vgl. Kapitel 5) ergeben sich jedoch zunehmend Chancen, auch als umsetzendes Unternehmen bereits am Planungsprozess teilzuhaben und die eigene Expertise einzubringen. In aktiver Zusammenarbeit mit der auftraggebenden Instanz und weiteren Projektbeteiligten können gemeinsam ressourcenschonende Lösungen gefunden werden.

Ferner lässt sich durch geeignete Strategien in der Materialbeschaffung Baustellenabfall reduzieren. Wesentliche Einflussfaktoren sind dabei das Engagement der Zuliefernden, der Einkauf, das Materialliefermanagement sowie die designkonforme Beschaffung. Die Zuliefernden bzw. herstellenden Unternehmen nehmen eine Schlüsselposition ein: Sie können die Rücknahme von ungenutzten oder rezyklierbaren Materialien und Verpackungen anbieten sowie projektspezifisch fertigen, sodass möglichst wenig Verschnitt anfällt.⁴⁴

Auch die Umsetzung einer sog. Just-in-Time-Lieferung (Lieferung kleinerer Mengen zum richtigen Zeitpunkt) kann dahingehend Baustellenabfall reduzieren, dass weniger Schäden an den Produkten durch Transport und Lagerung auf der Baustelle auftreten. Weiterhin wird einer Überbestellung vorgebeugt.⁴⁵ Allerdings kann sich im Zuge der Durchführung einer Just-in-Time-Lieferung jedoch ein Zielkonflikt ergeben, sofern mehr Transporte notwendig sind.

Auf Seiten des Einkaufs kann wiederum die Wahl von vorgefertigten und passend zugeschnittenen Produkten Baustellenabfall reduzieren.⁴⁶ In diesem Zusammenhang eignet sich eine exakte Mengenermittlung, z. B. durch Building Information Modeling (BIM, vgl. Kapitel 4.1), um qualitativ hochwertige Materialien und Produkte in den richtigen Mengen einzukaufen.⁴⁷

⁴⁴ Vgl. Ajayi, S. O. et al. (2017), S. 38.

⁴⁵ Vgl. Ajayi, S. O. et al. (2017), S. 44.

⁴⁶ Vgl. Ajayi, S. O. et al. (2017), S. 44.

⁴⁷ Vgl. Ajayi, S. O. et al. (2017), S. 40.

Plattformen für rückgebaute Bauprodukte

Zahlreiche rückgebaute bzw. überschüssige Bauprodukte können über Online-Plattformen in Deutschland und europäischen Nachbarländern eingekauft werden. Oft ist es zudem möglich, eigene Materialien und Produkte zu verkaufen.

3.2.2 Effiziente Baulogistiknetzwerke

Die Logistikplanung sollte keine Nebentätigkeit einzelner Projektbeteiligter sein, sondern übergeordnet und projektübergreifend, bestenfalls in Zusammenarbeit mit der öffentlichen Hand, betrachtet werden.⁴⁸ Durch eine effiziente Planung und Steuerung können Personen- sowie Materialtransporte optimiert und Leerfahrten reduziert werden.⁴⁹ Um wiederum Transporte zu reduzieren, eignen sich Sammellieferungen. Das stünde allerdings im Widerspruch zu einer Just-in-Time-Lieferung. Insbesondere bei innerstädtischen Baustellen steht Lagerplatz nur begrenzt zur Verfügung, sodass Sammellieferungen zu Konsolidierungszentren eine Option darstellen. Von dort aus ist eine Just-in-Time-Lieferung möglich, womit Transporte auf der letzten Meile zur Baustelle reduziert und der Bauprozess beschleunigt werden können.⁵⁰ Zugleich könnten die Zentren für eine effektive Entsorgungslogistik genutzt werden, um zu einer höheren Wiederverwendungs- und Recyclingrate in der Baubranche beizutragen.

Wie zuvor bereits erläutert, kann die Einigung über ein Rücknahmesystem mit den herstellenden Unternehmen bzw. Zuliefernden Abfälle reduzieren. Einzelne Unternehmen haben diese Chance bereits erkannt und bieten sogenannte Big Bags, Transporttaschen aus strapazierfähigem Kunststoffgewebe, z. B. zur sortenreinen Sammlung und Rücksendung von

⁴⁸ Vgl. Przybilla, M. et al. (2022), S. 1.

⁴⁹ Vgl. Przybilla, M. et al. (2022), S. 104.

⁵⁰ Vgl. Przybilla, M. et al. (2022), S. 101.

Dämmstoffresten an. Die Materialreste werden anschließend in die Produktion zurückgeführt.^{51,52}

Für am Baugeschehen Beteiligte gilt es, für den richtigen Umgang mit Baustellenabfällen, z. B. durch Schulungen, sensibilisiert zu werden. Das sortenreine Trennen von Abfällen sollte zudem kontrolliert werden⁵³, sei es durch die Bauleitung oder eine andere beteiligte Person.

Die Transformation hin zu einer Circular Economy im Bausektor erfordert darüber hinaus eine integrierte Kreislauflogistik zwischen herstellenden Unternehmen, Bau- und Rückbauunternehmen (vgl. Abbildung 5).

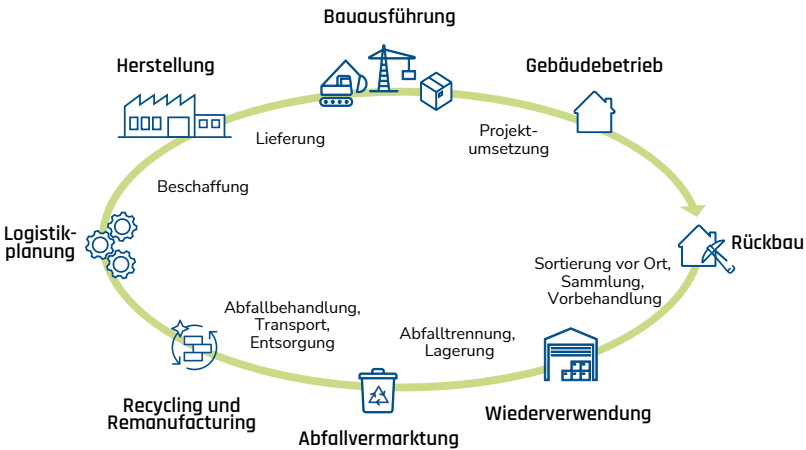


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung des bauleistungslogistischen Prozessumfangs einer integrierten Kreislauflogistik⁵⁴

Herausforderungen an der Schnittstelle zwischen Rückbau und Beschaffung ergeben sich u. a. aus den für gewöhnlich sehr langen Lebenszyklen der gebauten Umwelt und den sich zumeist verändernden Eigentumsverhältnissen nach der Stilllegung von Gebäuden. Zudem gilt es,

⁵¹ Vgl. Rockwool (2020).

⁵² Vgl. Saint-Gobain Isover (2022).

⁵³ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017).

⁵⁴ Eigene Darstellung auf Basis von Ding, L. et al. (2023), S. 8.

perspektivisch zu klären, wie und in welchem Rahmen Bauprodukte im Zuge von Umbaumaßnahmen einer Wiederverwendung oder gar einem Remanufacturing zugeführt werden können.⁵⁵

Ein Logistik-Netzwerk zum Recycling von Gips

Gipshaltige Abfälle treten vor allem bei Sanierung und Rückbau auf, kommen aber auch in größeren Mengen als Verschnitt auf Baustellen⁵⁶ vor. Gipsplatten und Bausteine sind bei zerstörungsfreier Demontage wiederverwendbar. In gebrochener Form ist Gips, sofern sortenrein, vollständig und unbegrenzt bei gleichbleibender Qualität rezyklierbar. Ein geschlossener Stoffkreislauf ist mit Produkten wie Gipskartonplatten, Gipsbausteinen oder Formgipsen möglich.⁵⁷ Aktuell werden diese Produkte jedoch vorwiegend deponiert.⁵⁸ Ein Grund dafür liegt in dem erhöhten logistischen Aufwand im Zuge eines Recyclings. Um diesem Problem entgegenzuwirken, hat das Land Berlin ein Netzwerk von Annahmestellen für Gipsabfälle geschaffen. Die dort gesammelten Gipsressourcen werden anschließend zum nächstgelegenen Gips-Recyclingwerk bei Leipzig transportiert. Insgesamt werden damit Transporte und Baustellenabfälle reduziert. Der Aufwand eines Recyclings ist für die Unternehmen aufgrund der kürzeren Wege geringer.⁵⁹

3.2.3 Baustelleneinrichtung

Unter dem Begriff Baustelleneinrichtung werden all jene Einrichtungen zusammengefasst, die zur Errichtung eines Bauwerks auf der Baustelle benötigt werden. Die Baustelleneinrichtung hängt von dem jeweiligen Bauvorhaben sowie den Umgebungsbedingungen ab und gewährleistet den ordentlichen, organisierten und sicheren Ablauf von Arbeitsschritten

⁵⁵ Vgl. Ding, L. et al. (2023), S. 1.

⁵⁶ Vgl. Müller, F. (2019), S. 2.

⁵⁷ Vgl. Müller, F. (2019), S. 3.

⁵⁸ Vgl. Müller, F. (2019), S. 4.

⁵⁹ Vgl. Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz (2021).

im Zuge des Bauvorhabens. Darüber hinaus ist die Baustelleneinrichtung eine der Grundlagen für ressourceneffizientes Handeln von Seiten der Gewerke des Bauhauptgewerbes.

Im Allgemeinen lässt sich die Baustelleneinrichtung in folgende sechs Hauptgruppen einteilen⁶⁰:

- Großgeräte,
- Sozial- und Büroeinrichtungen sowie Lagerräume,
- Verkehrsflächen und Transportwege,
- Medienversorgung und -entsorgung,
- Baustellensicherung, Sicherheits- und Schutzeinrichtungen sowie
- Baugrubensicherung und Baugruben im Grundwasser.

Für die strukturierte Erfassung und Reduktion des Energieverbrauchs auf der Baustelle eignet sich z. B. die Implementierung eines Energiemanagementsystems nach ISO 50001.⁶¹

Zudem bietet die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) speziell für Baustellen eine Zertifizierung für nachhaltige Baustellen an, mit deren Hilfe der Ressourcenverbrauch merklich gesenkt werden kann (vgl. Kapitel 3.7). Zur Minimierung des Stromverbrauchs wird z. B. die Erstellung eines Stromspar-Konzepts empfohlen, anhand dessen die am Bau Beteiligten intensiv geschult werden. Die Reduktion von CO₂-Emissionen wird über die Empfehlung adressiert, 100 % Ökostrom einzukaufen.⁶²

3.2.3.1 Baumaschinen und -geräte

Baumaschinen und Baugeräte tragen wesentlich zum Ressourcenverbrauch des Bauhauptgewerbes bei. Sie beanspruchen große Mengen an

⁶⁰ Vgl. Schach, R. und Otto, J. (2022), S. 19.

⁶¹ Vgl. Barckhausen, A. et al. (2020).

⁶² Vgl. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2023).

Energieressourcen und verursachen Schadstoffemissionen, die sich wiederum negativ auf Luft, Gesundheit und Ökosystemleistungen auswirken.

Emissionsneutrale Baustelle in Norwegen

Die erste nahezu emissionsneutrale Baustelle wurde 2019 in Oslo, Norwegen, realisiert. Hierbei gab die Stadt den Bau einer Fußgängerzone in Auftrag. Der norwegische Strommix stammt zu nahezu 100 % aus erneuerbaren Energiequellen, wodurch sich elektrische Baumaschinen für das Vorhaben als besonders günstig erwiesen. Die Stadt mietete als Auftraggeberin die Maschinen an und stellte diese dem ausführenden Bauunternehmen zur Verfügung. Zum Einsatz kamen ein Elektroradlader und ein 8-Tonnen-Elektrobagger mit Lithium-Ionen-Batteriespeicher sowie ein 25- und 16-Tonnen-Elektrobagger mit Batteriespeicher und Kabelbetrieb-Option. Ein weiterer Radlader, der für schwerere Arbeiten benötigt wurde, konnte mit hydriertem Pflanzenöl betrieben werden. Die Stadt Oslo plant, ab 2025 alle öffentlichen Bauvorhaben emissionsfrei umzusetzen.⁶³

In Abhängigkeit des jeweiligen Einsatzgebietes variieren die Antriebsart und Leistung der Baumaschinen. Der Großteil der auf Baustellen genutzten Maschinen wird mithilfe von Dieselmotoren betrieben; nur selten wird auf Benzin als Kraftstoff zurückgegriffen. Einige Geräte, wie z. B. Kräne, Pumpen, Schweißgeräte und Kühleinheiten, verfügen über einen Elektroantrieb.⁶⁴

Das ifeu-Institut berechnete im Jahr 2016 die Schadstoffemissionen der Baumaschinen in Deutschland. Es zeigte sich, dass die Baumaschinen für knapp 40 % der CO₂-Emissionen aller mobilen Maschinen verantwortlich

⁶³ Vgl. Ellingsen, H. E. (2021).

⁶⁴ Vgl. Heidt, C. et al. (2020), S. 68 – 69.

sind. Das entspricht in etwa 12 % der CO₂-Emissionen des straßengebundenen Güterverkehrs (vgl. Abbildung 6).^{65,66}

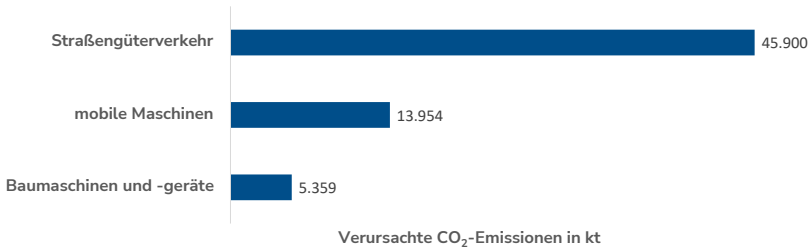


Abbildung 6: Verursachte CO₂-Emissionen in kt durch den Einsatz mobiler Maschinen im Vergleich zum Straßengüterverkehr in Deutschland⁶⁷

Die Steigerung der Ressourceneffizienz ist durch den Einsatz alternativer Antriebstechnologien und Kraftstoffe möglich. Bagger, Radlader und Kompressoren sind bereits mit hybridem oder elektrischem Antrieb erhältlich. Weitere Alternativen zu fossilen Kraftstoffen stellen zudem Technologien wie z. B. grüner Wasserstoff, Biodiesel oder HVO-Kraftstoffe dar.

⁶⁵ Vgl. Umweltbundesamt (2022).

⁶⁶ Vgl. Heidt, C. et al. (2020), S. 94.

⁶⁷ Eigene Darstellung auf Basis von Umweltbundesamt (2022) sowie Heidt, C. et al. (2020), S. 94.

28-Tonnen-Elektrobagger mit Lithium-Ionen-Batteriespeicher

Im Rahmen des Umweltinnovationsprogrammes (UIP) des Bundesumweltministeriums erhielt die Helmut Uhrig Straßen und Tiefbau GmbH eine Förderung zum Erwerb und Betrieb eines 28-Tonnen-Elektrobaggers mit integriertem Lithium-Ionen-Batteriespeicher. Ziel ist es, den kabellosen umweltfreundlichen Betrieb zu demonstrieren und dessen Eignung, verglichen mit einem konventionellen dieselbetriebenen Bagger, nachzuweisen. Beim aktuellen deutschen Strommix liegen die CO₂-Einsparungen des Elektrobaggers gegenüber dem Dieselmöbagger bei etwa 50 %. Das entspricht einer absoluten Einsparung von ca. 30 bis 70 t CO₂ pro Jahr.⁶⁸

Die Anschaffungskosten von elektrischen Baumaschinen liegen, mitunter aufgrund hoher Entwicklungskosten, in der Regel noch deutlich über denen für dieselbetriebene Maschinen. Das stellt insbesondere für KMU ein großes Hemmnis dar. Bauunternehmen und Maschinenherstellende empfehlen daher die Schaffung adäquater Fördermöglichkeiten, z. B. durch Berücksichtigung mobiler Maschinen im Programm „Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft“⁶⁹.

Unabhängig von Förderprogrammen kann sich der Erwerb elektrischer Maschinen lohnen, da Wartung, Reparatur und Betrieb günstiger sind.⁷⁰ Aus diesem Grund ist – in Abhängigkeit der Vorhaltezeit – die Anschaffung von kleinen Elektrobaggern günstiger. Hieraus ergeben sich wiederum Wettbewerbsvorteile für Unternehmen, die in ihrem Fuhrpark auf Elektroantrieb setzen.⁷¹

⁶⁸ Vgl. Umweltinnovationsprogramm (2023).

⁶⁹ Vgl. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2023).

⁷⁰ Vgl. Obernosterer, R. et al. (2021), S. 84 – 85.

⁷¹ Vgl. Obernosterer, R. et al. (2021), S. 101.

Alternativ zur Anschaffung für das eigene Unternehmen ist auch das Mieten effizienter bzw. elektrisch betriebener Baumaschinen und -geräte denkbar. Die daraus resultierende gemeinsame Nutzung von Maschinen mit anderen Unternehmen führt folglich zu zusätzlichen Ressourceneinsparungen auf Seiten der Bauunternehmen. Es wäre daher sinnvoll, entsprechende Anreize für das Mieten elektrischer Maschinen und Geräte zu schaffen.

Fördermöglichkeiten für elektrische Geräte

Motorabgase stellen insbesondere bei hoher Konzentration der Gase eine Gesundheitsgefährdung dar. Zu solchen Gefahrensituationen kommt es u. a. auf Baustellen, auf denen mit diesel- und benzinbetriebenen Geräten in schulterhohen Gräben gearbeitet wird. Klassische Geräte, die hier eingesetzt werden, sind dieselbetriebene Stampfer und Rüttelplatten.

