

Bernhard Hauke,

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen,  
Institut Bauen und Umwelt (Hrsg.)

# Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz

**Konstruktive Lösungen für das  
Planen und Bauen  
Aktueller Stand der Technik**

- Grundgedanken zu Lösungsansätzen der Baubranche
- praktische konstruktive Lösungen und Dienstleistungsangebote
- angewandte Wissenschaft

Das Buch betrachtet die Themen Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz. Das Bauwesen hat hier eine wichtige Rolle. Für die von den Bauingenieuren verantworteten Hauptstrukturen wird eine Übersicht zu den technischen Möglichkeiten für das Planen und Bauen gegeben.

## BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

www.ernst-und-sohn.de/3334



2021 · 324 Seiten · 258 Abbildungen ·  
25 Tabellen

Softcover

**ISBN 978-3-433-03334-0 € 29,90\***

eBundle (Print + PDF)

**ISBN 978-3-433-03334-0 € 38,90\***

## ÜBER DAS BUCH

Nachhaltigkeit ist das neue Normal. Und doch steht Nachhaltigkeit in der Baubranche noch immer bei der Planung und Umsetzung oft hinter Themen wie Sicherheit, Kosten und Terminen zurück. Aber es ist unbestritten ein Thema, welches gesellschaftlich weiter an Bedeutung gewinnt. Neuer sind Fragen zur Ressourceneffizienz der eingesetzten Baumaterialien und ganz aktuell des Klimaschutzes. Dem Bausektor fällt hier wegen seiner wirtschaftlichen Bedeutung und insbesondere wegen des relevanten Ressourceneinsatzes eine wichtige Rolle zu.

Das Buch greift diese Themen aus Sicht von Konstruktiven Ingenieuren, Bauunternehmen und Bauproduktenherstellern auf und fasst den aktuellen Stand der Technik mit konstruktiven Lösungen für das Planen und Bauen übersichtlich zusammen. Eingangs werden Hintergrund und Zielsetzung kurz und prägnant beleuchtet. Im anschließenden Fachteil werden zielgruppengerecht und lösungsorientiert Ansätze und aktuelle Möglichkeiten

ten durch führende Ingenieure und Forscher vorgestellt. Abschließend werden Produkte und Dienstleistungen für Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz beim Planen und Bauen präsentiert.

## BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03334-0	Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz	€ 29,90*
	978-3-433-03334-0	Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz (Print + PDF)	€ 38,90*

Privat

Geschäftlich

Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:

**Tel. +49 (0)30 47031-236**

**Fax +49 (0)30 47031-240**

**marketing@ernst-und-sohn.de**

108208 Free Shipping

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
UST-ID Nr.

\_\_\_\_\_  
Name Vorname

\_\_\_\_\_  
Telefon

\_\_\_\_\_  
Fax

\_\_\_\_\_  
Straße Nr.

\_\_\_\_\_  
PLZ/Ort/Land

\_\_\_\_\_  
E-Mail

**www.ernst-und-sohn.de/3334**

\_\_\_\_\_  
Datum/Unterschrift

# **Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz**

*Herausgeber*

*Bernhard Hauke*

*Mitherausgeber*

*Christine Lemaitre für die DGNB*

*Alexander Röder für das IBU*



# Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz

Konstruktive Lösungen für das Planen  
und Bauen

Aktueller Stand der Technik

*Herausgeber*

*Bernhard Hauke*

*Mitherausgeber*

*Christine Lemaitre für die DGNB*

*Alexander Röder für das IBU*

Herausgegeben von  
Bernhard Hauke  
Goldberger Straße 37  
40822 Mettmann  
Germany

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V.  
Tübinger Straße 43  
70178 Stuttgart  
Germany

Institut Bauen und Umwelt – IBU e.V.  
Panoramastraße 1  
10178 Berlin  
Germany

Titelbild: Alnatura Campus, Darmstadt (Mit freundlicher Genehmigung von Knippers Helbig. Copyright: Roland Halbe)

**Alle Bücher von Ernst & Sohn werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung**

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2021 Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsanlagen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

**Print ISBN:** 978-3-433-03334-0

**ePDF ISBN:** 978-3-433-61066-4

**Umschlaggestaltung:** Verlag Ernst & Sohn

**Satz:** LVD Berlin

**Druck und Bindung:** Media-Print GmbH

Printed in the Federal Republic of Germany.  
Gedruckt aus säurefreiem Papier.