Zur Verbesserung des Arbeitsschutzes fördert die Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU) daher die Anschaffung von elektrisch betriebenen Stampfern und Rüttelplatten sowie von dieselbetriebenen Geräten mit Partikelfilter. Bis zu 50 % der Anschaffungskosten werden dabei übernommen, im Falle von akkubetriebenen Geräten maximal 800 Euro.⁷²

3.2.3.2 Baucontainer

Container kommen auf Baustellen in vielfältiger Weise zum Einsatz. Sie werden als Büro- und Aufenthaltsräume genutzt, aber auch als Sanitäräume. Die Tagesunterkünfte müssen beheizbar sein, wobei der Einsatz gasbetriebener Heizungen die überwiegende Praxis ist.⁷³ Folgende Maßnahmen können jedoch dabei unterstützen, Ressourcen nachhaltig einzusparen:

⁷² Vgl. BG Bau (2022).

⁷³ Vgl. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2019), S. 4.

- Dämmung der Container⁷⁴,
- Einbau eines Thermostates im Baucontainer⁷⁵,
- Einsatz energieeffizienter Beleuchtungstechnik, Heiz- und Kühlsysteme⁷⁶,
- Verlegung der Bauzeit auf mildere Monate, sodass der Bedarf einer Heizung bzw. Kühlung gänzlich oder teilweise entfällt⁷⁷,
- Installation einer Präsenzsteuerung sowie
- Anwendung passiver Kühlsysteme (z. B. Beschattung, Begrünung) zur Kühlung von Containern in warmen und heißen Monaten.

Mit Blick auf die Energieversorgung auf der Baustelle besteht z. B. die Option, Baucontainer mit mobilen Photovoltaik-(PV-)Modulen resp. -Matten auszustatten (vgl. Abbildung 7). Um den so produzierten Strom auch während dunkler Tageszeiten nutzen zu können, ist es ratsam, die mobile PV-Anlage mit einem Batteriespeicher zu kombinieren⁷⁸. Zur Vermeidung von Leistungseinbußen ist zudem darauf zu achten, dass die Module frei von Verunreinigungen gehalten werden⁷⁹. Nach Herstellangaben lassen sich mit einer mobilen PV-Anlage in Deutschland bis zu 2.300 Kilowattstunden pro Jahr produzieren – und damit ca. 2,3 t CO₂ einsparen.

Je nach Beschaffenheit der Baustelle können mehrere Anlagen miteinander kombiniert betrieben und ein Vielfaches dessen eingespart werden. Ein weiterer Vorteil von PV-Modulen ist, dass sich durch Verschattung der Kühlbedarf in heißen Jahreszeiten reduziert. Montage und Demontage der Module können mit einem elektrischen Kran oder Gabelstapler erfolgen.⁸⁰

⁷⁴ Vgl. Lücke, N. (2021).

⁷⁵ Vgl. Obernosterer, R. et al. (2021), S. 47.

⁷⁶ Vgl. Lücke, N. (2021).

⁷⁷ Vgl. Obernosterer, R. et al. (2021), S. 69.

⁷⁸ Vgl. Obernosterer, R. et al. (2021), S. 83 – 84.

⁷⁹ Vgl. Obernosterer, R. et al. (2021), S. 94.

⁸⁰ Vgl. Faber Infrastructure GmbH (2023).



Abbildung 7: Ausstattung eines Baucontainers mit mobilen PV-Modulen zur Erzeugung von Strom auf der Baustelle © Hartl Energy GmbH

3.2.3.3 Baustellenbeleuchtung

Zur Beleuchtung von Baustellen kann i. d. R. auf das öffentliche Stromnetz zurückgegriffen werden. Es empfiehlt sich, Leuchtdioden (LED) einzusetzen. Ist ein Anschluss an das öffentliche Stromnetz nicht möglich, können mobile Lichtmasten, die mit LEDs, Batterien, Solarzellen und Aggregaten ausgestattet sind, verwendet werden.

3.2.3.4 Dynamische Baustelleneinrichtung

Ziel ist es, die Baustelleneinrichtung so zu gestalten, dass – stets unter Berücksichtigung der Arbeitssicherheit – die Wege der beschäftigten Personen möglichst kurz sind und damit ein effizienter und reibungsloser Material-, Geräte- und Arbeitsfluss gewährleistet wird. Liegt genügend Fläche vor, wäre die Anordnung der Einrichtungen rund um das zu errichtende

Bauwerk die effizienteste Vorgehensweise. Diese Variante ist in der Regel jedoch aufgrund limitierter Platzverhältnisse nicht umsetzbar.⁸¹

Prinzipiell ist es möglich, zwischen einer dynamischen und einer statischen Baustelleneinrichtung zu unterscheiden. Während im Fall einer statischen Einrichtung die Baustelle über die Errichtungsphase hinweg unverändert bestehen bleibt, verändert sich die Anordnung der dynamischen Einrichtung während der Bauphase.

Die dynamische Einrichtung ist dabei aufgrund lokaler Limitierungen, z. B. bei innerstädtischen Baustellen, erzwungen, kann aber bei ausreichend verfügbarer Fläche gleichermaßen eine Optimierung des Bauablaufs und eine Reduktion des Ressourcenverbrauchs bewirken. Flächen können sowohl außerhalb des Bauwerks als auch innerhalb des im Bau befindlichen Gebäudes definiert werden.⁸² Inwiefern sich eine dynamische Baustelleneinrichtung als praxistauglich erweist, ist stets in Abhängigkeit der örtlichen Einschränkungen der Baustelle abzuwägen.

3.2.4 Vorfertigung von Modulen und Elementen

Durch die Vorfertigung von Modulen und Elementen können Transporte reduziert und die Logistikemissionen im gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes verringert werden⁸³.

Anders als bei konventionellen Bauweisen erfolgt die Materialversorgung bei der Vorfertigung in einem zweistufigen Prozess: Im ersten Schritt werden die Materialien zunächst zu einer Fabrik transportiert und dort zu einem Produkt verarbeitet. Dieses fertige Modul oder Element wird im zweiten Schritt zur Baustelle transportiert, um dort verbaut zu werden.⁸⁴ Auf diese Weise ist es KMU des Bauhauptgewerbes, die ihre Geschäftsmodelle auf serielles bzw. modulares Bauen ausrichten, möglich, zugleich

⁸¹ Vgl. Kumar, S. S. und Cheng, J. C. (2015), S. 24.

⁸² Vgl. Kumar, S. S. und Cheng, J. C. (2015), S. 24.

⁸³ Vgl. Ding, L. et al. (2023), S. 5.

⁸⁴ Vgl. Zhu, M. et al. (2021), S. 1.

ihre Baustellenabfälle zu reduzieren und negative Umweltwirkungen (z. B. Lärm, Staub) zu verringern.

Zudem sind verbaute Elemente und Module nach der Nutzungsphase potenziell wiederverwendbar, woraus sich eine deutlich erhöhte Ressourceneffizienz im Zuge von Umbau- oder Rückbauphasen ergibt. Gegenüber konventionellen Bauweisen resultiert aus der Vorfertigung eine klare Zeitersparnis im Rahmen der Errichtungsphase, woraus sich wiederum eine mögliche Kostenreduktion ergeben kann. Außerdem ist die Herstellung von Elementen und vorkonfektionierten Modulen in externen Anlagen witterungsunabhängig und sicherer.⁸⁵

So zeigt z. B. die 2022 durchgeführte Studie „Comparing flexible and conventional monolithic building design: life cycle environmental impact and potential for material circulation“⁸⁶, dass ein flexibles modulares Gebäudedesign mit wiederverwendbaren Komponenten (Stahlkonstruktion und Holzdeckenelementen), insbesondere bei langer Nutzungsdauer, zu Umweltvorteilen gegenüber einem konventionellen Design (monolithische Stahlbetonkonstruktion) führt. Gründe dafür sind eine mitunter längere Gebäudelebensdauer durch Nutzungsflexibilität sowie höhere Grade an Kreislaufführung der verbauten Komponenten und Module.

Die mögliche Wiederverwendung vorgefertigter Strukturelemente reduziert die grauen Lebenszyklusemissionen um bis zu 14 %.⁸⁷ Prinzipiell kann zwischen drei Arten der Vorfertigung differenziert werden: der Modulbauweise, der Elementbauweise und der hybriden Fertigbauweise (vgl. Tabelle 1⁸⁸).

⁸⁵ Vgl. Gunawardena, T. und Mendis, P. (2022), S. 71.

⁸⁶ Kröhnert, H. et al. (2022).

⁸⁷ Vgl. Kröhnert, H. et al. (2022), S. 1.

⁸⁸ Vgl. Gunawardena, T. und Mendis, P. (2022), S. 70.

Tabelle 1: Übersicht zu den verschiedenen Arten der Vorfertigung von Gebäuden

Modulbauweise

Herstellung von vollständig in sich geschlossenen Einheiten in einer externen Anlage, die zur Baustelle transportiert und dort zu einem vollständigen Bauwerk zusammengesetzt werden.

Elementbauweise

Herstellung flacher Elemente in einer externen Anlage, die zur Baustelle transportiert und dort zu einem kompletten Bauwerk zusammengesetzt werden.

**Hybride
Fertigbauweise**

Kombination von Elementbau- und Modulbauweise. Stark beanspruchte und standardisierte Bereiche wie Küchen und Bäder werden als geschlossene Einheiten vorgefertigt, während der Rest des Gebäudes aus Paneelen oder Modulen gebaut wird.

3.3 Herstellung der Baugrube

Bei der Errichtung von Neubauten sollte besonderes Augenmerk auf mögliche Untergeschosse gelegt werden, da diese zu einem hohen Anteil der THG-Emissionen beitragen können. Inwiefern sich die Herstellung der Baugrube ressourcenschonend durchführen lässt, wurde in einer Fallstudie der Stadt Zürich untersucht.⁸⁹

Liegen z. B. erschwerte Baugrundverhältnisse wie drückendes Grundwasser vor, wird empfohlen, möglichst auf Untergeschosse zu verzichten. Grund dafür ist, dass in solchen Fällen häufig Pfähle und andere aufwendige Baugrubensicherungen erforderlich werden. Sofern in geringer Tiefe (im Rahmen der Studie wurde von einer Tiefe von ca. 3,5 m ausgegangen) eine geeignete Bodenschicht vorhanden ist, können sich statt der Erstellung einer Tiefgründung das Ausheben des Bodenmaterials und die Herstellung der Fundamente auf dieser Bodenschicht ökologisch lohnen.

⁸⁹ Vgl. Kuhn, A. et al. (2023).

Zudem sollte stets die Böschung der Baugrube angestrebt werden. Das ist jedoch vor allem in innerstädtischer Lage nicht immer möglich. Sind steilere Winkel erforderlich, zeigen Sickerbetonwände, Nagelwände und gesprießte Spundwände deutlich reduzierte Umweltwirkungen als z. B. konventionelle Spundwände, Bohrpfahlwände oder Rühlwände. Die Herstellung von Stahlbetonbohrpfählen gestaltet sich als besonders emissionsintensiv. Daher kann es sich als ökologisch vorteilhaft erweisen, eine ungeeignete Bodenschicht auszuheben und durch ein tragfähiges Material zu ersetzen.⁹⁰

3.4 Kreislaufgerechte Bauausführung

Die durch die Baubranche verursachten hohen Abfallmengen sind unter anderem auf ein geringes Wiederverwenden und Recycling von Baumaterialien und -komponenten zurückzuführen. Ein Grund liegt darin, dass der sortenreine Rückbau von Gebäuden aufgrund der in der Vergangenheit häufig verwendeten Verbundstoffe erschwert und somit eine sortenreine Erfassung von Materialien nicht möglich ist.

Wären heute errichtete Gebäude für den Rückbau und die Trennung der Bauteile optimiert, könnten die verbauten Materialien und Komponenten zukünftig leichter wiedergewonnen werden.^{91,92,93}

Das Bauhauptgewerbe steht somit in der Verantwortung, eine kreislaufgerechte Planung wie angedacht umzusetzen und darüber hinaus bauseitig ausgeführte Verbindungen zwischen verschiedenen Materialien demontierbar zu realisieren, sofern sich hierfür eine technische Umsetzbarkeit ergibt.

⁹⁰ Im Rahmen der Studie lohnte sich ein solcher Materialersatz für Gruben bis zu einer Tiefe von 2 m. Vgl. Kuhn, A. et al. (2023), S. ii.

⁹¹ Weiterführende Informationen zur kreislaufgerechten Planung von Gebäuden können der VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 26 sowie dem auf der Website kostenfrei nutzbaren Ressourcencheck „Recyclinggerechtes Konstruieren“ entnommen werden.

⁹² Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2019b), S. 34.

⁹³ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2022).

3.5 Einsparung von Wasser

In Deutschland treten im Zuge des fortschreitenden Klimawandels immer häufigere und längere Dürreperioden auf, insbesondere in den Sommermonaten.⁹⁴ Gleichzeitig zeigen Messungen, dass der Wasserrückgang im langjährigen Mittel etwa 760 Mio. m³ pro Jahr⁹⁵ beträgt. Die Notwendigkeit eines effizienten und schonenden Umgangs mit der Ressource Wasser steigt.

Trinkwasser kommt auf deutschen Baustellen auf verschiedene Arten zum Einsatz: bei der Verarbeitung von Materialien, für die Reinigung von Geräten und Wegen sowie in Sozial- und Sanitärräumen. Die benötigte Menge für die Verarbeitung der Materialien hängt dabei auch stark von der Bauweise ab. Modulares Bauen und die Verwendung von Trockenestrich können bereits zu einer signifikanten Reduktion des Wasserbedarfs auf der Baustelle beitragen. Um den Einsatz von Wasser auf Baustellen möglichst umfassend zu reduzieren, ist es sinnvoll, nicht nur einzelne Maßnahmen umzusetzen, sondern entlang des gesamten Prozesses Lösungen zu finden. So kann es z. B. relevant sein, den Mitarbeitenden bereits vor Beginn des Baus Schulungen anzubieten, in denen ein Bewusstsein für die Sinnhaftigkeit und Notwendigkeit des Wassersparens geschaffen sowie Methoden an die Hand gegeben werden, mit denen das Sparen auf der Baustelle umsetzbar wird.

Wasserverbräuche auf Baustellen zu messen und zu dokumentieren kann ebenso sensibilisierend wirken und dabei unterstützen, Verschwendungsschwerpunkte zu identifizieren und den Verbrauch sukzessive zu reduzieren. Ebenso wichtig ist es, Erfolge zu dokumentieren und an alle Beteiligten zu kommunizieren – sowohl intern als auch extern.⁹⁶

Neben invasiven Methoden, wie etwa dem Einsatz von wasserfreien Toiletten oder der Verwendung wassersparender Maschinen, gibt es

⁹⁴ Vgl. Brasseur, G. P. et al. (2016), S. 113.

⁹⁵ Vgl. Günther, A. et al. (2023), S. 74 ff.

⁹⁶ Vgl. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2023).

während des Baus weitere Möglichkeiten, um mit wenig aufwendigen Maßnahmen den Wasserverbrauch auf Baustellen deutlich zu reduzieren. So können z. B. Baustellenwege mittels Absaugung (und bei starker Verschmutzung ergänzend durch einen Hochdruckreiniger) gesäubert werden, anstatt pauschal mit fließendem Wasser die Wege frei zu spülen.

Gleichermaßen sinnvoll und mit wenig Aufwand verbunden ist es, Maschinen mithilfe eines Wassereimers zu reinigen und dieses Wasser bei schwacher Verschmutzung mehrfach zu nutzen. Für Tätigkeiten auf der Baustelle, die keine Trinkwasserqualität erfordern, ist es sinnvoll, Brauchwasser zu sammeln.⁹⁷ Das Sammeln von Regenwasser bietet sich dann an, wenn bereits eine Dachfläche vorhanden ist oder das zu errichtende Gebäude schnell überdacht werden kann. Regenwasser ist vielfältig einsetzbar und kann nach einmaliger Verwendung bzw. bei geringer Verschmutzung bestenfalls zurückgewonnen werden, z. B. beim Einsatz von Reifenwaschanlagen (vgl. Abbildung 8).



Abbildung 8: Reifenwaschanlage mit Wasser-Recycling © FRUTIGER Company AG/ MobyDick

⁹⁷ Vgl. Smart Approved WaterMark (2022).

3.6 Reduktion von lokalen Umweltwirkungen

Die Errichtung von Gebäuden geht immer auch mit lokalen Umweltwirkungen einher. Diese sind im Sinne der Ressourcenschonung sukzessive zu reduzieren.

3.6.1 Boden- und Gewässerschutz

Der Boden inklusive des Grundwassers und der Vegetation ist eine natürliche Ressource, die es zu schützen gilt. Der Einsatz und die Verwendung giftiger Stoffe, die den Boden, das Wasser oder die Umwelt gefährden, sind aus diesem Grund bestmöglich zu vermeiden. Zusätzlich ist es wesentlich, den Boden keinen schädlichen mechanischen Einflüssen, z. B. der unnötigen Verdichtung oder Vermischung verschiedener Bodenschichten, auszusetzen. Das schützt einerseits Wurzeln und Lebewesen und verhindert andererseits, dass die Versickerungsfähigkeit des Bodens negativ beeinträchtigt wird. Um von vornherein sicherzustellen, dass der Bodenschutz im Rahmen des Bauvorhabens ausreichend Berücksichtigung findet, ist es sinnvoll, diesen Aspekt dezidiert in die Ausschreibungs- und Angebotsunterlagen aufzunehmen und auf der Baustelle zu kontrollieren.⁹⁸

Die Relevanz gesunder Böden für den Klimaschutz wird umso deutlicher, wenn neben der Versickerungsfähigkeit auch die CO₂-Speicherkapazität von Böden betrachtet wird. Dabei spielen die bisher weitestgehend unerforschten Mykorrhiza-Pilze eine entscheidende Rolle. Diese Pilze gehen Symbiosen mit Pflanzenwurzeln im Boden ein und binden, nach aktuellem Kenntnisstand der Forschung, große Mengen an Kohlenstoff. In einer hierzu kürzlich veröffentlichten Publikation⁹⁹ wird geschätzt, dass jährlich 36 % der durch die Nutzung von fossilen Energieträgern verursachten globalen CO₂-Emissionen von diesen Pilzen gespeichert werden¹⁰⁰.