# Inhaltsverzeichnis

*Barbara Hendricks*

## **Grußwort**

Strategien für zukunftsfähiges Bauen und Wohnen

7

## **Teil A Einführung und Hintergrund**

*Lamia Messari-Becker*

### **Nachhaltiges Bauen als Routine: Aufgaben für Praxis, Forschung, Lehre und Politik**

11

*Christine Lemaitre*

### **Lasst uns einfach anfangen!**

Die globalen Herausforderungen werden nur mit konkretem Handeln gelöst

18

*Hans R. Peters*

### **Auf Transparenz bauen**

Von der Notwendigkeit vergleichbarer und verlässlicher Daten

27

*Werner Sobek*

### **Bauen für die Welt von morgen**

31

*Manfred Curbach, Konrad Bergmeister, Peter Mark*

### **Baukulturingenieure – Civil Engineering Goes Green**

39

## **Teil B Konstruktive Lösungen**

*Martin Pauli*

### **Zirkuläre Bauwirtschaft – das neue Normal**

Der Übergang von Energieeffizienz zu Ressourceneffektivität

47

*Alex Hückler, Mike Schlaich*

### **Leichtbau und der böse Bube Beton**

53

*Anna Braune*

### **Klimapositiv planen und bauen**

Gebäude als Triebfeder für konsequenten Klimaschutz

62

*Alexander Rudolphi*

### **Gesundes Bauen, Baumaterialien und Innenraumlufthqualität**

69

*Thomas Kraubitz*

### **Trainer beim Bauen – Nachhaltigkeit planen aus Sicht des Auditors**

80

*Martin Haas, Lynn Mayer*

### **Anforderungen der Architektur an Tragwerksplanung, Baufirmen und Hersteller**

87

*Amandus Samsøe Sattler, Patrick Teuffel, Rijk Blok, Brandon Ross, Delaney McFarland*

### **Im Bestand bauen und Bestand erhalten**

Die Transformation der Stadt

94

*Christoph Motzko, Martin Kessel, Hans-Joachim Linke*

### **Urban Mining – Anwendung im Bereich der gebauten Umwelt**

103

*Elisabeth Endres*

### **Robustes und klimagerechtes Bauen**

111

*Sebastian Treml, Andreas H. Holm*

### **Wärmedämmstoffe**

Energiepolitische Bedeutung – Technische Eigenschaften – Innovationen

118

*Thomas Lützkendorf*

**Regulieren, harmonisieren, operationalisieren?!**

Beitrag der Normung bei der Umsetzung von Prinzipien einer nachhaltigen Entwicklung 129

*Alexander Röder, Matthias Finkbeiner*

**Was jeder im Bauwesen über Ökobilanzen wissen sollte**

136

*Tanja Brockmann*

**Digitale Infrastruktur ÖKOBAUDAT**

146

*Roland Bechmann, Lucio Blandini*

**Dekarbonisierung und Ressourceneffizienz im Bauwesen: Ansätze für den Hochbau aus Forschung und Praxis**

148

*Georgios Gaganelis, Patrick Forman, Peter Mark*

**Stahlbeton optimiert – für ein Mehr an Weniger**

159

*Jan Kortmann, Wiebke Seifert, Matthias Lieboldt, Florian Kopf, Peter Jehle, Manfred Curbach*

**Carbonbeton – Ein Beitrag zur Ressourceneffizienz im Betonbau**

Potenziale, Anwendung und Recyclingfähigkeit 168

*Eric Brehm, Sebastian Pohl*

**Nachhaltiges Bauen mit Mauerwerk**

177

*Anette Müller*

**Baustoffrecycling in Deutschland – Praxis. Probleme. Potenziale.**

186

*Richard Stroetmann, Thoralf Kästner*

**Höherfeste Stähle zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Stahlbau**

198

*Markus Kuhnhenne, Kevin Janczyk, Petr Hradil, Michael Sansom, Jyrki Kesti, Viorel Ungureanu, Véronique Dehan, Paul Kamrath*

**Wiederverwendung im Stahlbau und Metalleichtbau in Europa**

214

*Jan Knippers, Achim Menges*

**Hochleistungswerkstoffe und innovative Strukturmorphologien**

228

Beispiele für das robotische Bauen von morgen

*Annette Hafner, Achim Vogelsberg*

**Bauen mit Holz**

236

*Thorsten Helbig, Matthias Oppe, Daniele Santucci*

**Stampflehm und Holz**

Traditionelle Materialien für das Bauen der Zukunft 247

*Tim Zinke, Matthias Müller, Thomas Ummenhofer*

**Ganzheitliche Analyse und Bewertung von Infrastrukturprojekten**

257

**Teil C Industrie-Informationen**

Inhaltsverzeichnis Teil C: Industrie-Informationen 272

Kurzberichte zum aktuellen Stand der Technik 273

Register 324



© Inga Haar

## Grußwort

### Strategien für zukunftsfähiges Bauen und Wohnen

Es gibt Weltgegenden, in denen spielt es eine Rolle, ob wir uns anstrengen, die Erderwärmung auf 2 oder besser auf 1,5 Grad zu beschränken. Für sie bedeutet es den Unterschied zwischen Sein und Nicht-mehr-Sein – beispielsweise Bangladesch, die Karibik und die pazifischen Inseln. Somit sind Abkommen zum Klimaschutz unumkehrbar und geben eine eindeutige Richtung vor: hinaus aus dem fossilen Zeitalter bei gleichzeitiger Überwindung einer Wirtschafts- und Lebensweise auf Kosten von Armen und von zukünftigen Generationen.

#### Respektieren der ökologischen Grenzen der Erde

Für alle diejenigen, die in den vergangenen Jahrzehnten glaubten, über diese Notwendigkeiten hinwegsehen zu können, zeigt sich nun unter dem Brennglas der Pandemie und des weltweiten Lockdowns, dass jetzt die Zeit ist, unsere bisherige Art des Wirtschaftens grundlegend umzugestalten – hin zu einer nachhaltigen Produktions- und Lebensweise. Nachhaltigkeit ist schon allein vor dem Hintergrund von rund 60 Millionen Menschen, die weltweit auf der Flucht vor Hunger, Armut, Krieg und Verfolgung sind, kein „nice to have“-Konzept. Sie ist eine der Grundfragen von Zivilisation, und aus diesem Grund spiegelt sich das Thema Nachhaltigkeit beim Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden sowie bei der Stadtentwicklung und Siedlungsplanung auch in der 2030-Agenda für Nachhaltige Entwicklung wider. Ein besonderer Schwerpunkt liegt hier außerdem auf der Zielsetzung für Städte: Ihnen kommt weltweit eine zentrale Bedeutung zu, da nach Schätzungen der Vereinten Nationen über drei Viertel der Weltbevölkerung im Jahr 2050 in Städten leben werden. Bereits heute liegt diese Zahl für Deutschland bei über 70 Prozent. Es sind also die urbanen Räume, in denen kurzfristige Entscheidungen zu langfristigen Problemen führen.

#### Paradigmenwechsel erforderlich: Schaffung einer Urbanität, die menschliche Lebensqualität fördert

Ein Beispiel für das untrennbare Zusammenspiel von ökologischen, ökonomischen und sozialen Faktoren ist aktuell der eklatante Mangel an bezahlbarem Wohnraum. Eine

Wohnungsbauoffensive mit Stärkung des Sozialen Wohnungsbaus, die die soziokulturelle wie räumliche Entwicklung der Diversität von Stadtgesellschaften fördert, gehört zu den vordringlichen Zielsetzungen zur Sicherung substanzieller, politischer und ökonomischer Teilhabe. Gleichzeitig soll der Gebäudebestand in Deutschland bis Mitte des Jahrhunderts weitgehend klimaneutral sein, um die Klimaschutzziele erreichen zu können. Klimaschutz oder Nachhaltigkeit im Gebäudebereich kann somit kein Merkmal für gehobene oder gar Luxus-Ausstattung sein. Sie muss als bindende Verpflichtung aus Verantwortung für die Menschen dieser und zukünftiger Generationen sowie für die Welt generell angenommen werden. Die komplexe Praxis des nachhaltigen Bauens bietet hier viele Chancen für neue zukunftsfähige Ideen, Instrumente und Konzepte. Dabei geht es zum einen um Themen wie die Luftverschmutzung innerhalb und außerhalb von Gebäuden, Wasserknappheit und Wasserverschmutzung, Abfallentsorgung bzw. vollständige Kreislaufkonzepte. Zum anderen rücken Konzepte zur klimagerechten und sozialverträglichen Nachverdichtung sowie das Schaffen von vitalen Mittelzentren und Gemeinwohlorientierung in lokal angepassten Stadtplanungsstrategien immer stärker in den Fokus. All dies auch vor dem Hintergrund einer Förderung der urbanen Gesundheit, um dem steigenden Risiko von Epidemien und neuen Infektionskrankheiten aktiv zu begegnen.