⁹⁸ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017).

⁹⁹ Hierbei handelt es sich um den Artikel „Mycorrhizal mycelium as a global carbon pool“ von Hawkins, H.-J. et al. (2023).

¹⁰⁰ Vgl. Hawkins, H.-J. et al. (2023).

3.6.2 Lärm- und Staubvermeidung

Lärm wirkt sich unmittelbar auf Menschen und Umgebung aus¹⁰¹. Neben dem Verkehr sind die durch Baustellen verursachten Geräuschpegel die bedeutendste Lärmquelle in dicht bebauten Gebieten. Das Bundes-Immissionsschutzgesetz enthält daher die Vorgabe, dass technisch vermeidbarer Lärm zu verhindern ist, indem ggf. erforderliche Vorkehrungen getroffen werden. Neben dem Schutz der natürlichen Umgebung sorgt eine lärmarme Baustelle zudem für mehr Akzeptanz in der Nachbarschaft und reduziert die Gesundheitsgefährdung aller am Bau beteiligten Personen.¹⁰²

Auch Staub wirkt sich negativ auf die Gesundheit des Baustellenpersonals, der Anwohnenden und sonstiger betroffener Personen aus.¹⁰³ Zudem kann Staub die Biodiversität insofern beeinträchtigen, dass von Baustaubpartikeln bedeckte Pflanzen absterben.¹⁰⁴

Je nach Zusammensetzung des Staubs kann es zudem zu stoffbedingten Schädigungen kommen. Aus diesen Gründen sind Maschinen mit Absaugungen auszustatten, um Stäube unmittelbar bei der Entstehung aufzufangen und im Anschluss gefahrenfrei zu entsorgen. Darüber hinaus können zur Beseitigung Feucht- bzw. Nassverfahren genutzt werden, wobei hier wiederum der sparsame Umgang mit Wasser zu berücksichtigen ist.¹⁰⁵

3.7 DGNB-Zertifizierung für nachhaltige Baustellen

Das System der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) für nachhaltige Baustellen dient als Planungs- und Managementtool bei der Bauausführung. Zudem gewährleistet das DGNB-System unter anderem eine Qualitätssicherung und eine Risikominimierung auf der Baustelle.

¹⁰¹ Vgl. Umweltbundesamt (2021).

¹⁰² Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017).

¹⁰³ Vgl. BG Bau (2023).

¹⁰⁴ Vgl. Flohr, S. (2010), S. 7.

¹⁰⁵ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017).

Neben dem Ressourcenschutz werden dabei auch Aspekte wie Gesundheit und Soziales, Baustellenorganisation, Kommunikation mit der Öffentlichkeit und Ausführungsqualität berücksichtigt (vgl. Abbildung 9).

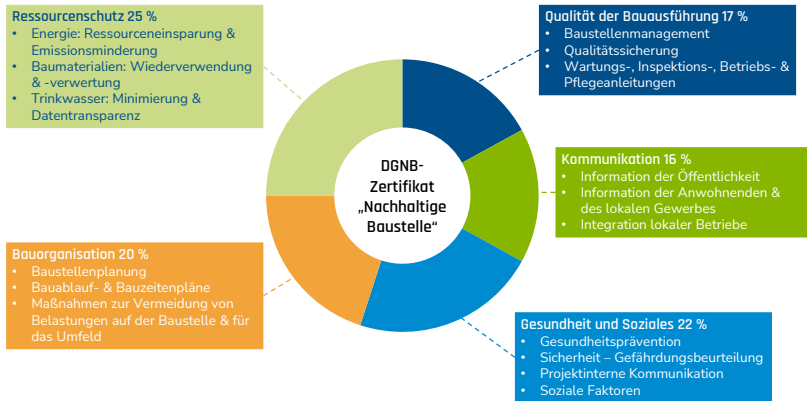


Abbildung 9: Die Kriterien des DGNB-Zertifikats für nachhaltige Baustellen © DGNB¹⁰⁶

Das Zertifizierungssystem ist universell bei nationalen und internationalen Hoch- und Tiefbauprojekten sowie im Spezialtiefbau anwendbar und richtet sich insbesondere an bauverantwortliche Instanzen, Kommunen und Bauunternehmen.¹⁰⁷

Das System ist in Kriterien und Indikatoren organisiert. Einige Indikatoren sind als Mindestvoraussetzung obligatorisch, während andere fakultativ umgesetzt werden können. Für die erfolgreiche Zertifizierung müssen min. 65 % der festgelegten Kriterien erfüllt werden. Verpflichtend im Kriterium des Ressourcenschutzes ist z. B. der Einsatz energieeffizienter Baumaschinen und Anlagen. Alle motorbetriebenen Anlagen und Maschinen mit einer Leistung von mehr als 75 kW sind mit der jeweiligen EU-Stufe zu dokumentieren. Die Winterbauheizung sollte, sofern sie nicht verzichtbar ist, ohne fossile Energieträger betrieben werden.¹⁰⁸

¹⁰⁶ Vgl. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2023).

¹⁰⁷ Vgl. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2023).

¹⁰⁸ Vgl. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2023).

Weitere Indikatoren im Kriterium Ressourcenschutz sind:

- die Versorgung der Baustelle mit 100 % Ökostrom,
- die Offenlegung der Menge eingesetzter Energieträger,
- der Einsatz umweltgerechter Transportmittel,
- die Erfassung sämtlicher Transporte,
- die Offenlegung aller zur Berechnung der transportbedingten CO₂-Emissionen erforderlichen Angaben sowie
- die Vernetzung der Baustelle mit anderen Baustellen.

Die Wiederverwendung und -verwertung von Baumaterialien werden z. B. durch die Umsetzung abfallvermeidender Konzepte adressiert. Maßnahmen zur Trinkwassereinsparung und die Dokumentation des Wasserverbrauchs gehen ebenfalls positiv in die Bewertung ein.¹⁰⁹

Qualitätssicherung und Dokumentation

Im Zuge der Nachhaltigkeitszertifizierung einer Baustelle sind Dokumentationsprozesse erforderlich, die während der Errichtung im Rahmen von Baustellenbegehungen durchzuführen sind. Eine effiziente und einfache Methodik mit geringem Bearbeitungsaufwand stellt hierbei die Nutzung digitaler Checklisten dar, die als Applikation auf mobilen Endgeräten verfügbar gemacht werden können.¹¹⁰ Diese Checklisten dienen dazu, die Einhaltung definierter Maßnahmen aus der Arbeitsvorbereitung zu dokumentieren.

Die Ergebnisse der Baustellenbegehungen können anschließend per E-Mail versandt und auf einer zentralen Plattform gesammelt werden. Das trägt zu einer transparenten Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten bei und ermöglicht die anschließende strukturierte Auswertung der

¹⁰⁹ Vgl. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2023).

¹¹⁰ Vgl. Wall, J. und Schweig, U. (2021), S. 390.

erhobenen Daten. Die Protokolle aus den Begehungen dienen abschließend der Dokumentation im Zuge der Nachhaltigkeitszertifizierung.¹¹¹

3.8 Ressourceneffizienzmaßnahmen in Unternehmen des Bauhauptgewerbes

Neben der Umsetzung von Ressourceneffizienz auf den Baustellen können KMU des Bauhauptgewerbes in unternehmenseigenen Gebäuden ressourcenschonend agieren. Hier kann es sich z. B. um Verwaltungs- oder auch Produktionsstandorte zur Herstellung von Fertigteilen handeln. In diesem Zusammenhang bieten sich zahlreiche Maßnahmen an, deren Sinnhaftigkeit im Einzelfall abzuwägen ist. Einige Beispiele, für die es teilweise sogar Förderungsmöglichkeiten gibt, sind:

- Sanierung der Gebäudehülle inkl. Einsatz von Fenstern mit Dreifachverglasung,
- Einsatz ressourcenschonender Heizungstechnik (z. B. Wärmepumpen),
- Gewinnung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen (z. B. mittels Photovoltaik),
- Umstellung der Leuchtmittel auf LED-Beleuchtung,
- Schaffung von Infrastruktur für E-Mobilität,
- passive Kühlung (z. B. Beschattung, Begrünung, adiabate Abluftkühlung),
- Sammlung und Nutzung von Regenwasser sowie
- Förderung von Biodiversität (z. B. durch Flächenentsiegelung, Begrünung, Vogelhäuser, Insektenhäuser etc.).¹¹²

¹¹¹ Vgl. Wall, J. und Schweig, U. (2021), S. 399.

¹¹² Weitere Informationen und Maßnahmen können in der interaktiven Webvisualisierung „Ressourcenschonendes Gebäude“ des VDI Zentrum Ressourceneffizienz erkundet werden: <https://www.ressource-deutschland.de/werkzeuge/loesungsentwicklung/prozessketten/ressourcenschonendes-gebaeude/>

4 DIGITALISIERUNG IN DER BAUAUSFÜHRUNG

Die Anwendung von Building Information Modeling (BIM) als digitale Methode spielt bei der Digitalisierung der Bauausführung eine zentrale Rolle. Damit einher geht die Nutzung mobiler Endgeräte und diverser Applikationen auf der Baustelle. Sensor-Technik ermöglicht zudem die Sammlung semantischer Informationen, die zur Erfassung und Optimierung des Ressourcenverbrauchs genutzt werden können. Darüber hinaus ergeben sich Potenziale durch Scanning-Technologien, digitale Fertigung und Augmented Reality (AR).

4.1 Building Information Modeling

„Building Information Modeling bezeichnet eine kooperative Arbeitsmethodik, mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden.“¹¹³

Die Anwendung von BIM ermöglicht neben weiteren Vorteilen die Optimierung von Arbeitsabläufen und effektive Kommunikation zwischen allen Projektbeteiligten¹¹⁴. Bereits im Rahmen der Ausführungsplanung können alle Fachmodelle auf einer digitalen Kollaborationsplattform (CDE) zu einem gemeinsamen Koordinierungsmodell zusammengeführt werden, das stets den aktuellen Planungsstand widerspiegelt. Das trägt zur Verbesserung der Koordination zwischen den Gewerken bei. Mithilfe einer automatisierten Kollisionskontrolle können Missverständnisse zwischen Projektbeteiligten resp. Planungsfehler frühzeitig erkannt und somit in weiterer Konsequenz Ausführungsfehler vermieden werden.

¹¹³ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015), S. 4.

¹¹⁴ Vgl. Goger, G. et al. (2018), S. 135 – 138.

Die persistente Anwendung von BIM im Rahmen der Ausführungsphase kann zudem dazu beitragen, die Bauzeit um bis zu 25 % zu reduzieren¹¹⁵. Aus beiden Aspekten können positive Auswirkungen auf die Ressourceneffizienz hervorgehen. Zum einen entfallen zusätzliche und unnötige Materialaufwendungen und Geräteeinsätze zur Behebung von Ausführungsfehlern. Zum anderen haben Baustelleneinrichtungen aufgrund beschleunigter Bauprozesse kürzere Betriebszeiten.

4.1.1 BIM-basierter Gebäuderessourcenpass

Aus einem realitätsgetreuen BIM-Modell lassen sich in einem nächsten Schritt die eingespeisten Daten zu den verwendeten Bauprodukten und Baustoffen in einen digitalen Gebäuderessourcenpass überführen. Somit können die Bauwerks- und Materialdaten langfristig gesichert und über den Lebenszyklus hinweg analysiert werden, um z. B. die Kreislauffähigkeit des Gebäudes zu beurteilen und den Materialrestwert jederzeit ermitteln zu können¹¹⁶. Liegen diese Daten bei Um- bzw. Rückbaumaßnahmen transparent vor, können Ressourceneffizienzpotenziale durch die Wiederverwendung von Bauprodukten oder ein hochwertiges Recycling rückgebauter Materialien gezielt gehoben werden¹¹⁷.

4.1.2 Digitales Baulogistikmodell

Trotz der vielfältigen Potenziale, die von BIM ausgehen, findet es derzeit noch kaum Anwendung im Rahmen der Logistikplanung. Dabei ermöglicht die Erstellung eines digitalen Baulogistikmodells die Simulation und Visualisierung der Transport- und Bauprozesse vor der tatsächlichen Bauphase und Inbetriebnahme der Baustelle. Schließlich können anhand einer Modellierung vorab Optimierungspotenziale ermittelt und eventuelle Planungsfehler identifiziert sowie sukzessive korrigiert werden. So eignet sich

¹¹⁵ Vgl. Hiebl, E. (2018), S. 11.

¹¹⁶ Vgl. Madaster (2022).

¹¹⁷ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2023), S. 31.

eine modellbasierte Mengenermittlung im Besonderen bei der Planung von taktgerechten Liefermengen und Lagerflächen¹¹⁸.

Weitere Möglichkeiten liegen in der Integration von Umweltdaten in das digitale BIM-Modell. Auf diese Weise ließe sich der Bauablauf z. B. unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs simulieren und bei Bedarf optimieren¹¹⁹. Grundlage für eine BIM-basierte Baulogistikplanung sind u. a. ein digitales Gebäudemodell und ein dazu passender Terminplan¹²⁰.

4.2 Mobile Endgeräte

Mobile Endgeräte eignen sich aufgrund ihrer in der Regel einfachen Handhabbarkeit für den Einsatz auf der Baustelle. Darüber hinaus können sie gezielt zu einer Zeitersparnis und Fehlerreduzierung beitragen.¹²¹ Über Applikationen auf Smartphones und Tablets sind z. B. überschüssige Baumaterialien erfassbar und ggf. auf einschlägigen Plattformen zu vermarkten.

Darüber hinaus eignen sich mobile Endgeräte zur Qualitätssicherung. Eine sachgerechte Verarbeitung oder eine Mängelbeseitigung kann mit geringem Aufwand in kurzer Zeit fotografisch dokumentiert werden. Die Getrennthaltung von Baustellenabfällen kann nachgewiesen und Zählerstände zum Wasser- sowie Stromverbrauch können aufgenommen werden¹²².

Lagerkapazitäten können z. B. über Auto-ID-unterstützte Handlesegeräte, die zum Scannen von Identifikationsnummern oder ganzen Objekten dienen, verwaltet werden.¹²³ Dabei ist es auch möglich, mithilfe mobiler Endgeräte unter Verwendung von Bilderkennungssoftware bzw. maschinellem Sehen (engl. Computer Vision) Soll-Ist-Abgleiche durchzuführen, z. B.

¹¹⁸ Vgl. Przybilla, M. et al. (2022), S. 101.

¹¹⁹ Vgl. Bleichert, O. (2015).

¹²⁰ Vgl. Placzek, G. et al. (2022), S. 913 – 914.

¹²¹ Vgl. Kölzer, T. (2021), S. 40.

¹²² Vgl. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2023).

¹²³ Vgl. Kölzer, T. (2021), S. 39.

bei der Bestimmung von Stückzahlen oder der fotogrammetrischen Abnahme von Bewehrung¹²⁴.

4.3 Sensor-Technik

Im Zusammenhang mit der Optimierung der Baulogistik bietet die Anwendung von Tracking-Technologien die Möglichkeit, die reale mit der digitalen Welt zu verbinden. Dazu braucht es ein drahtloses Sensornetzwerk, das automatisiert Standortdaten erhebt und zur Verarbeitung bereitstellt. Die Sensoren bzw. Marker (engl. Tags) können z. B. von KMU selbst oder Dienstleistungsunternehmen an Materialien und Geräten angebracht werden. Eine Kombination aus Bluetooth-Tags, WLAN-Netzwerken und – je nach Anwendungsfall – auch GPS bietet sich in diesem Zusammenhang als adäquates Lösungskonzept an.¹²⁵

Die Abfolge der Datenerfassung ist dabei wie folgt: Die Bluetooth-Tags mit kurzer Reichweite kommunizieren mit internetfähigen Gateways, z. B. Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), die wiederum Daten an eine Online-Plattform senden. Damit wird ein Internet-of-Things-(IoT-)Netzwerk geschaffen, das eine zentrale Steuerung der logistischen Prozesse ermöglicht und darüber hinaus weitere Nachhaltigkeitsopportunitäten bietet¹²⁶ (vgl. Abbildung 10). Ob die Gateways an immobilen Objekten und die Tags an mobilen Objekten befestigt werden oder umgekehrt, ist dabei projektspezifisch abzuwägen. Außerdem sind je nach Anwendungsfall die Anzahl und Positionierung der Tags und Gateways individuell zu bestimmen.¹²⁷ Längere Suchzeiten und unnötige Transportwege können durch die digitale Einsehbarkeit des aktuellen Standorts von Material und Geräten auf der Baustelle vermieden werden.¹²⁸

¹²⁴ Vgl. Kölzer, T. (2021), S. 55.

¹²⁵ Vgl. Maxwell, D. und Couper, R. (2022), S. 337.

¹²⁶ Vgl. Maxwell, D. und Couper, R. (2022), S. 325.

¹²⁷ Vgl. Kleiner, J. (2023), S. 119.

¹²⁸ Vgl. Teizer, J. et al. (2020), S. 11.