Um einen solchen generationenübergreifenden Orientierungsrahmen zu erschaffen, benötigt es Individuen und zivilgesellschaftliche Gruppen, Staaten und Staatengemeinschaften ebenso wie Unternehmen und Wissenschaft, die gemeinsam die Verantwortung für diese große Herausforderung für eine urbane Transformation übernehmen.

Um die Nationale Nachhaltigkeitsstrategie mit ihren Zielen und Indikatoren ebenfalls in der Baupolitik umzusetzen, braucht es den Austausch mit allen Akteuren. Wir brauchen diesen Input und eine freie Diskussion – ich bin überzeugt, dass auch von dieser Publikation viele Impulse zu neuen Wegen im nachhaltigen Bauen ausgehen werden.



Dr. Barbara Hendricks MdB  
Präsidentin des Instituts Bauen und Umwelt e. V. (IBU)  
Bundesministerin a. D.

# **Teil A**

## **Einführung und Hintergrund**



## Bauen für die Welt von morgen

Der vorliegende Text ist das leicht überarbeitete Manuskript einer Rede, die Prof. Werner Sobek am 24. Juni 2020 anlässlich eines Symposiums zum 70. Geburtstag von Peter Sloterdijk in Karlsruhe gehalten hat.

„Bauen für die Welt von morgen“ ist der Titel meines Beitrags. Nicht wenige werden jetzt ein Bild erwarten, das futuristisch anmutende Wohnkapseln mit arktikweißen oder metallischen Oberflächen und horizontal ausgerichteten, ovalen Fenstern zeigt, raumschiffartig, quasi flugfähig, auf alle Fälle mit biomorphen, doppelt gekrümmten Oberflächen ausgestattet, vor magisch leuchtendem Himmel oder im dichten Urwaldgrün oder vor geradezu extraterrestrischen Hintergründen platziert. Wohnkapseln, gruppiert zu Hochhäusern nie gesehener Höhe, aus neuartigen Baustoffen. Begriffe wie „Kohlefasern“ oder „Titan“ kommen uns in den Sinn. Hochhäuser, innen begrünt und mit faszinierenden Räumen für soziale Interaktion, Energiegewinnung und ähnlichem, bisher noch nie Gesehenem, bisher noch nie Gedachtem ausgestattet. Bilder...

**Die Frage nach dem Bauen in der Zukunft ist die Frage nach der Zukunft selbst.**

Andere Bilder einer gebauten Welt von morgen kennen wir kaum. Schon gar nicht kommt es uns in den Sinn, bei dem Versuch, die gebaute Welt von morgen zu errahnen, an ein Elendsquartier zu denken. Wieso nicht? Weil wir den Weg in die Zukunft, all die Jahre dahin, nicht aushalten würden, wenn dies die Perspektive wäre? Aber was ist dann die Perspektive? Fragen tauchen auf: Wer wird diese Welt von morgen denken, wer wird sie entwerfen, wer wird sie bauen können? Was für Menschen werden in diesen Architekturen leben? Wovon träumen diese Menschen?

Wir erkennen: Die Frage nach dem Bauen in der Zukunft ist die Frage nach der Zukunft selbst. Aber wir fragen: Warum sind die heutigen architektonischen Utopien immer noch die von gestern? Wenig ausgerichtet auf das, was wir bereits heute als die Sorgen von morgen erkennen? Und warum findet die Diskussion über unsere Zukunft im Sinn einer Antizipation der potenziellen Probleme, der Szenarien und Gestaltungsmöglichkeiten, im Sinn des Versuchs eines Sprechens über das Noch-nicht-Gewusste, das Noch-nicht-Gesehene, das Noch-nicht-Gedachte, eigentlich gar nicht statt?

Natürlich ist ein Nach-vorne-Denken immer mit dem Risiko des Irrs, des Scheiterns verbunden. Hegel gab uns für dieses potenzielle Scheitern quasi eine Entschuldigung vorab, indem er sagte, dass die Angst vor dem Irrtum der Irrtum selbst sei. Denken und Sprechen über die Zukunft also. Die verunglückte Formulierung des Altkanzlers Helmut Schmidt über Visionen brauchen wir hier nicht zu zitieren. Das wäre zu albern. Sie würde uns nicht weiterbringen, auch wenn das Zitat gerne und von vielen immer wieder benutzt wird. Es geht um etwas anderes. Es geht zum einen darum herauszufinden, welches die *technischen* Konstituenten und welches die *gesellschaftlichen* Konstituenten dieser Zukunft sind. Es geht zum anderen darum, herauszufinden, wer diese Zukunft konzipiert. Ob sie überhaupt jemand konzipiert – oder ob wir sie einfach so ent-

stehen lassen als Abfolge einzelner, in sich vielleicht noch überlegter Schritte, nicht jedoch als überlegten Weg, der durch die Summe von Schritten entsteht.

Gilt Ernst Blochs im „Geist der Utopie“ gemachtes Diktum immer noch, dass „... keiner weiß, was er wirklich will auf dieser ach so eingerichteten Welt“? Und wie gerechtfertigt sind die von Bloch in einem 1967 mit Iring Fetscher geführten Interview gemachten Vorwürfe der „utopischen Unterernährung“, gar der „Impotenz im Antizipatorischen“ unserer Gesellschaft [1]? Vielleicht führt der Blick nach vorne dazu, dass viele Menschen die Zukunft nicht mehr denken wollen. Paul Watzlawick wies immer wieder darauf hin, dass wir für unser emotionales Überleben Einsicht in eine sinnvolle Welt brauchen, da ein als sinnlos erlebtes Leben unerträglich sei. Besteht die von Bloch konstatierte „Verzweigung am Ende“ vielleicht in der Unerträglichkeit, der Sinnlosigkeit dessen, was am Horizont aufscheint? Folgt unsere Wohlstandsgesellschaft deshalb lieber dem japanischen Sprichwort „Es ist besser, hoffnungsfroh zu reisen, als anzukommen“ [2]?

Wenn wir die Frage nach dem Bauen in der Zukunft nicht (wie sonst üblich) unter gestalterischen, sondern unter bauorganisatorischen Gesichtspunkten beleuchten, also jenseits dessen, was die Architektur als Erscheinung, als „fascia“ (Gesicht), als Fassade ist, dann bekommen wir einige Einblicke in das, was da am Horizont aufscheint, bekommen wir Einblicke in die technischen Konstituenten unserer Zukunft. Folgen Sie mir also bitte in eine Ihnen – wahrscheinlich – unbekannte Welt. Und stellen Sie sich bitte einmal vor, dass jeder deutsche Bürger 490 t Baustoffe besitzt. Diese Summe ist ungefähr hälftig aufzuteilen: jeder Bürger besitzt ca. 250 t an Infrastrukturbauwerken und ca. 240 t Anteile an den Hochbauten unseres Landes.

Ich eröffne meine weiteren Überlegungen nun mit zwei Fragen. Die erste Frage lautet: Wie viel Material, wie viel Baustoffe müssen wir hier und jetzt bereitstellen, um allen bereits lebenden Menschen unserer Welt den Baustandard der heutigen Industrieländer zu ermöglichen – denn aus welcher moralischen Position heraus wollten wir ihnen diesen Standard verweigern? Da die Erfassung von volkswirtschaftlichen Tätigkeiten und Beständen komplex und zeitaufwendig ist, hinken statistische Aussagen zeitlich immer etwas hinterher. Nehmen wir also die gesicherten Zahlen von 2010. Wir stellen fest, dass der durchschnittliche Materialbesitz pro Kopf der Weltbevölkerung 11 % dessen beträgt, was ein Bürger der Industrieländer besitzt. Die bekannte Asymmetrie. Um also allen Erdenbürgern den gleichen baulichen Standard bereitzustellen, müsste umgehend die Summe von 2 Bio. t an Baustoffen bereitgestellt werden. Diese Summe entspricht dem 2,6-Fachen dessen, was wir heute auf der Erde an gebauter Umwelt in toto vorfinden.