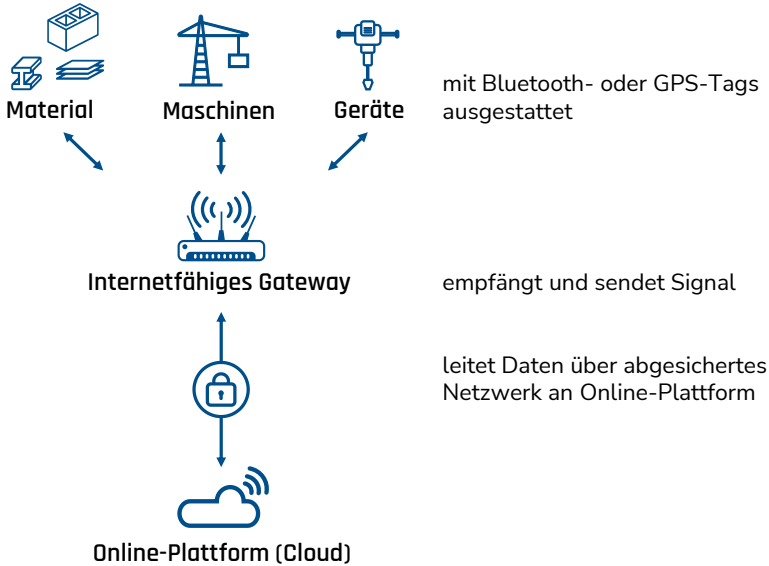


Abbildung 10: Zusammenspiel der Datenerfassung mithilfe von Bluetooth- oder GPS-Tags¹²⁹

Radio-Frequency-Identification-(RFID-)Technik bietet darüber hinaus noch weitere Potenziale: So kann mittels RFID z. B. der Zugang zum Stromnetz geregelt werden. Auf diese Weise ist es möglich, genau zu erfassen und nachzuvollziehen, welche Strommenge eine Person bzw. ein Unternehmen zu einem bestimmten Zeitpunkt bezogen hat.¹³⁰

Sensor-Technik kann somit zur lückenlosen Erfassung unternehmensspezifischer Ressourcenverbräuche eingesetzt werden und in weiterer Konsequenz eine verursachergerechte Abrechnung unterstützen. Das Einsparen von Ressourcen hätte auf diese Weise auch für Subunternehmen einen monetären Anreiz und könnte insgesamt zu einem geringeren Ressourcenverbrauch auf Baustellen beitragen.

¹²⁹ Eigene Darstellung auf Basis von Teizer, J. et al. (2020), S. 11.

¹³⁰ Vgl. Euroident GmbH (2023).

4.4 Scanning-Technologien

Die Verwendung von Laserscanning dient dem Erfassen dreidimensionaler Geometriedaten. Neueste Technologien tasten z. B. die Umgebung mit einem rotierenden Laser rasterförmig ab. Das Ergebnis ist eine Punktwolke, auf deren Basis anschließend ein 3D-Modell erstellt werden kann¹³¹. Bestehende bzw. in Errichtung befindliche Bauwerke lassen sich somit bei Bedarf effizient digitalisieren und z. B. im Rahmen eines Soll-Ist-Abgleichs analysieren. Für die Aufnahme größerer Flächen und schwer zugänglicher Bereiche und Areale können auch Drohnen eingesetzt werden. Hierbei ist ebenso eine Kombination mit Lidar-Scannern möglich, um Punktwolken, Bilder und thermische Aufnahmen zu generieren¹³². Auf Basis des digitalen Modells können Abmessungen auf die Baustelle übertragen werden und anzeigen, an welchen Positionen z. B. Löcher gebohrt werden sollen. Ressourceneffizienzpotenziale liegen hier insbesondere in der Zeitersparnis bei der Ausführung, einer möglichen Fehlerreduzierung und der Option, bestehende Bauwerke digital, z. B. im Rahmen von BIM, zu analysieren.¹³³

4.5 Digitale Fertigung

Die digitale Fertigung ist bereits in verschiedenen Bereichen der Industrie zum Standard avanciert und konnte entscheidend zur Steigerung der Produktivität beitragen. Von Seiten der Baubranche wird digitaler Fertigung nach wie vor mit Zurückhaltung und Skepsis begegnet, obwohl sich additive Fertigungsverfahren insbesondere zur Herstellung von form- und materialoptimierten Bauteilen eignen würden.¹³⁴ Eines der größten Hemmnisse ist der zusätzliche Planungsaufwand, der mit dem Einbezug digitaler Fertigungsverfahren einhergeht. So müssen 3D-Modelle eine hohe Detailtiefe aufweisen; ebenso sind Prozessinformationen aus der Fertigung in

¹³¹ Vgl. Kötzer, T. (2021), S. 50 – 51.

¹³² Vgl. Kötzer, T. (2021), S. 52.

¹³³ Vgl. Kötzer, T. (2021), S. 53.

¹³⁴ Vgl. Universität Innsbruck (2022), S. 238.

die Planung zu integrieren¹³⁵. Die Anwendung von BIM und Prinzipien der integrierten Projektabwicklung, im Zuge derer das fertigende Unternehmen frühzeitig Einfluss auf die Planung nehmen kann, können bei der Umsetzung jedoch unterstützen bzw. diese erleichtern¹³⁶. Die Methode des „Fabrication Information Modeling“ (FIM) ermöglicht dabei die Ergänzung von fertigungsrelevanten Daten in einem BIM-Modell.¹³⁷

4.6 Augmented Reality



Abbildung 11: Augmented Reality zeigt versteckte baurelevante Elemente auf einer Baustelle © DFKI

Auch Augmented Reality (AR) kann die Arbeit auf Baustellen effizienter machen (vgl. Abbildung 11). Bei AR handelt es sich um eine virtuelle Erweiterung der realen Umgebung. Auf diese Weise kann mithilfe mobiler Endgeräte die Baustelle in Echtzeit um das digitale Gebäudemodell ergänzt werden, wodurch eine schnellere und reibungslose Koordination der

¹³⁵ Vgl. Slepicka, M. et al. (2022), S. 87.

¹³⁶ Vgl. Ng, M. S. et al. (2021), S. 39.

¹³⁷ Vgl. Slepicka, M. et al. (2022), S. 87.

Gewerke erreichbar ist. AR ermöglicht es, nicht sichtbare Bestandselemente (z. B. Wasser- oder Stromleitungen) sichtbar zu machen und so Schäden beim Bauen im Bestand zu verhindern. Voraussetzung dafür ist, dass die Bestandsdaten als 3D-Modelle vorliegen. Darüber hinaus steigert die Visualisierung des digitalen Modells im dreidimensionalen Raum das Verständnis über die Baumaßnahme bei allen Beteiligten. Kollisionen können frühzeitig erkannt und potenzielle Ausführungsfehler vermieden werden.¹³⁸

¹³⁸ Vgl. Goger, G. et al. (2018), S. 125 – 126.

5 ABWICKLUNG VON BAUPROJEKTEN

Steigende Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Gebäuden erfordern zunehmend interdisziplinäres Handeln. Insbesondere für lebenszyklusoptimiertes Planen und Bauen sind systematische Vorgehensweisen und strukturierte Prozesse notwendig. Die Methoden und Prinzipien des Lean Construction leisten hierfür einen wesentlichen Beitrag¹³⁹ und finden ebenfalls im Rahmen der integrierten Projektabwicklung (IPA) Anwendung¹⁴⁰.

5.1 Integrierte Projektabwicklung

IPA begünstigt die kollaborative Zusammenarbeit über Unternehmensgrenzen hinweg. Wesentliche Projektbeteiligte bilden zu Beginn des Bauprojektes ein Team, wodurch von Anfang an die Expertise verschiedener Interessengruppen zur Verfügung steht. So wird eine starre Segmentierung in einzelne Aufgabenbereiche vermieden und eine lebenszyklusoptimierte Gebäudeplanung sowie Errichtung ermöglicht.¹⁴¹ Wird zudem eine frühzeitige Integration von Nutzenden und Betreibenden in den Abwicklungsprozess in Erwägung gezogen und umgesetzt, kann kurzfristigen Änderungswünschen vorgebeugt werden, um damit Ressourcen einzusparen.

Die frühzeitige Zusammenarbeit bringt u. U. jedoch Abweichungen vom konventionellen Projektablauf mit sich. So erfolgt z. B. eine Vergütung nicht mehr nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI), sondern nach festgelegten Regeln in einem Mehrparteienvertrag¹⁴² (vgl. Kapitel 5.1.2). Die Definition gemeinsamer Werte, Ziele und Prozesse sowie Teambuilding und Schulungsaktivitäten zu Beginn eines Projekts erfordern ein zusätzliches Investment. Das kann sich jedoch über

¹³⁹ Vgl. Hofstadler, C. (2019), S. 488.

¹⁴⁰ Vgl. Haghsheno, S. und Wachter, N. (2019), S. 28.

¹⁴¹ Vgl. Haghsheno, S. et al. (2022), S. 74.

¹⁴² Vgl. Haghsheno, S. et al. (2022), S. 73.

die Projektlaufzeit hinweg und insbesondere im Rahmen komplexer Bauprojekte rechnen. Mit zunehmender Erfahrung der Beteiligten eignet sich IPA auch für kleinere Projekte.¹⁴³ Im Folgenden wird daher auf die wesentlichen Elemente von IPA¹⁴⁴ eingegangen, die maßgeblich zum Erfolg beitragen.

5.1.1 Werte und Kultur

Für ein erfolgreiches IPA-Projekt sind gemeinsame Werte sowie Verhaltensgrundsätze und -prinzipien von entscheidender Bedeutung. Respekt, Vertrauen, Transparenz, eine proaktive offene Kommunikation und die Bereitschaft zur kontinuierlichen Verbesserung sind essenziell. Die Werte müssen im Team zu Projektbeginn gemeinsam definiert werden¹⁴⁵.

Während des Projekts gilt es, regelmäßig zu reflektieren, ob sich die definierten Werte tatsächlich im Team widerspiegeln. Führungskräfte haben die Aufgabe, die vereinbarten Grundsätze vorzuleben und von den Mitarbeitenden entsprechendes Verhalten einzufordern. Alle Projektbeteiligten sind angehalten, stets so zu handeln, dass es den gemeinsam definierten Projektzielen dient (Best for Project). Zur Förderung einer kollaborativen Kultur eignet sich eine Projektcharta, um die vereinbarten Werte und Verhaltensprinzipien zu dokumentieren. Teambuilding und Onboarding-Events können ebenfalls den Wandel hin zu einer kollaborativen Kultur unterstützen. Einer der erfolgversprechendsten Wege ist das Zusammenfinden des Projektteams an einem Standort (Co-Location) mit einem gemeinsamen Besprechungsraum (Big Room). Die physische Nähe fördert die Zusammenarbeit, da sich die Beteiligten persönlich kennenlernen und die Möglichkeit bekommen, über kurze Kommunikationswege unbürokratisch und effektiv Informationen auszutauschen.¹⁴⁶

¹⁴³ Vgl. Allison, M. et al. (2020), S. 14.

¹⁴⁴ Vgl. Haghsheno, S. et al. (2022).

¹⁴⁵ Vgl. Haghsheno, S. et al. (2022), S. 72 – 74.

¹⁴⁶ Vgl. Haghsheno, S. et al. (2022), S. 72 – 74.

5.1.2 Mehrparteienvertrag

Ein Mehrparteienvertrag bildet gemeinsam mit der Etablierung einer kollaborativen Teamkultur die Basis der integrierten Projektabwicklung. In einem Mehrparteienvertrag sind die gemeinsam definierten Projektziele und Regeln der Zusammenarbeit festgeschrieben. Einen großen Stellenwert nehmen Vereinbarungen hinsichtlich Haftung und Versicherung ein. Im Gegensatz zu klassischen Vertragsmodellen, bei denen teilweise Anreize entstehen, den eigenen Gewinn auf Kosten der Ziele des Gesamtprojekts zu maximieren, fördert ein Mehrparteienvertrag kollaboratives Handeln und Innovation¹⁴⁷. Hierzu wurden dezidierte „Mustervertragsbedingungen für Mehrparteienverträge im öffentlichen Bauwesen bei Integrierter Projektabwicklung“¹⁴⁸ vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR) erarbeitet. Folgende Merkmale finden sich häufig in dieser Art Verträge¹⁴⁹:

- **Early Contractor Involvement:** Die Schlüsselkompetenzen werden frühzeitig in das Projekt eingebunden. Ein Bauunternehmen ist z. B. zunächst so lange beratend tätig, bis die Ausführung beginnen kann. Dieses Vorgehen dient insbesondere der Abstimmung von Planung und Arbeitsvorbereitung für den darauffolgenden Baubetrieb.
- **Entscheidungsfindung:** Um gemeinsame Entscheidungen treffen zu können, werden Organisations- und Entscheidungsgremien gebildet. Auftraggebende verlieren dadurch jedoch nicht ihre Entscheidungshoheit. Sie haben regelmäßig ein „(Letzt-)Entscheidungs- und Leistungsänderungsrecht“¹⁵⁰. Im Vertrag ist außerdem „eine klare Aufgaben- und Leistungszuordnung“¹⁵¹ vorhanden.
- **Anreizbasiertes Vergütungsmodell:** Die Auftragnehmer erhalten i. d. R. eine Erstattung der tatsächlich entstandenen Kosten. Dafür ist

¹⁴⁷ Vgl. Haghsheno, S. et al. (2022), S. 73.

¹⁴⁸ Boldt, A. und Rodde, N. (2022).

¹⁴⁹ Vgl. Hillig, J.-B. und Beuthan, T. (2020).

¹⁵⁰ Hillig, J.-B. und Beuthan, T. (2020), S. 2.

¹⁵¹ Hillig, J.-B. und Beuthan, T. (2020), S. 2.

eine uneingeschränkte finanzielle Transparenz durch ein sog. „Open-Book“-Verfahren erforderlich. Darüber hinaus wird ein zusätzlicher Betrag (Overhead) definiert, der auch allgemeine Geschäftskosten enthält. Ein Bonus-Malus-System regelt, wie die Projektbeteiligten am Erfolg oder Misserfolg beteiligt werden.

- **Risikotöpfe/Zurückstellungen:** Beim Aufsetzen des Vertrags definieren die Beteiligten gemeinsam, welche potenziellen Risiken eintreten könnten. Für den möglicherweise notwendigen Kostenausgleich werden nach definierten Regeln Geldbeträge zurückgestellt.
- **Haftungsbeschränkung:** Die Ausgestaltung der Haftungsfragen ist flexibel. Für Beschlüsse der IPA-Entscheidungsgremien wird meist ein Haftungsausschluss vereinbart.
- **Konfliktlösungsverfahren:** Der Umgang mit Konflikten innerhalb des IPA-Teams ist festgelegt. Falls sich die Konfliktbeteiligten in einem solchen Fall nicht einigen können, sind häufig eine Schlichtung, außergerichtliche Streitbeilegung (Adjudikation) und/oder ein Schiedsverfahren vorgesehen.

5.1.3 Organisation

Die Organisation von IPA sieht die frühzeitige Einbindung der Wertschöpfungsparteien in das Projekt vor. Dadurch zeigt sich ein entscheidender Vorteil gegenüber konventionellen Projektabwicklungsformen: Die gesamte Fachexpertise steht dem Team von Projektbeginn an zur Verfügung. Durch die Zusammenkunft der verschiedenen Sichtweisen und Fachkompetenzen ergeben sich eine gesteigerte Planungsqualität und -effizienz. Bauausführende können so bei Herausforderungen bzw. komplexen Bauaufgaben frühzeitig in die Planung eingebunden werden¹⁵².

Im Rahmen der IPA-Teambildung findet zudem ein Kompetenzwettbewerb statt. Dabei erfolgt neben der ökonomischen Bewertung vor allem auch die Bewertung zusätzlicher Kriterien wie der fachlichen Kompetenz

¹⁵² Vgl. Haghsheno, S. et al. (2022), S. 74.

und Bereitschaft sowie Fähigkeit zur Kollaboration. Im Team wird eine integrierte Governance- und Arbeitsstruktur umgesetzt. Das bedeutet, die Projektverantwortung und -leitung werden von allen Beteiligten gleichberechtigt getragen und Entscheidungen stets im Konsens nach dem Einstimmigkeitsprinzip getroffen. Sollte Letzteres nicht möglich sein, kann eine Entscheidung durch eine höhere Instanz einstimmig gefällt werden. Sofern auch die höhere Instanz zu keiner Einigung gelangt, kann ein vordefiniertes außergerichtliches Konfliktlösungsverfahren Anwendung finden¹⁵³.

5.1.4 Methoden und Werkzeuge

Die im Zusammenhang mit IPA genutzten Methoden werden häufig im Kontext von Lean Construction umgesetzt. Beispiele hierfür sind das Last Planner System, das Target Value Design oder die 5-W-Methode. Auch BIM (vgl. Kapitel 4.1) wird gemeinsam mit Lean Construction als Katalysator und wesentliches Werkzeug von IPA gesehen.¹⁵⁴

Kompetenzzentrum für Integrierte Projektabwicklung (IPA)

Das IPA Zentrum ist eine Plattform, die Unternehmen aus der Bauwirtschaft bei der Durchführung von IPA-Projekten unterstützt. Das Kompetenzzentrum für Integrierte Projektabwicklung (IPA) wurde 2020 am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) gegründet und dient dem Wissens- und Erfahrungsaustausch zur Förderung der Anwendung von Modellen der Integrierten Projektabwicklung in der Bauwirtschaft.

Ein hilfreiches Dokument für Baubeteiligte, das vom IPA Zentrum bereitgestellt wird, ist der **IPA Handlungsleitfaden**.

¹⁵³ Vgl. Haghsheno, S. et al. (2022), S. 74.

¹⁵⁴ Vgl. Haghsheno, S. et al. (2022), S. 74 – 75.

5.2 Lean Construction

Lean Construction ist ein Konzept zur Prozessoptimierung und Effizienzsteigerung am Bau und bezeichnet im Grunde die Adaption von Lean Management¹⁵⁵ und dessen Prinzipien im Bauwesen. Die Integration von Lean-Prinzipien in die Bauplanung und -ausführung kann Verschwendung vorbeugen und dadurch zur Steigerung der Ressourceneffizienz beitragen. Die aus dem Lean Management entlehnten Werkzeuge und Methoden werden oft im Zusammenhang mit IPA gebraucht. Sie können aber in der Regel auch bei traditionellen Abwicklungsmodellen sehr einfach in den Projektablauf implementiert werden und sind ebenfalls im Rahmen von BIM anwendbar.

5.2.1 Last Planner System

Das Last Planner System (LPS) ist eine wichtige Methode im Lean Construction und findet häufig Verwendung, da es die Bau- und Immobilienwirtschaft bei der Planung und Steuerung der Produktion, d. h. von der ersten Planung bis zur Inbetriebnahme, unterstützt. LPS integriert dabei die Lean-Prinzipien in ein zentrales System. Der Mehrwert für Gewerke sowie Kundinnen und Kunden wird identifiziert und Prozesse werden optimiert. Die Produktion wird durch die Zusammenarbeit der Projektbeteiligten in einem integrierten Team geplant und folgt dem sog. Pull-Prinzip, d. h., der Material- bzw. Informationsfluss findet nach Bedarf und nicht nach fest definierten Zeitpunkten oder Mengen statt.

Das Hauptaugenmerk liegt jedoch auf dem gesamten Projekt, um fließende Arbeitsabläufe (das sog. Fluss-Prinzip) umzusetzen. Das Ergebnis ist eine vollständige Produktionsplanung, die bereits eine komplette Termin- und Ressourcenplanung enthält.

Die Visualisierung von Prozessen stellt ein weiteres wichtiges Element des LPS dar, um diese verständlich und transparent zu kommunizieren.

¹⁵⁵ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2021).

Zusätzlich wird eine sukzessive Verbesserung der Prozesse verfolgt (sog. kontinuierlicher Verbesserungsprozess).¹⁵⁶

5.2.2 Taktsteuerungstafel

Im Rahmen der Taktplanung dient eine Taktsteuerungstafel auf der Baustelle als zentrale Informationsquelle. Diese Tafel sollte idealerweise von allen Projektbeteiligten jederzeit einsehbar sein. Ihre Inhalte unterscheiden sich je nach Unternehmen und Projekt. Übliche Bestandteile sind u. a.¹⁵⁷:

- Terminplan und Zwei-Wochen-Vorschauplanung,
- Baustellenplan und Visualisierung der Taktbereiche,
- allgemeine Informationen zu Ansprechpersonen und Baustellenregeln sowie
- Bewertung (Ampelsystem) und Leistungskennzahlen.

Die Arbeitsleistungen werden mithilfe eines Ampelsystems bewertet. Rot bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Arbeitsschritt sehr taktkritisch ist, also Maßnahmen ergriffen werden müssen, um den Bauablauf nicht zu gefährden und Verschwendung zu vermeiden. Gelb deutet in diesem Zusammenhang darauf hin, dass lediglich kleinere Planabweichungen vorliegen, die verstärkte Aufmerksamkeit benötigen, der Bauablauf an sich aber noch nicht zwingend gefährdet ist¹⁵⁸.

5.2.3 5-W-Fragetechnik

Mit der 5-W-Fragetechnik wird gezielt nach der tatsächlichen Ursache eines Problems gefragt. Ausgehend von der aktuellen Situation wird so lange das „Warum“ ermittelt, bis die Ursache gefunden ist¹⁵⁹. Hierbei handelt es sich um ein sehr einfaches Werkzeug, das aufgrund seiner

¹⁵⁶ Vgl. Haghsheno, S. und Wachter, N. (2019), S. 38.

¹⁵⁷ Vgl. Leifgen, C. (2020), S. 37 – 38.

¹⁵⁸ Vgl. Leifgen, C. (2020), S. 37 – 38.

¹⁵⁹ Vgl. Haghsheno, S. und Wachter, N. (2019), S. 99.

Simplizität jedoch jederzeit anwendbar ist und zur Verbesserung von Prozessen beitragen kann. Zudem ist auf diese Weise die Stärkung einer positiven Fehlerkultur möglich, weil z. B. nicht nach der fehlerverursachenden Person gefragt wird, sondern nach der Ursache für den Fehler.

5.2.4 Tägliche Kurzbesprechungen

Der tägliche kurze Austausch von ca. 15 Minuten zwischen ausgewählten Projektbeteiligten, z. B. im Rahmen des Shopfloor-Managements, führt zu einer erhöhten Transparenz des Projektverlaufs. Dabei sollte festgehalten werden, welche Arbeiten am Tag der Besprechung und am darauffolgenden Tag durchgeführt werden. Damit können mögliche Hindernisse frühzeitig identifiziert und Fehler oder Verzögerungen vermieden werden.

5.2.5 Choosing by Advantages

Choosing by Advantages, also die Auswahl nach Vorteilen, ist eine weitere strategische Methode, um Entscheidungen zu treffen. Hierbei erfolgt ein Vergleich der möglichen Alternativen ausschließlich anhand der jeweiligen Vorteile. Nachdem diese identifiziert sind, wird eine Gewichtung vorgenommen und abschließend die Option mit dem insgesamt größten Vorteil gewählt¹⁶⁰.

5.2.6 Ishikawa-Diagramm

Das Ishikawa-Diagramm ist eine Möglichkeit, um den Zusammenhang von Ursache und Wirkung zu visualisieren. Es wird insbesondere genutzt, um die Ursache eines Problems zu finden, und bedient sich dabei der Optik eines Fischgräten-Diagramms. Zunächst werden am Kopf das Problem und seine Wirkung notiert. Die einzelnen Gräten stellen anwendungsspezifische Kategorien dar, denen wiederum potenzielle Ursachen zugeordnet werden (vgl. Abbildung 12).

¹⁶⁰ Vgl. Suhr, J. (1999), S. 24.

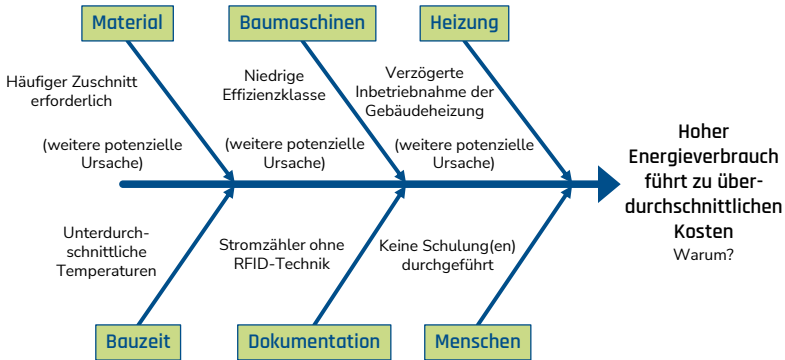


Abbildung 12: Exemplarisches Ishikawa-Diagramm zur Problemanalyse bei hohem Energieverbrauch auf einer Baustelle¹⁶¹

Das Diagramm dient als visuelle Hilfestellung für einen Brainstorming-Prozess, der durch weitere Techniken des Lean Managements (z. B. 5-W-Fragetechnik) ergänzt wird. Bei komplexen Problemstellungen kann es aufgrund der verzweigten Struktur des Ishikawa-Diagramms sinnvoll sein, andere Methoden zur Visualisierung zu nutzen¹⁶².

5.2.7 Definition von Leistungskennzahlen

Die Bewertung von Ressourceneinsparpotenzialen während eines Bauvorhabens setzt die Messung des Ressourcenaufwands voraus. Hierfür eignen sich die Definition und Erhebung von Leistungskennzahlen. Es ist ziel führend, einen angemessenen Aufwand zu wählen. Da Bauprojekte i. d. R. einzigartig sind und in großem Maße von der vorausgehenden Planung abhängen, sind ein Vergleich zwischen verschiedenen Projekten und die Bildung von Benchmarks mit einigen Herausforderungen verbunden. Geeignete Bezugsgrößen sind unternehmensintern abzustimmen. Für das gesamte Bauwerk kann z. B. die Bruttogeschossfläche eine passende Bezugsgröße sein. Für einzelne Bauleistungen eignet sich wiederum die Materialmenge, die Anzahl der Bohrpfähle oder das Volumen des

¹⁶¹ Eigene Darstellung.

¹⁶² Vgl. Haghsheno, S. und Wachter, N. (2019), S. 80.

Baugrubenaushubs. Mögliche Ressourcenaufwendungen, die bei der Bauausführung gemessen werden können, sind u. a.:

- Trinkwasserverbrauch in Litern,
- Stromverbrauch in Kilowattstunden,
- Menge an Bau- und Abbruchabfällen,
- eingesetzte Menge an Sekundärrohstoffen im Verhältnis zur Menge an Primärrohstoffen,
- Kraftstoffverbrauch in Litern sowie
- THG-Emissionen in Kilogramm CO₂-Äquivalenten.

6 FAZIT

Die größten Ressourcenverbräuche im Bauhauptgewerbe resultieren aus der Durchführung von Transporten mit fossilen Energieträgern, dem Einsatz von schweren Baumaschinen sowie den geringen Wiederverwendungs- und Recyclingraten. Angesichts notwendiger Klimaschutzmaßnahmen und geopolitischer Herausforderungen ist ein Umdenken in der Bauwirtschaft erforderlich. So zeigt die in der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie angestrebte Flächenkreislaufwirtschaft bis 2050, dass der Fokus zukünftiger Bautätigkeiten auf dem zirkulären Bauen bzw. Bauen im Bestand liegt. Bauunternehmen sollten daher ihre Kompetenzen in diesem Bereich ausbauen.

Gleichermaßen erlangen die Rohstoff- und Bauteilgewinnung aus der bereits vorhandenen gebauten Umwelt und die kreislaufgerechte Bauausführung zusehends Bedeutung. Zur Steigerung der Wiederverwendungs- und Recyclingraten ist eine branchenweite integrierte Kreislauflogistik erforderlich. Hierfür bedarf es jedoch einer transparenten und effektiven Infrastruktur. Eine in diesem Zusammenhang sinnvolle und zukunftsfähige Maßnahme stellt die Einrichtung von innerstädtischen Konsolidierungszentren dar, in denen Sammellieferungen zwischengelagert und Waren zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Menge an die jeweiligen Baustellen transportiert werden. Zudem kann ein weitläufiges Netzwerk von Annahmestellen für Baustellenreststoffe zur Reduzierung von Reststofftransporten beitragen und den Aufwand von Wiederverwendung oder Recycling maßgeblich verringern. Bei der Auswahl von Transportdienstleistungen sollten auch umweltfreundliche Fahrzeuge verstärkt berücksichtigt werden. Dahingehend bestehen aktuell noch Hemmnisse, unter anderem aufgrund von Kostendruck und mangelnder Datentransparenz.

Die Baustelle selbst kann durch Maßnahmen wie den Bezug von Strom aus 100 % erneuerbaren Energien – ohne Zertifikathandel im Hintergrund – ressourcenschonend gestaltet werden. Auf den Einsatz fossiler Energieträger sollte so gut wie möglich verzichtet werden. In diesem

Zusammenhang böte sich der Umstieg auf elektrische oder zumindest hybride Baumaschinen und -geräte an, die darüber hinaus durch einen günstigeren Betrieb und geringere Instandhaltungskosten wirtschaftliche Vorteile mit sich bringen. Unklar bleibt, ob mittelfristig strengere Vorgaben beim Einsatz mobiler Arbeitsmaschinen zur Reduktion von THG-Emissionen, Lärm und gesundheitsgefährdenden Abgasen zu erwarten sind.

Ein ressourceneffizienter bzw. nachhaltiger Baubetrieb sollte überdies durch die Einführung ökologischer Kriterien in der öffentlichen Ausschreibung verstärkt Berücksichtigung finden. Gleichermaßen könnte das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) in Bezug auf die Bauausführung erweitert werden. In diesem Zusammenhang kann die DGNB-Zertifizierung für nachhaltige Baustellen eine Orientierung darstellen.

Die Vorfertigung von Elementen und Modulen bietet eine weitere effiziente Methode, um negative lokale Umweltauswirkungen, Baustellenabfall und Transporte zu minimieren. Zudem ermöglicht die modulare Bauweise im Vergleich zu konventionellen Herangehensweisen einen beschleunigten Bauablauf, woraus eine kürzere Betriebsdauer der Baustelleneinrichtung resultiert, was weitere Ressourcen schont. Es ist zudem für jede Baustelle im Einzelfall zu erwägen, ob die Bauphase auf wärmere Monate verlegt werden kann, um z. B. vollständig auf eine Bauheizung zu verzichten.

Um THG-Emissionen zu reduzieren, nimmt die Nachfrage nach emissionsarmen Baustoffen und effizienten Fertigungsmethoden zu. KMU des Bauhauptgewerbes können sich durch den Ausbau von Kompetenzen in diesen Bereichen bereits jetzt zukunftsfähig aufstellen und durch den Aufbau zirkulärer Geschäftsmodelle Wettbewerbsvorteile für sich nutzen. Hierzu zählen z. B. der Aufbau bzw. die Nutzung von Plattformen zum Handel mit wiederverwendbaren Bauprodukten und Sekundärrohstoffen sowie die Erstellung von Gebäuderessourcenpässen, um zukünftig noch effizienter Abfälle zu vermeiden.

BIM als Methode sollte perspektivisch auch von KMU genutzt werden, um sich mit Planenden zu vernetzen und kollaborativ an einem digitalen Gebäudemodell zu arbeiten. Darüber hinaus können weitere digitale

Methoden und Werkzeuge eingesetzt werden, um ressourcenschonend zu agieren. Sensor-Technik ermöglicht in diesem Zusammenhang z. B. die Erfassung von geometrischen und semantischen Echtzeit-Daten auf Baustellen. Diese Entwicklung könnte es erlauben, Subunternehmen zukünftig anhand ihres individuellen Ressourcenverbrauchs verursachergerecht abzurechnen. Auf diese Weise resultiert aus individuellen Ressourceneinsparungen auf der Baustelle ein unmittelbarer monetärer Mehrwert, während gleichzeitig das gesamte Energiemanagement optimiert werden kann.

Die Abwicklung von Bauprojekten hat darüber hinaus Einfluss auf die erzielbare Ressourceneffizienz. Mittels integrierter Projektabwicklung wird interdisziplinäres Arbeiten nachhaltig gefördert, um in weiterer Konsequenz Gebäude ganzheitlich ressourcenschonend herzustellen und zu errichten. Die damit einhergehende Anwendung von Lean-Construction-Prinzipien kann zu stabilen und strukturierten Prozessen beitragen, woraus sich eine reduzierte Störanfälligkeit ergibt und Verschwendung minimiert werden kann.

Unabhängig von den jeweiligen Bauprojekten, an denen sie beteiligt sind, können KMU des Bauhauptgewerbes ebenfalls im eigenen Betrieb Ressourcen schonen. Auch hier gibt es – immer abhängig vom individuellen Fall – vielfältige Möglichkeiten für Unternehmen. In erster Linie sollte die Nutzung fossiler Energieträger minimiert werden. Dies ist z. B. durch den Umstieg auf eine Wärmepumpenheizung, eine Ertüchtigung der Gebäudehülle oder die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte umsetzbar.

Die Kurzanalyse zeigt zudem, dass die Schonung von Ressourcen im Bauhauptgewerbe unmittelbar mit der vorausgehenden Planung zusammenhängt und einen starken politischen Bezug hat. Die Rahmenbedingungen sollten daher so gestaltet werden, dass die Einsparung von Ressourcen auch wirtschaftliche Vorteile für die umsetzenden Unternehmen mit sich bringt.

TEIL 2: FACHGESPRÄCH

7 DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS

Ressourceneffizienz im Gebäudesektor fokussiert sich aktuell vorwiegend auf die Energieeffizienz in der Betriebsphase. Mit abnehmendem Ressourcenverbrauch während der Nutzungsphase durch effiziente Gebäudehüllen und den Einsatz effizienter Gebäudetechnik gewinnen jedoch die vor- und nachgelagerten Lebenszyklusphasen sukzessive an Bedeutung. Im Rahmen der Bundesförderung für energieeffiziente Gebäude (BEG) wurden deshalb Grenzwerte für THG-Emissionen im Lebenszyklus von Gebäuden festgelegt. Diese beziehen sich – in Anlehnung an die Lebenszyklusphasen gemäß DIN EN 15643:2021-12 – auf die Herstellungsphase (A1–3), den Austausch von Produkten (B4), den Energieverbrauch im Betrieb (B6) und die Abfallbehandlung (C3) sowie Entsorgung (C4). Unberücksichtigt bleibt neben weiteren Lebenszyklusphasen die Errichtungsphase. Hier lassen sich jedoch insbesondere die Ressourceneffizienzpotenziale des Bauhauptgewerbes lokalisieren, das sich mit dem Bau von Gebäuden, Straßen, Bahnverkehrsstrecken, Tiefbauten und weiteren Bau-tätigkeiten beschäftigt.

Im Fachgespräch vom 9. März 2023 lag der Fokus vornehmlich auf dem Baubetrieb im Rahmen der Errichtung von Hochbauten. Dem Bauprozess wird mit Blick auf die Lebenszyklusemissionen eines Gebäudes ein tendenziell unwesentlicher Anteil zugesprochen. Diese Annahme ist jedoch wissenschaftlich unzureichend belegt. So geben Expertinnen und Experten z. B. an, dass die Transporte zu den Baustellen zwischen 5 und 10 % der Lebenszyklusemissionen eines Gebäudes ausmachen können.¹⁶³ Die Gestaltung der Baustelleneinrichtung inklusive der Art der eingesetzten Baumaschinen sowie die anfallende Menge an Baustellenabfall bestimmen darüber hinaus die Höhe der Emissionen des Baubetriebs.¹⁶⁴

16 Teilnehmer*innen aus Unternehmen, Forschung, Politik und sonstigen Initiativen tauschten sich aus diesem Grund im Rahmen des Fachgesprächs

¹⁶³ Vgl. Weidner, S. et al. (2021), S. 975.

¹⁶⁴ Vgl. Obernosterer, R. et al. (2021), S. 10.

darüber aus, wo die Ressourceneffizienzpotenziale des Bauhauptgewerbes im Hochbau liegen, und diskutierten, mit welchen Maßnahmen Ressourcen geschont werden können. Im Zentrum des Gesprächs stand die Einsparung von THG-Emissionen durch die Optimierung der Logistik und den Einsatz alternativer Antriebstechnologien in Baumaschinen. Vor diesem Hintergrund wurde u. a. eine verursachungsgerechte Abrechnung in Abhängigkeit des Ressourcenverbrauchs der Subunternehmen erwogen.