Die zweite Frage ist die nach der Zukunft. Pro Sekunde werden ca. 4,4 Menschen geboren; ca. 1,8 Menschen sterben zur gleichen Zeit, sodass die Nettobilanz der weltweiten Bevölkerungszunahme ca. 2,6 Menschen beträgt – pro Sekunde. Dies bedeutet (bundesdeutschen Baustandard vorausgesetzt), dass pro Sekunde ca. 1.300 t an Baustoffen extrahiert, verarbeitet und bereitgestellt werden müssten. Tag und Nacht. Jahraus, jahrein. Nun kann man, um diese ungeheure Zahl auf das Machbare zu reduzieren, die Anzahl der Geburten pro Zeiteinheit nur schwerlich in signifikanter Weise verringern (wenn

**Um allen Erdenbürgern den gleichen baulichen Standard bereitzustellen, müsste umgehend die Summe von 2 Bio. t an Baustoffen bereitgestellt werden**

man einmal von künstlichen Eingriffen wie den von einigen Staaten unserer Erde viel geübten Inszenierungen von Kriegen oder Hungersnöten absieht).

Wir wenden uns deshalb kurz einer der *gesellschaftlichen* Konstituenten unserer gemeinsamen Zukunft zu. Man kann die Anzahl der Geburten pro Zeiteinheit ohne massive Eingriffe in die Fruchtbarkeit der Menschen nur schwerlich schnell und in signifikanter Weise verringern. Der Grund hierfür liegt in der Populationsdynamik, deren Zeitmaß eher in Generationen denn in Stunden oder gar Sekunden angegeben wird.

Ein einfaches Beispiel lässt vieles klar werden: Im Jahr 1950 lag die biologische Reproduktionsrate in Indien bei 5,8 (Kindern pro Frau). Heute liegt sie bei 2,2. Der die Bevölkerungsstagnation kennzeichnende Wert von 2,1 wird noch vor 2020 erreicht werden. Dies ist ein großer gesellschaftspolitischer Erfolg. Wir müssen aber bedenken, dass der die Stagnation kennzeichnende Wert nur bei langsamen Veränderungen der Bevölkerungsgröße aussagefähig ist. Denn: Von den heute in Indien lebenden 1,2 Mrd. Menschen sind 59 % jünger als 25 Jahre. Das bedeutet, dass ca. 350 Mio. Inderinnen auch bei einer reduzierten Reproduktionsrate von 2,1 allein in der kommenden Generation insgesamt 735 Mio. Kinder gebären werden. Die Summe der Todesfälle in diesem Zeitraum ist vergleichsweise niedrig – auch in Indien nimmt die Lebenserwartung zu, und 59 % der Inder sind jünger als 25 Jahre; es gibt also vergleichsweise wenige alte Menschen. All dies führt dazu, dass die indische Bevölkerung trotz vorbildlicher Familienpolitik bis zum Jahr 2050, also innerhalb knapp einer Generation, um ca. 550 Mio. Menschen wachsen wird.

Und da die Verhältnisse in anderen Ländern wie Nigeria, den Philippinen oder Brasilien ähnlich sind, können wir hier als erstes Fazit festhalten, dass eine signifikante Reduktion des Bevölkerungszuwachses zumindest in der kommenden Generation nicht möglich sein wird.

Ich kehre zurück zur Diskussion einiger der *technischen* Konstituenten unserer Zukunft, nämlich der Verfügbarkeit der Baustoffe. Würden wir jedem der zukünftigen Bewohner Indiens einen bundesdeutschen Baustandard zuschreiben, dann würde dies allein für diese eine Generation junger Menschen in Indien die Bereitstellung einer Baustoffmenge von ca. 300 Mrd. t an Holz, Beton und Steinen aller Art bedeuten. Zusammen mit der Populationsdynamik in den anderen Ländern der Welt bedeutet dies, dass wir (wollen wir bis zum Jahr 2050 allen Erdenbürgern den baulichen Standard der Industrieländer ermöglichen) die gesamte heute gebaute Welt innerhalb der kommenden 33 Jahre noch *drei* Mal bauen müssten. Mit den aktuell verwendeten Methoden und Materialien geht dies sicher nicht, ohne dass wir unseren Planeten mit Sicherheit in den völligen ökologischen Kollaps zwingen.