7.1 Programm des Fachgesprächs

Moderation	Dr.-Ing. Christof Oberender, VDI Zentrum Ressourceneffizienz
Top 1	Ressourceneffizienz im Bauhauptgewerbe – Einführung Mario Wiest, VDI Zentrum Ressourceneffizienz
Top 2	Studie „CO₂-neutrale Baustelle“ Maximilian Weigert, Technische Universität Wien
Top 3	Diskussionsrunde Teil I
Top 4	Das DGNB-System für nachhaltige Baustellen Theda Witte, DGNB GmbH
Top 5	Nachhaltigkeit auf der Baustelle in der Praxis durch die Anwendung des DGNB-Systems Johannes Wall, Ed. Züblin AG
Top 6	Diskussionsrunde Teil II

7.2 Ressourceneffizienz im Bauhauptgewerbe - Einführung

Zu Beginn gab Mario Wiest, Technologieberater beim VDI Zentrum Ressourceneffizienz, eine Einführung in den Themenkomplex „Ressourceneffizienzpotenziale im Bauhauptgewerbe – Einführung“. Zum Bauhauptgewerbe zählen u. a. der Bau von Gebäuden, der Bau von Straßen und Bahnverkehrsstrecken, der Leitungstief- und Kläranlagenbau, der sonstige Tiefbau, Rückbauarbeiten, vorbereitende Baustellenarbeiten sowie sonstige spezialisierte Bautätigkeiten.¹⁶⁵ Das Bauhauptgewerbe in Deutschland ist sehr kleinteilig organisiert. Insgesamt waren im Jahr 2022 rund 928.500 Personen beschäftigt¹⁶⁶, 88 % der Betriebe haben zwischen einem und 19 Mitarbeitenden¹⁶⁷. Zudem erwirtschafteten im Jahr 2020 kleine und mittlere Unternehmen (KMU) etwa 84 % des Gesamtumsatzes im Bauhauptgewerbe.¹⁶⁸

Um die Diskussion einzugrenzen, wurde der Fokus in diesem Fachgespräch auf die Errichtung von Gebäuden gelegt. Der Anteil des Baustellenbetriebs am Gesamtressourcenverbrauch eines Gebäudes hängt dabei stark von den spezifischen Gegebenheiten ab. Bauunternehmen setzen im klassischen Projektablauf in der Regel vorab definierte Aufträge um, weshalb deren Einfluss auf die Ressourceneffizienz limitiert ist. Eine integrierte Projektabwicklung bietet jedoch Chancen für Bauunternehmen, ihre Expertise bereits frühzeitig einzubringen und somit Einfluss auf die Planung zu nehmen. Auf diese Weise können Bauunternehmen z. B. für den Einsatz von Sekundärrohstoffen, die Wiederverwendung von Bauprodukten oder rückbaufreundliche Konstruktionsdetails plädieren.

Das Bauen im Bestand bietet enorme Ressourceneinsparpotenziale und wird als Schlüssel für mehr bezahlbaren Wohnraum und Klimaschutz gesehen.¹⁶⁹ Schließlich ist es auf diese Weise ebenso möglich, die

¹⁶⁵ Vgl. Statistisches Bundesamt (2022a).

¹⁶⁶ Vgl. Statistisches Bundesamt (2022a), S. 14.

¹⁶⁷ Vgl. Statistisches Bundesamt (2022a), S. 9.

¹⁶⁸ Vgl. Statistisches Bundesamt (2022b).

¹⁶⁹ Vgl. Umweltbundesamt (2023).

Flächeninanspruchnahme in Deutschland langfristig zu reduzieren.¹⁷⁰ Damit Unternehmen des Bauhauptgewerbes im Bestand tätig werden können, braucht es Investitionen und Planungen. Um Hemmnisse abzubauen, ist unter anderem eine „MusterUMBauordnung“¹⁷¹ erforderlich, wie sie z. B. von den Architects for Future gefordert wird.

Durch Vermeidung und Recycling von Baustellenabfall lassen sich ebenfalls Ressourcen einsparen: So fielen im Jahr 2020 rund 13,8 Mio. t Baustellenabfall in Deutschland an, die Recyclingquote lag jedoch lediglich bei 1,6 % – obwohl die Materialarten an sich recyclingfähig sind.¹⁷² Eines der Hemmnisse sei, dass oftmals kleine Abfallmengen der unterschiedlichen Materialien anfallen und sich daher eine sortenreine Sammlung mit anschließendem Recycling als unwirtschaftlich erweist. Potenziale liegen in einer verbesserten Entsorgungslogistik und der Vorfertigung von Bauelementen und Modulen, um Baustellenabfälle – zumindest bei Neubauten – bestmöglich zu vermeiden.

Zudem existieren Optimierungspotenziale in der Logistik, insbesondere in der übergeordneten und projektübergreifenden Logistikplanung. Schließlich machen Transporte zu Baustellen bis zu 10 % der Lebenszyklusemissionen eines Gebäudes aus.¹⁷³ Mithilfe einer solchen Logistikplanung könnten Baustellen untereinander vernetzt werden, um Lieferwege sowie Personentransporte zu optimieren. Die Schaffung innerstädtischer Konsolidierungszentren kann zudem eine Just-in-Time-Lieferung sowie -Entsorgung unterstützen. Die Digitalisierung der Logistik ist hierbei wesentlich für die Optimierung, um z. B. mithilfe von Building Information Modeling Bauprozesse zu simulieren. Zudem ermöglicht das sog. Internet of Things (IoT) die Aufnahme von Echtzeit-Logistikdaten.

¹⁷⁰ Der tägliche Flächenverbrauch in Deutschland von aktuell 55 ha soll bis 2030 auf 30 ha reduziert werden. Bis 2050 ist das Ziel, einen Netto-Null-Flächenverbrauch zu erreichen. – Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023).

¹⁷¹ Architects for Future Deutschland e.V. (2021).

¹⁷² Vgl. Kreislaufwirtschaft Bau (2023).

¹⁷³ Vgl. Weidner, S. et al. (2021), S. 975.

Auch die Baustelleneinrichtung inklusive aller eingesetzten Baumaschinen und -geräte zählt in den Bereich der Logistik. Die dynamische Gestaltung der Baustelleneinrichtung erlaubt eine Anpassung an den Bauablauf und kann somit zur Reduktion von Ressourcenverbräuchen beitragen. Der Zukauf von Ökostrom ermöglicht die Vermeidung von CO₂-Emissionen beim Einsatz elektrischer Geräte. Ferner kann Strom auf der Baustelle produziert werden, indem z. B. Photovoltaikmodule oder -matten in die Baustelleninfrastruktur integriert werden.

Der Einsatz alternativer Antriebstechnologien (elektrisch oder hybrid) sowie die Verwendung alternativer Kraftstoffe wie HVO-Kraftstoffe stellen weitere Möglichkeiten dar, den Ressourcenverbrauch auf Baustellen sukzessive zu senken. Hierzu gab und gibt es einige nennenswerte Pilotprojekte. So wurde bereits 2019 in Oslo (Norwegen) die erste nahezu emissionsfreie Baustelle realisiert. In Deutschland wurden der Erwerb und die Inbetriebnahme eines 28-Tonnen-Elektrobaggers durch das Umweltinnovationsprogramm (UIP) des Bundesumweltministeriums gefördert. Von der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau) gibt es Arbeitsschutzprämien für elektrische Geräte und Maschinen. Außerdem kann aus Gründen des Arbeitsschutzes ein Zuschuss für den Erwerb elektrischer Verdichtungsgeräte beantragt werden.

Darüber hinaus können KMU des Bauhauptgewerbes Ressourceneffizienzpotenziale am eigenen Standort heben, sofern dieser vorhanden ist. Dies ist z. B. durch die Nutzung erneuerbarer Energiequellen möglich, aber auch mittels Installation effizienter technischer Gebäudeausrüstung oder der effizienten Gestaltung der Gebäudehülle. Weiterhin können Flächen entsiegelt und begrünt werden, um die Biodiversität zu fördern. Auch die Schaffung von E-Ladesäulen am Unternehmensstandort und die Umstellung des unternehmenseigenen Fuhrparks auf elektrischen Antrieb können zur Steigerung der Ressourceneffizienz beitragen.

7.3 Studie „Die CO₂ neutrale Baustelle“

Im Anschluss an den einführenden Vortrag stellte Maximilian Weigert, Universitätsassistent im Forschungsbereich Baubetrieb der Technischen Universität Wien, das Forschungsprojekt „Die CO₂ neutrale Baustelle“ vor, das 2019 von der TU Wien durchgeführt wurde. Im Rahmen der Studie wurden Bauunternehmen, Bauträgerschaften, Planungsbüros und andere Unternehmen befragt, inwiefern sich verschiedene Faktoren auf die Wahl eines Zuliefernden auswirkten. Eine umweltfreundliche Lieferung, z. B. mithilfe emissionsarmer Fahrzeuge und kurzer Transportstrecken, hatte hierbei fast keine Bedeutung. Relevante Faktoren seien Kosten, Qualität, vergangene Erfahrungen und Termineinhaltung. Als Hemmnisse der Umsetzung umweltfreundlicher Baustellen wurden Kosten, Termindruck, eine unzureichende Verfügbarkeit von Baugeräten mit alternativen Antriebsystemen, fehlende Möglichkeiten zur Verwendung von Strom aus erneuerbaren Quellen sowie mangelnde Motivation genannt.

Die Studie betrachtete – in Anlehnung an die ÖNORM EN 15978 – die Errichtungsphase (Module A4 – 5) und zum Teil auch die Entsorgungsphase (Module C1 – 2). Zur schrittweisen Reduktion von Emissionen wurden zunächst organisatorische Maßnahmen identifiziert. Darüber hinaus ließen sich die Emissionen durch technologische Entwicklungen, die Erzeugung von Energie aus erneuerbaren Quellen und den Zukauf von 100 % Ökostrom minimieren. Zudem wurde im Rahmen der Studie festgestellt, dass eine vollständig emissionsfreie Baustelle ausschließlich anhand von Kompensationsmaßnahmen realisierbar sei.

Daneben wurden die Lebenszykluskosten eines Baggers mit einer Leistung von 30 kW im Zuge des Forschungsprojektes untersucht. Hierfür erfolgte ein Vergleich zwischen zwei Modellen mit Diesel- und Elektroantrieb. Es zeigte sich u. a., dass Elektrobagger in der Anschaffung zwar kostenintensiver sind – unter anderem deshalb, weil über den Preis der Fahrzeuge aktuell auch die Forschungsarbeit mit abgegolten wird –, allerdings fallen die Kosten für den Betrieb und die Instandhaltung des

Elektrobaggers geringer aus als im Fall des konventionellen Baggers mit Dieselantrieb.

Weiterhin untersuchte die Studie die Bandbreite der Kosten (in Euro/t CO₂e) für zahlreiche Technologien, die perspektivisch zu einer umweltfreundlichen Baustelle beitragen könnten. Der Preis für die CO₂-Vermeidung durch den Einsatz hybrider und elektrischer Baumaschinen, die Nutzung von Photovoltaikmodulen und -folien als auch die Verwendung von Kleinwindkraftanlagen lag dabei deutlich über den zum Zeitpunkt der Studie angenommenen Strafzahlungen für CO₂-Emissionen von 50 bis 100 Euro/t CO₂e. Demnach erweist sich eine Strafzahlung für Bauunternehmen aktuell als wirtschaftlicher.

Eine Erkenntnis der Studie war, dass Baustellen nur bedingt vergleichbar sind. Zudem ist der Stromverbrauch stark saisonabhängig, da der Verbrauch insbesondere durch die jeweilige Baustellenheizung determiniert wird. Die Transporte zu und von der Baustelle dominieren die CO₂-Emissionen, weshalb eine Marktdurchdringung alternativer Antriebstechnologien bei Fahrzeugen und Baugeräten von besonderer Relevanz ist.

Die größten Potenziale zur Einsparung von Emissionen liegen somit in der Erhöhung der Effizienz, dem Zukauf von Ökostrom, dem Einsatz alternativer Antriebsformen und Treibstoffe sowie der Reduktion von Transportdistanzen.

Aktuell gibt es in Österreich zwei Arbeitskreise, die sich dem Thema der Ressourceneffizienz von Bauprozessen widmen. Das sind zum einen der Arbeitskreis der Österreichischen Bautechnik Vereinigung (ÖBV) „Nachhaltigkeit im Tiefbau“ und zum anderen der Arbeitskreis der ÖGNI „CO₂-freie Baustelle“. Darüber hinaus laufen aktuell die Forschungsprojekte „CO₂-Demobau“ (als Nachfolger der vorgestellten Studie), „LZ-Infra“, „H₂ live am Bau“, „NaKaBa“ und zahlreiche

Diplomarbeiten, die Benchmarks für den CO₂-Ausstoß verschiedener Bauprozesse erarbeiten.

Die Aufnahme ökologischer Kriterien in den Vergabeprozess öffentlicher Aufträge ist ebenfalls Bestandteil aktueller Tätigkeiten. So werden z. B. die Reduktion der Umweltbelastung durch die Verringerung von LKW-Transportkilometern, die technische Ausstattung der Geräte und Baumaschinen, die Verwendung von Recycling-Baustoffen und die Erstellung von Umweltkonzepten hinsichtlich des Recyclings von Abbruchmaterial und der Entsorgung von Bauabfällen sowie Abwasser in den jeweiligen Zuschlagskriterien berücksichtigt.

Eine weitere Umfrage, die 2022 durchgeführt wurde, zeigt, dass Maßnahmen zum Klimaschutz im Bauwesen zurzeit kaum Bestandteil von Verträgen sind. Die befragten Personen stimmten jedoch zu, dass Maßnahmen zum Klimaschutz gesetzlich vorgeschrieben und im Vergaberecht angesiedelt werden sollten.

7.4 Diskussion Teil I

In der sich an die Vorträge anschließenden Diskussionsrunde zeigten sich die Teilnehmenden inspiriert und gewillt, die Ressourceneffizienz im Baubetrieb zukünftig verstärkt zu berücksichtigen.

Theoretisch sei es möglich, den jährlichen Strombedarf eines Baustellencontainers mithilfe von PV-Modulen oder PV-Folien zu decken. Dafür würden jedoch zum einen Batteriespeicher benötigt, zum anderen müsste der in den Sommermonaten überschüssig produzierte Strom in den Wintermonaten ggf. aus anderen Quellen bezogen werden. Erhöhte Kosten beim Einsatz von Photovoltaik auf Baustellen resultierten auch aus dem Aufwand für den Auf- und Abbau. Die am einfachsten umzusetzende und wirtschaftlichste Methode, um den Stromverbrauch von Baustellen möglichst ressourceneffizient zu gestalten, scheint der Zukauf von 100 % Ökostrom. Dieser Umstand dürfe jedoch kein Anreiz dafür sein, auf das Einsparen von Strom zu verzichten.

Besteht z. B. die Möglichkeit, die Bauzeit auf wärmere Perioden im Jahr zu legen, kann sich hieraus bereits eine hohe Energieeinsparung ergeben. Der Grund dafür liege darin, dass das Heizen einen großen Anteil zum Ge-

samtenergieverbrauch bzw. zu den daraus resultierenden CO₂-Emissionen beiträgt. Eine weitere Option wäre, die jeweilige Gebäudeheizung bereits frühzeitig zu installieren und auf diese Weise so früh wie möglich in Betrieb zu nehmen, da diese in der Regel effizienter arbeiten als mobile Baustellenheizungen.

Als weiterer Impuls wurde angeführt, dass Regenwasser bei Gebäuden, die schnell überdacht sind (z. B. Logistikhallen o. Ä.), gut aufgefangen und für verschiedene Zwecke verwendet werden könne, um auf Baustellen (Trink-)Wasser als Brauchwasser einzusparen. Bei der Verarbeitung von Baustoffen mit Regenwasser sei lediglich darauf zu achten, dass die Eigenschaften des Regenwassers keinen negativen Einfluss auf die Materialeigenschaften hätten.

Der Anteil des Baubetriebs an den Lebenszyklusemissionen eines Gebäudes wurde von den Teilnehmenden auf 1 bis 20 % geschätzt. Tatsächlich gibt es hierzu aktuell keine belastbaren Daten – jedoch ist davon auszugehen, dass eine starke Abhängigkeit von spezifischen Gegebenheiten besteht. Aus diesem Grund sei es im ersten Schritt erforderlich, CO₂-Benchmarks für Baustellenprozesse zu erarbeiten. Als Basis dafür könnten die in der Vergangenheit ermittelten Arbeitszeitfaktoren und Kosten dienen. Hierbei handle es sich bereits um einen Gegenstand der aktuellen Forschung und dies ermögliche somit zukünftig eine fundierte Einschätzung der Emissionen des Baustellenbetriebs.

Im zweiten Schritt gelte es, den Ressourcenverbrauch auf Baustellen zu messen. Hierbei könnten z. B. Smart-Meter zum Einsatz kommen, um Strom- und Wasserverbräuche zu erfassen. Transportkilometer und Abfallmengen seien bereits von Logistikunternehmen messbar. Eine verursachergerechte Ermittlung des Ressourcenverbrauchs auf der Baustelle würde es zudem erlauben, eine Abrechnung der Unternehmen über den tatsächlichen Ressourcenverbrauch durchzuführen, sodass die Abrechnung mithilfe von Umlagen entfielen. Dieses Vorgehen schaffe einen monetären Anreiz und werde daher als geeignete Methode empfunden, um reale Ressourceneinsparungen zu erzielen. Es müsse allerdings

sichergestellt sein, dass die Abrechnung tatsächlich verursachergerecht erfolge. Einzelne Unternehmen trügen durch ggf. Fehlverhalten dazu bei, dass sich Ressourcenverbräuche anderer Unternehmen erhöhten. Beispielhaft wurde hierfür angeführt, dass ein Subunternehmen die automatische Türschließung eines beheizten Baucontainers, der vom Generalunternehmen genutzt wird, blockieren und somit die Verbrauchserfassung verfälschen würde.

Im Zuge der Diskussion rund um das Thema Klimaschutz auf Baustellen sei es wesentlich, die Aspekte Lärm- und Staubvermeidung sowie Bodenschutz nicht zu vernachlässigen. Außerdem dürfe eine nachhaltige Baustelle kein Anreiz für den Bau nicht-nachhaltiger Gebäude sein, sondern müsse stets als ergänzend verstanden werden.

Die Erarbeitung ökologischer Zuschlagskriterien im öffentlichen Vergabeprozess ist essenziell. So könnten z. B. konkrete Grenzwerte in Bezug auf den Betrieb von Baumaschinen Teil der öffentlichen Vergabe werden. Dabei sei auch die Übersetzung verschiedener Klassifizierungssysteme wichtig, wie z. B. zwischen EU- und amerikanischen Klassen. Insbesondere im Bereich der öffentlichen Infrastruktur sei die Berücksichtigung ökologischer Kriterien im Rahmen der Vergabe bereits ein viel betrachtetes und diskutiertes Thema.

Das übergreifende Ressourcenmanagement ist derweil noch ein Mehraufwand, der aktuell keiner definierten Person zugeordnet ist. Daher müsse auch die Schaffung neuer Rollen erwogen werden, indem z. B. – ähnlich zum SiGeKo – eine klimaschutzbeauftragte Person auf Baustellen eingesetzt wird.

7.5 Das DGNB-System für nachhaltige Baustellen

Im Anschluss an die erste Diskussionsrunde stellte Theda Witte, Mitarbeiterin in der Zertifizierungsstelle der DGNB GmbH, in ihrer Präsentation das DGNB-System für nachhaltige Baustellen vor. Dieses System dient als Planungs- und Managementtool für die Bauausführung und gewährleistet unter anderem eine Qualitätssicherung sowie Risikominimierung auf

Baustellen. Neben dem Ressourcenschutz werden auch Gesundheit und Soziales, die Baustellenorganisation, die Kommunikation mit der Öffentlichkeit sowie die Ausführungsqualität berücksichtigt. Das Zertifizierungssystem ist universell bei nationalen und internationalen Hoch- und Tiefbauprojekten anwendbar und richtet sich insbesondere an baubeauftragende Instanzen, Kommunen und Bauunternehmen.

Das System ist in Kriterien und Indikatoren organisiert. Einige Indikatoren sind als Mindestvoraussetzung zu erfüllen, während andere wahlweise umsetzbar sind. Zur Erlangung des Zertifikats müssen min. 65 % der Kriterien erfüllt werden. Verpflichtend im Kriterium des Ressourcenschutzes ist z. B. der Einsatz energieeffizienter Baumaschinen und Anlagen. Folglich sind alle motorbetriebenen Anlagen und Maschinen mit einer Leistung von mehr als 75 kW mit der jeweiligen EU-Stufe zu dokumentieren. Die Winterbauheizung ist, sofern auf sie nicht verzichtet werden kann, ohne fossile Energieträger zu betreiben.

Weitere Indikatoren im Kriterium Ressourcenschutz sind der Zukauf von 100 % Ökostrom, die Offenlegung der Menge eingesetzter Energieträger auf der Baustelle, der Einsatz umweltgerechter Transportmittel, die Erfassung sämtlicher Transporte und die Vernetzung der Baustelle. Die Wiederverwendung und -verwertung von Baumaterialien werden z. B. durch die Umsetzung abfallvermeidender Konzepte adressiert. Maßnahmen zur Trinkwassereinsparung und die Dokumentation des Wasserverbrauchs werden ebenfalls positiv bewertet.

7.6 Nachhaltigkeit auf der Baustelle in der Praxis durch die Anwendung des DGNB-Systems

Dr. Johannes Wall, DGNB-Auditor und Stabsbereichsleiter Nachhaltigkeit bei der Ed. Züblin AG, präsentierte im Anschluss die praktische Anwendung des DGNB-Systems für nachhaltige Baustellen. Die Berücksichtigung des Ressourcenschutzes ist dabei relevanter Teil der Arbeitsvorbereitung. Nach der Definition der Qualitäten im Projekt folgt die Erstellung von Konzepten zu Lärmschutz, Staubvermeidung, Bodenschutz,

Erschütterung/Vibration, Abfallvermeidung und Logistik. Die Konzepte werden anschließend an die DGNB übermittelt, woraufhin ein Vorzertifikat erteilt wird. Während des Bauablaufs finden im monatlichen Rhythmus Baustellenbegehungen und Prüfungen der Konzeptumsetzungen mithilfe der MoreApp statt. Zum Abschluss der Bauausführung werden Revisionsunterlagen und Messprotokolle zum Ressourcenverbrauch kommissioniert und der DGNB für die finale Erteilung des Zertifikats bereitgestellt. Der Stromverbrauch wird für die Baustelle, Containeranlage(n) und sonstige Verbraucherinnen und Verbraucher über einen RLM-Zähler sowie das Portal www.meine-energie.de erfasst. Die Dokumentation des Trinkwasserverbrauchs erfolgt über eine Fotoaufnahme des Wasserzählers.

Von besonderer Relevanz sind vor allem die Produktionsplanung im Sinne von Lean Construction und der konsequente Einsatz von Building Information Modeling. Dabei gilt es unter anderem, die Planung zu präzisieren, den Materialfluss zu optimieren und Gewerke zu orchestrieren. Für eine sinnvolle Nutzung von überschüssigem Baumaterial befindet sich aktuell die Plattform bricksta im Testbetrieb. Über eine App können damit Materialien angeboten und gesucht werden. Vorteile sind – neben einer gesteigerten Ressourceneffizienz – weiterhin die Einsparung von Entsorgungs- und Transportkosten, das Freiwerden von Lagerplätzen sowie die schnelle Verfügbarkeit von Baumaterialien für regionale KMU und Privatpersonen.

Ein Energiemanagement analysiert Einsparpotenziale im Bereich der Baustelleneinrichtung und des Baustellenprozesses. Basierend auf der jeweiligen Maßnahme wird das Einsparpotenzial in Euro, kWh Heizwert und kg CO₂-Äquivalent ermittelt. Maßnahmen, die hohe Einsparungen bewirken können, sind z. B. der Einsatz von LED-Leuchtmitteln und das Aufheizen des Estrichs sowie die Beheizung des Bauwerks über den Hausanschluss mithilfe der fertiggestellten Heizungsanlage. Für die am Bau Beteiligten erarbeitete das Unternehmen ein Schulungsvideo und Handouts in mehreren Sprachen. Die Handreichungen enthalten gebündelte Informationen zum nachhaltigen Umgang mit Ressourcen und werden auf der Baustelle vor Ort ausgehängt. Durch die Zertifizierung der Baustelle

werden in weiterer Konsequenz auch Mitarbeitende für einen schonenden Umgang mit Ressourcen sensibilisiert.

7.7 Diskussion Teil II

Bei Bauprojekten ab einer Auftragssumme von 5 Mio. Euro wendet die Züblin AG das DGNB-System für nachhaltige Baustellen an. Für die Praxis ist das System insofern relevant, dass es eine Benchmark für den Beginn der Optimierung von Baustellenprozessen liefert. Es ist außerdem davon auszugehen, dass die Anforderungen an die Bauunternehmen zum Erhalt des Zertifikats zukünftig steigen werden.

Das DGNB-Zertifikat wecke dabei insbesondere bei großen Bauunternehmen Interesse. Darüber hinaus gäbe es auch Anfragen von kleineren Unternehmen, wie z. B. Architekturbüros. Die Erfüllung der Nachweise im Zuge der Zertifizierung sei jedoch ein zusätzlicher Aufwand, daher lohne sich eine Zertifizierung kleinerer Projekte oftmals nicht. Als Beispiel hierfür sei der Bau eines Wohnhauses für ein oder zwei Haushalte zu nennen.

Einfach umzusetzen seien insbesondere organisatorische Maßnahmen, die eine Ressourceneinsparung bewirken können. Dazu zählen z. B. das Erstellen der Konzepte als Teil der Arbeitsvorbereitung, die Durchführung eines Shopfloor-Managements oder die Anwendung der sogenannten 5-W-Methode. Weitere Ressourceneinsparpotenziale lägen vor allem im Bereich der THG-Emissionen.

Als ambitioniert betrachtet wird der Ressourceneffizienzanspruch im Bereich der Transportdistanzen. Die Nachverfolgung sowie Dokumentation der Transporte seien möglicherweise mit einem hohen Aufwand verbunden. Digitale Werkzeuge könnten hierbei allerdings unterstützen. Die Digitalisierung von Baustellen wird daher als treibende Kraft für mehr Ressourceneffizienz gesehen.

In der Praxis findet der Einsatz elektrischer Baumaschinen – mit Ausnahme weniger Pilotprojekte – aktuell nicht statt. Hemmnisse dafür sind

unter anderem das fehlende Angebot, die hohen Anschaffungskosten sowie die fehlende Erfahrung.

7.8 Zusammenfassung

Das Fachgespräch hat gezeigt, dass in der Errichtungsphase von Bauwerken (teilweise) noch ungenutzte Ressourceneinsparpotenziale liegen. Der Einsatz alternativer ressourceneffizienter Antriebstechnologien stellt in diesem Zusammenhang eine Möglichkeit dar, Transporte umweltfreundlicher zu gestalten. Diese Antriebstechnologien konnten bisher allerdings aufgrund verschiedener Hemmnisse keine Marktdurchdringung erreichen. Anreize für den Erwerb von Baumaschinen mit alternativen Antriebstechnologien könnten jedoch über Förderprogramme und die öffentliche Vergabe geschaffen werden. Darüber hinaus sollten Transporte, bestenfalls projektübergreifend, z. B. durch den Bezug von regionalen Rohstoffen, die Vernetzung von Baustellen oder die Bildung von Fahrgemeinschaften minimiert werden.

Der Bezug bzw. Zukauf von 100 % Ökostrom für die Versorgung der Baustellen ist eine effektive Methode, Ressourcen zu schonen. Zudem kann Regenwasser gesammelt werden, um Trinkwasser – zumindest teilweise – zu substituieren. Ebenso sind einige organisatorische Maßnahmen im Rahmen der Arbeitsvorbereitung und Baustellenabwicklung mit geringem Aufwand umsetzbar und können wirkungsvoll zur Schonung von Ressourcen beitragen.

Baustellenabfälle sind auch mit Blick auf die vielfältigen Materialarten recyclingfähig. Ein großes Hemmnis ist hier jedoch der mit dem Recycling verbundene erhöhte logistische Aufwand. Eine weitestgehende Vermeidung von Baustellenabfall ist bei Neubauten durch die Vorfertigung von Elementen oder Modulen umsetzbar. Zukünftig gewinnt die Erfassung des Ressourcenverbrauchs auf Baustellen, idealerweise aufgeschlüsselt nach Verursachenden, sukzessive an Bedeutung. Potenziale liegen dabei insbesondere in der Abschätzung von THG-Emissionen im Vorfeld einer Bauausführung sowie in der Messung realer Emissionen im Baubetrieb.

LITERATURVERZEICHNIS

Ajayi, S. O.; Oyedele, L. O.; Akinade, O. O.; Bilal, M.; Alaka, H. A. und Owolabi, H. A. (2017): Optimising material procurement for construction waste minimization: An exploration of success factors. In: Sustainable Materials and Technologies, 11, 38-46. ISSN 2214-9937. doi:10.1016/j.susmat.2017.01.001.

Allison, M.; Ashcraft, H.; Cheng, R.; Klawans, S. und Pease, J. (2020): Integrierte Projektabwicklung – Ein Leitfaden für Führungskräfte [online]. Deutsche Übersetzung, Frankfurt a. M. [abgerufen am: 14.09.2022], verfügbar unter: <https://www.glci.de/static/43c973db8b492b418f2a4bbd5d8e1a27/IPA-Handlungsleitfaden-2020-einseitiger-Druck.pdf>

Architects for Future Deutschland e.V. (2021): Umbauordnung für Deutschland, damit Bauen klimaneutral werden kann [online]. Architects for Future Deutschland e. V. [abgerufen am: 10.03.2023], verfügbar unter: <https://www.architects4future.de/news/a4f-umbauordnung>

Barckhausen, A.; Becker, J.; Malodobry, P.; Harfst, N. und Nissen, U. (2020): Energiemanagementsysteme in der Praxis [online]. 2. Auflage, Dessau-Roßlau [abgerufen am: 27.04.2023], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energiemanagementsysteme-in-praxis>

BG Bau (2022): Anforderungen und Hinweise für Arbeitsschutzprämien [online]. Akkubetriebene Verdichtungsgeräte und dieselbetriebene Verdichtungsgeräte mit Dieselpartikelfilter. BG BAU – Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, 28.09.2022 [abgerufen am: 22.03.2023], verfügbar unter: <https://www.bgbau.de/service/angebote/arbeitsschutzpraemien/praemie/akkubetriebene-verdichtungsgeraete-und-dieselbetriebene-verdichtungsgeraete-mit-dieselpartikelfilter>

BG Bau (2023): Staub [online], BG BAU – Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft [abgerufen am: 14.09.2023], verfügbar unter: <https://www.bgbau.de/themen/sicherheit-und-gesundheit/staub>

Bleichert, O. (2015): Entwicklung eines Simulationswerkzeuges zur Ermittlung des Energieverbrauchs im Rahmen der Ökobilanzierung von Bauprozessen. Dissertation, Kassel, Schriftenreihe Bauwirtschaft 1, Forschung. 32, ISBN 978-3-86219-588-6.

Boldt, A. und Rodde, N. (2022): Mustervertragsbedingungen für Mehrparteienverträge im öffentlichen Bauwesen bei Integrierter Projektabwicklung [online]. Enderbericht, Berlin [abgerufen am: 04.11.2022], verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/3Rahmenbedingungen/2021/mustervertragsbedingungen/enderbericht.pdf;jsessionid=692A0F34D7376A713A6BD91AE23FB4AC.live11311?__blob=publicationFile&v=2

Brasseur, G. P.; Jacob, D. und Schuck-Zöllner, S., Hg. (2016): Klimawandel in Deutschland – Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven [online], Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1491863>

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2023): Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss und Kredit [online] [abgerufen am 21.12.2023], verfügbar unter: https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz_und_Prozesswaerme/energieeffizienz_und_prozesswaerme_node.html

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2019): Baustellen-einrichtung – Gebäude, Container, Bauwagen und Magazine [online], Dortmund [abgerufen am: 26.07.2023], verfügbar unter: https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Branchen/Bauwirtschaft/pdf/Gebaeude-Bauwagen-Container.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (2020): Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland – Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt [online]. BBSR-Online-Publikation Nr. 17/2020, Bonn [abgerufen am: 26.07.2023], verfügbar unter: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020.html>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017): Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) – Prozessqualität, Bauausführung, Baustelle/Bauprozess [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Berlin [abgerufen am: 23.03.2023], verfügbar unter: <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/buerogebaude/steckbriefe-bnb-bk-2017/>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2021): Planetare Belastbarkeitsgrenzen [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), 14.09.2021 [abgerufen am: 23.11.2022], verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/themen/nachhaltigkeit-digitalisierung/nachhaltigkeit/integriertes-umweltprogramm-2030/planetare-belastbarkeitsgrenzen>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023): Flächenverbrauch – Worum geht es? [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), 22.02.2023 [abgerufen am: 10.03.2023], verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/themen/nachhaltigkeit-digitalisierung/nachhaltigkeit/strategie-und-umsetzung/flaechenverbrauch-worum-geht-es>

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. planen-bauen 4.0 [online], Gesellschaft zur Digitalisierung des Planens, Bauens und Betreibens mbH, Berlin [abgerufen am: 16.09.2022], verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.html>

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2022): Das Gebäudeenergiegesetz [online]. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) [abgerufen am: 22.11.2022], verfügbar unter: <https://www.bmwsb.bund.de/Webs/BMWSB/DE/themen/bauen/energieeffizientes-bauen-sanieren/gebaeudeenergiegesetz/gebaeudeenergiegesetz-node.html>

Concular GmbH (2022): Unser politisches Engagement [online]. Concular GmbH, 03.11.2022 [abgerufen am: 24.03.2023], verfügbar unter: <https://concular.de/blog/unser-politisches-engagement/>

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2023): DGNB System für nachhaltige Baustellen [online]. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. [abgerufen am: 22.03.2023], verfügbar unter: <https://www.dgnb-system.de/de/gebaeude/baustelle/index.php>

Ding, L.; Wang, T. und Chan, P. W. (2023): Forward and reverse logistics for circular economy in construction: A systematic literature review. In: Journal of Cleaner Production, 388, 1-14. ISSN 0959-6526 [abgerufen am: 26.07.2023]. doi:10.1016/j.jclepro.2023.135981.

Eckardt, L. (2022): Stornierungen sorgen für Auftragsrückgang am Bau [online]. In: ZEIT ONLINE [abgerufen am: 27.04.2023], verfügbar unter: https://www.zeit.de/wirtschaft/2022-09/baubranche-aufraege-stornierungen-wohnungsbau-statistisches-bundesamt?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F

Ellingsen, H. E. (2021): New pedestrian street brings new life to Oslo city centre [online]. Oslo's climate agency, 09.02.2021 [abgerufen am: 10.02.2023], verfügbar unter: <https://www.klimaoslo.no/2021/02/09/new-pedestrian-street-brings-new-life-to-oslo-city-centre/>

Euroident GmbH (2023): Bauunternehmen und Fachhandwerker – Mit kleinen Schritten zur Baustelle der Zukunft [online]. Euroident GmbH [abgerufen am: 02.06.2023], verfügbar unter: <https://www.euroident.de/bau-unternehmen-fachhandwerker-baubranche.html>

Faber Infrastructure GmbH (2023): Die mobile Solaranlage für die Baustellen der Zukunft [online]. Faber Infrastructure GmbH [abgerufen am: 26.07.2023], verfügbar unter: <https://www.faber-infrastructure.com/in-dex.php/solarframe-die-mobile-solaranlage/>

Flohr, S. (2010): Untersuchungen zum Fangvermögen von Mittel- und Feinstaub (PM10 und PM2.5) an ausgesuchten Pflanzenarten unter Berücksichtigung der morphologischen Beschaffenheit der Blatt- und Achsenoberflächen und der Einwirkung von Staubauflagen auf die Lichtreaktion der Photosynthese [online], Inaugural-Dissertation, Universität Duisburg-Essen [abgerufen am: 27.09.2023], verfügbar unter: <https://core.ac.uk/download/pdf/33798824.pdf>

Fricke, L.; Beusker, J. und Reutern, A. von (2023): Die Kreislaufwand: Prämierte Innovation für Außenwände [online], Building Circular [abgerufen am: 25.07.2023], verfügbar unter: <https://www.builtworld.com/event/kreislaufwand-innovation-aussenwaende>

Goger, G.; Piskernik, M. und Urban, H. (2018): Studie: Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen – Analyse der Potenziale und Herausforderungen durch die zunehmende Digitalisierung der österreichischen Baubranche, Ableitung von Handlungsfeldern für zukünftige Forschung aus Sicht von Wissenschaft und Praxis [online]. Technische Universität Wien, Wien, Berichte aus Energie- und Umweltforschung [abgerufen am: 22.09.2022], verfügbar unter: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/publikationen/schriftenreihe-2018-02-studie-potenziale-der-digitalisierung.php>

Gunawardena, T. und Mendis, P. (2022): Prefabricated Building System – Design and Construction [online]. In: Encyclopedia, 2(1), 70-95. Encyclopedia. doi:10.3390/encyclopedia2010006.

Günther, A.; Gerdener, H.; Boergens, E.; Kusche, Jürgen; Kollet, S.; Dobschaw, H.; Hartick, C.; Sharifi, E. und Flechtner, F. (2023): Veränderungen der Wasserspeicherung in Deutschland seit 2002 aus Beobachtungen der Satellitengravimetrie [online], In: Fachzeitschrift für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, S. 74-89, HW 67.2023, H.2 [abgerufen am: 27.09.2023]. doi:10.5675/HyWa_2023.2_1, verfügbar unter: https://gfz-public.gfz-potsdam.de/rest/items/item_5015837_1/component/file_5015847/content

Haghsheno, S. und Wachter, N. (2019): Lean Construction – Begriffe und Methoden [online], Karlsruhe [abgerufen am: 06.09.2022], verfügbar unter: https://www.glci.de/static/bea5dad268500c2ec1d6eca3f82d1b3c/GLCI-Begriffe-und-Methoden_Gesamtdokument_neu.pdf

Haghsheno, S.; Baier, C.; Budau, M. R.-D.; Schilling Miguel, A.; Talmon, P. und Frantz, L. (2022): Strukturierungsansatz für das Modell der Integrierten Projektabwicklung (IPA)/Structuring approach for Integrated Project Delivery. In: Bauingenieur, 97(03), 63-76. ISSN 0005-6650. doi:10.37544/0005-6650-2022-03-47.

Hauptverband der Deutschen Bauindustrie (2022): Versorgungssicherheit mit Roh- und Baustoffen sowie Energie gewährleisten Ressourceneffizienz weiter steigern. Positionspapier Rohstoffsicherung [online], Berlin [abgerufen am: 08.11.2022], verfügbar unter: https://www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Media/Positionen/Positionspapier_Rohstoffversorgung_HDB_und_bbs_final.pdf

Hawkins, H.-J.; Cargill, R. I.; van Nuland, M. E.; Hagen, S. C.; Field, K. J.; Sheldrake, M.; Soudzilovskaia, N. A. und Kiers, E. T. (2023): Mycorrhizal mycelium as a global carbon pool. In: Current Biology, 33(11), R560-R573. ISSN 09609822. doi:10.1016/j.cub.2023.02.027.

Heidt, C.; Helms, H.; Kämper, C. und Kräck, J. (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) – Berichtsteil TREMOD-MM [online]. Institut für Energie und Umweltforschung (ifeu), Heidelberg, Dessau-Roßlau [abgerufen am: 10.02.2023], verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-29_texte_117-2020_tremod_mm_0.pdf

Hiebl, E. (2018): Effizienzsteigerung durch den Einsatz von BIM in der Bauausführung [online]. Diplomarbeit, TU Wien, Wien [abgerufen am: 26.01.2023], verfügbar unter: <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/4411>

Hillig, J.-B. und Beuthan, T. (2020): Integrierte Projektabwicklung (IPA) mit Mehrparteienverträgen – Wie weit voraus ist uns die internationale Vertragspraxis? – Bericht zur 19. Sitzung des AK Internationales Baurecht der ARGE Baurecht am 05.03.2020 in Leipzig [online]. Deutscher Anwaltverein e. V., Berlin [abgerufen am: 15.09.2022], verfügbar unter: https://arge-baurecht.com/fileadmin/user_upload/artikel/veranstaltungen/Tagungen/2020/BRT-55/AK_International_Nachbericht_19_Sitzung.pdf

Hofstadler, C., Hg. (2019): Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht [online], Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-27430-6, verfügbar unter: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-27431-3>

IPA Zentrum (2022): Das Kompetenzzentrum für integrierte Projektentwicklung [online]. German Lean Construction Institute – GLCI e.V. [abgerufen am: 15.09.2022], verfügbar unter: <https://ipa-zentrum.de/>

Kleiner, J. (2023): Ein Beitrag zur Entwicklung von Baustellenversorgungssystemen [online], Dissertation, Technische Universität Darmstadt [abgerufen am 27.09.2023], verfügbar unter: https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/24343/1/Kleiner_Jonas_Dissertation.pdf

Kölzer, T. (2021): Einflüsse der Digitalisierung auf Baustellenarbeitsprozesse [online]. Dissertation, Hamburg [abgerufen am: 23.03.2023], verfügbar unter: <https://tore.tuhh.de/handle/11420/9668>

Kraus, P. (2023a): Baukonjunkturtableau Deutschland [online], Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V., Berlin [abgerufen am: 27.04.2023], verfügbar unter: <https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/aktuelles>

Kraus, P. (2023b): Bauwirtschaft im Zahlenbild [online], Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V., Berlin [abgerufen am: 26.07.2023], verfügbar unter: <https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/bauwirtschaft-im-zahlenbild>

Kreislaufwirtschaft Bau (2023): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2020 [online]. Kreislaufwirtschaft Bau, Berlin [abgerufen am: 21.02.2023], verfügbar unter: <https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-13.pdf>

Kröhnert, H.; Itten, R. und Stucki, M. (2022): Comparing flexible and conventional monolithic building design: Life cycle environmental impact and potential for material circulation. In: Building and Environment, 222, 1-13. ISSN 03601323 [abgerufen am: 26.07.2023]. doi:10.1016/j.buildenv.2022.109409.

Kuhn, A.; Knecht, K. und Schultheiss, M. (2023): Untersuchung von CO₂-Emissionen von Erdbauarbeiten, Baugrubensicherungen und Tiefgründungen bei der Erstellung von Untergeschossen [online]. Amt für Hochbauten, Fachstelle Umweltgerechtes Bauen, Zürich [abgerufen am: 22.06.2023], verfügbar unter: <https://www.stadt-zuerich.ch/hbd/de/index/hochbau/bauen-fuer-2000-watt/grundlagen-studienergebnisse/2023-06-nb-untersuchung-co2-emissionen.html>

Kumar, S. S. und Cheng, J. C. (2015): A BIM-based automated site layout planning framework for congested construction sites. In: Automation in Construction, 59, 24-37. ISSN 09265805 [abgerufen am: 22.03.2023]. doi:10.1016/j.autcon.2015.07.008.

Leifgen, C. (2020): Ein Beitrag zur digitalen Transformation der Lean Construction am Beispiel der BIM-basierten Taktplanung und Taktsteuerung [online]. Dissertation, Shaker Verlag GmbH, Darmstadt, verfügbar unter: https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/9247/7/Dissertation_Leifgen_final_farbe_cc.pdf

Lücke, N. (2021): Klimafreundliche Baustelle – So geht's! [online]. Ingenieur.de, VDI Verlag GmbH [abgerufen am: 26.07.2023], verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/bau/klimafreundliche-baustelle-so-gehts/>

Madaster (2022): Forderungen an einen digitalen Gebäuderessourcenpass [online]. Madaster Germany GmbH [abgerufen am: 01.03.2022], verfügbar unter: <https://madaster.de/gebaeuderessourcenpass>

Maxwell, D. und Couper, R. (2022): Construction tracking: implications of logistics data [online]. In: Construction Innovation [abgerufen am: 22.06.2023], verfügbar unter: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/CI-06-2021-0122/full/html>

Müller, F. (2019): Gips – Factsheet [online]. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau [abgerufen am: 26.07.2023], verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet_gips_fi_barrierefrei.pdf

Ng, M. S.; Graser, K. und Hall, D. M. (2021): Digital fabrication, BIM and early contractor involvement in design in construction projects: a comparative case study [online]. In: Architectural Engineering and Design Management, 39-55 [abgerufen am: 18.11.2022], verfügbar unter: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452007.2021.1956417>

Obernosterer, R.; Lepuschitz, B.; Daxbeck, H.; Kisliakova, N.; Hörzinger, N.; Goger, G.; Winkler, L. und Weigert, M. (2021): Die CO₂ neutrale Baustelle – Ein Beitrag zum Klimaschutz der österreichischen Bauwirtschaft. Ressourcen Management Agentur (RMA) [online], Wien [abgerufen am: 26.01.2023], verfügbar unter: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/co2-neubau.php>

Placzek, G.; Barking, L.; Troitzsch, H. und Schwerdtner, P. (2022): Aktionsplan zur modellbasierten Baulogistikplanung – Die Implementierung BIM-basierter Planungsmethoden in die Fachdisziplin Baulogistik erfordert Handlungsbedarf. In: Bautechnik, 99(12), 912-915. ISSN 0932-8351 [abgerufen am: 27.04.2023]. doi:10.1002/bate.202200082.

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2022): Bauen und Wohnen [online]. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. [abgerufen am: 12.05.2022], verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimafreundliches-zuhause-1792146>

Przybilla, M. et al. (2022): Lean Logistik Leitfaden [online]. German Lean Construction Institute – GLCI e.V., Karlsruhe [abgerufen am: 02.02.2023], verfügbar unter: <https://www.glci.de/static/d0ca7b25c62ebb36ba06eaa9fd46789c/GLCI-Leitfaden-Lean-Logistik-1.-Auflage.pdf>

Rinne, R.; Ilgin, H. E. und Karjalainen, M. (2022): Comparative Study on Life-Cycle Assessment and Carbon Footprint of Hybrid, Concrete and Timber Apartment Buildings in Finland. In: International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(2). ISSN 1660-4601 [abgerufen am: 20.01.2023]. doi:10.3390/ijerph19020774.

Rockwool (2020): Abfallrücknahme-Service Rockcycle [online]. DEUTSCHE ROCKWOOL GmbH & Co. KG [abgerufen am: 28.06.2023], verfügbar unter: https://www.rockwool.com/de/downloads-und-services/steinwolle-entsorgen/?gclid=EAlaIqobChMlv7mEn76P-glVEed3Ch3-HwqTEAAYASAAEgJX4PD_BwE

Saint-Gobain Isover (2022): Recycling und Entsorgung mit ISOVER [online]. SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG [abgerufen am: 12.09.2022], verfügbar unter: <https://www.isover.de/recycling-und-entsorgung-mit-isover>

Schach, R. und Otto, J. (2022): Baustelleneinrichtung – Grundlagen – Planung – Praxishinweise – Vorschriften und Regeln. 4., aktualisierte Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-36870-8.

Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz (2021): Recycling von Gips [online]. Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz [abgerufen am: 12.07.2022], verfügbar unter: <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/kreislaufwirtschaft/projekte/recycling-von-gips/>

Slepicka, M.; Vilgertshofer, S. und Borrmann, A. (2022): Fabrication information modeling: interfacing building information modeling with digital fabrication. In: Construction Robotics. ISSN 2509-811X [abgerufen am: 27.07.2023]. doi:10.1007/s41693-022-00075-2.

Smart Approved WaterMark (2022): SAVING WATER – Water use in the building industry [online]. The Water Conservancy [abgerufen am: 04.10.2022], verfügbar unter: <https://www.smartwatermark.org/smartwateradvice/saving-water-business/building-industry/saving-water/>

Statistisches Bundesamt (2022a): Bauhauptgewerbe / Ausbaugewerbe / Baurträger – Lange Reihen der jährlichen Betriebserhebungen 2021 [online]. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden [abgerufen am: 06.01.2023], verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Baugewerbe-Struktur/lange-reihen-betriebserhebung-bau-ausbaugewerbe-pdf-5442001.pdf?__blob=publicationFile

Statistisches Bundesamt (2022b): Gesamtumsatz und ausgewählte Kosten (Anteil am Gesamtumsatz) 2020, nach Beschäftigtengrößenklassen [online]. Statistisches Bundesamt (Destatis), 11.07.2022 [abgerufen am: 15.12.2022], verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Tabellen/gesamtumsatz-kosten.html>

Steger, S.; Wilts, H.; Bergs, L. und Bergmann, L. (2022): Energetische Sanierung von Bestandsgebäuden oder Neubau – Ökologische Bewertung hinsichtlich Materialbedarf, Primärenergieverbrauch und damit verbundenen Treibhausgas-Emissionen [online]. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (WI), Wuppertal [abgerufen am: 05.05.2022], verfügbar unter: https://ir.leg-se.com/fileadmin/user_upload/Presse/Publikationen/Gutachten/140322_LEG_WI_STUDIE_FINAL.pdf

Suhr, J. (1999): The choosing by advantages decisionmaking system [online], Quorum, Westport, Connecticut, verfügbar unter: https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=TulbgUyU2GsC&oi=fnd&pg=PR7&dq=choosing+by+advantages&ots=YqaUuxudiP&sig=oBUoZ8gnwR4-OG-BDo_uThfkENyA#v=onepage&q=choosing%20by%20advantages&f=false

Teizer, J.; Neve, H.; Li, H.; Wandahl, S.; König, J.; Ochner, B.; König, M. und Lerche, J. (2020): Construction resource efficiency improvement by Long Range Wide Area Network tracking and monitoring. In: Automation in Construction, 116, 1-13. ISSN 09265805. doi:10.1016/j.aut-con.2020.103245.

Thamling, N. und Rau, D. (2022): Hintergrundpapier zur Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045 – Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz [online]. BMWK, Berlin, Basel, München, Freiburg, Heidelberg, Dresden [abgerufen am: 09.05.2023], verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/gebäudestrategie-klimaneutralitaet-2045.html>

TRIQBRIQ AG (2023): Partnerschaftliche Produktinnovation: Die Kreislaufwand – Zirkuläres Produktdesign im gesamten Wandaufbau [online], Stuttgart/Nottuln [abgerufen am: 29.06.2023], verfügbar unter: <https://triqbriq.de/partnerschaftliche-produktinnovation-die-kreislaufwand-zirkulaeres-produktdesign-im-gesamten-wandaufbau/>

Umweltbundesamt (2021): Lärmwirkungen [online]. Umweltbundesamt (UBA), 26.03.2021 [abgerufen am: 14.09.2023], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/laerm/laermwirkungen>

Umweltbundesamt (2022): Spezifische Emissionen des Straßenverkehrs [online]. Umweltbundesamt (UBA), 14.09.2022 [abgerufen am: 10.02.2023], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#strassenguterverkehr>

Umweltbundesamt (2023): Umwelt und Klima schützen – Wohnraum schaffen – Lebensqualität verbessern [online]. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau [abgerufen am: 10.03.2023], verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umwelt-klima-schuetzen-wohnraum-schaffen>

Umweltinnovationsprogramm (2023): 28 Tonnen E-Bagger mit Lithium-Ionen-Batteriespeicher [online]. Umweltbundesamt (UBA) [abgerufen am: 26.07.2023], verfügbar unter: <https://www.umweltinnovationsprogramm.de/projekte/28-tonnen-e-bagger-mit-lithium-ionen-batteriespeicher>

Universität Innsbruck, Arbeitsbereich für Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau (2022): Tagungsband zum 31. BBB-Assistent:innentreffen Innsbruck 2022 [online]. Studia Verlag, ISBN 978-3-99105-026-1 [abgerufen am: 18.11.2022], verfügbar unter: <https://diglib.uibk.ac.at/ulbtirolfordok/content/titleinfo/7933879/full.pdf#page=8>

VDI 4800 Blatt 1:2016-02: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 1:2023-08: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien (Entwurf), Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2019a): Ressourceneffizienz im Bauwesen – Von der Planung bis zum Bauwerk [online], Broschüre [abgerufen am: 16.02.2022], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/broschuere-bauwesen-2/>

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2019b): Rückbau im Hochbau – Aktuelle Praxis und Potenziale der Ressourcenschonung [online]. Kurzanalyse Nr. 26 [abgerufen am: 10.12.2022], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/ka-26-rueckbau-im-hochbau/>

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2021): Ressourceneffizienz durch Produktionsplanung und Lean Production [online]. Kurzanalyse Nr. 30 [abgerufen am: 16.05.2023], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/ka-30-lean-production/>

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2022): Recyclinggerechtes Konstruieren im Bauwesen [online]. Webtool [abgerufen am: 29.06.2023], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/werkzeuge/analyse-werkzeuge/ressourcenchecks/recyclinggerechtes-konstruieren-im-bauwesen/>

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2023): Ressourceneffizienz durch Building Information Modeling – Anforderungen und Potenziale [online], Broschüre [abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/broschuere-ressourceneffizienz-durch-building-information-modeling/>

Wall, J. und Schweig, U. (2021): Effiziente Zertifizierung einer nachhaltigen Baustelle anhand agiler und digitaler Methoden. In: Hofstadler, C. und Motzko, C., Hg. Agile Digitalisierung im Baubetrieb. Grundlagen, Innovationen, Disruptionen und Best Practices. Springer Vieweg, Wiesbaden, S. 389-405, ISBN 978-3-658-34106-0.

Weidner, S.; Mrzigod, A.; Bechmann, R. und Sobek, W. (2021): Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategie. In: Beton- und Stahlbetonbau, 116(12), 969-977. ISSN 0005-9900 [abgerufen am: 18.11.2022]. doi:10.1002/best.202100065.

Zhu, M.; Dai, J.; Liu, R.; Xu, J. und Alwisy, A. (2021): Two-period based carbon-economy equilibrium strategy for modular construction supply planning. In: Journal of Cleaner Production, 290, 1-14. ISSN 0959-6526. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125674.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE)
Bülöwstraße 78
10783 Berlin
Tel. +49 30-2759506-505
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