Um diese Vermutung etwas zu durchleuchten, betrachten wir zunächst einmal nur die Baustoffverfügbarkeiten und die Baustoffströme. Eine ganze Reihe von Rohstoffen ist in der soeben angeforderten Menge nicht verfügbar. Hierzu gehören (ich beziehe mich auf eine Veröffentlichung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aus dem Jahr 2005) bspw. Zink oder Zinn. Beide gehen, heutige Verbrauchszahlen vorausgesetzt, in ungefähr 10–12 Jahren zur Neige, genauso wie Blei und andere wichtige Rohstoffe. Hinzu kommen Legierungselemente bspw. zur Herstellung von Stahl, die entweder zur Neige gehen oder nur in wenigen, politisch instabilen Regionen verfügbar sind. Selbst Holz gibt es nicht in hinreichend verfügbarer Menge. Wenn wir einmal die vor-

**Teil B**  
**Konstruktive Lösungen**



# Zirkuläre Bauwirtschaft – das neue Normal

## Der Übergang von Energieeffizienz zu Ressourceneffektivität

Die Prinzipien des zirkulären Bauens sind aus der gegenwärtigen Nachhaltigkeitsdebatte im europäischen Kontext nicht mehr wegzudenken. Der Fokus verschiebt sich von der Energieeffizienz hin zur Ressourceneffektivität und impliziert ein neues Rahmenwerk für nachhaltige Innovationen in der gebauten Umwelt. Der häufig verwendete Begriff der Circular Economy beschreibt also ein neues System, in welchem der Verbrauch von nicht erneuerbaren Ressourcen konsequent von wirtschaftlichem Wachstum entkoppelt wird. Abfall ist in diesem regenerativen System nicht mehr vorgesehen. Ressourcen werden in technischen und biologischen Kreisläufen zirkuliert. Dieses Paradigma hat fundamentale Auswirkungen auf die Art, wie Gebäude, Quartiere und ganze Städte konzipiert, errichtet und betrieben werden. Circular Economy erweitert das klassische Verständnis von Nachhaltigkeit auch im Sinne gänzlich neuer Geschäftspraktiken und ist damit zum Ausgangspunkt für alle Akteurinnen und Akteure der Wertschöpfungskette Bau geworden, sowohl Gestaltungs- als auch Wertschöpfungsmodelle neu zu denken. Damit sind zumindest die Voraussetzungen für einen systemischen Wandel erfüllt – die Frage ist also nicht mehr, ob sich der Wandel vollzieht, sondern lediglich wann.

### 1 Globale Notwendigkeit und lokaler Kontext – zirkuläres Bauen im Überblick

#### 1.1 Circular Economy – ein fundamental neuer Ansatz

Die anhaltende globale Bevölkerungsentwicklung, die Urbanisierung und die wachsenden Mittelschichten bedingen einen nie dagewesenen Verbrauch von globalen Ressourcen. Im Kontext linearer und wachstumsorientierter Wirtschaftsmodelle werden somit der anthropogene Klimawandel und die Zerstörung von Ökosystemen ebenso gefördert wie die häufig einmalige Verwendung von nicht erneuerbaren Ressourcen. Dies trifft natürlich nicht ausschließlich auf die Bauindustrie zu, aufgrund des Ressourcendurchsatzes und der damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen ist der Handlungsdruck hier jedoch besonders groß.

Einen positiven Wandel verspricht die sog. Circular Economy. Diese zirkuläre Wirtschaft beschreibt ein System, in welchem Materialressourcen innerhalb geschlossener biolo-

gischer und technischer Kreisläufe zirkuliert werden können (Cradle-to-Cradle-Prinzip). So besteht die Möglichkeit, diese in verschiedenen Lebenszyklen effizient zu nutzen und (theoretisch) unendlich wiederzuverwenden.

In Bezug zur gebauten Umwelt müssen Gebäude, Systeme und Produkte also so gestaltet und hergestellt werden, dass die verwendeten Materialien nach dem Gebrauch weiterverwendet, nachgerüstet oder für andere Zwecke genutzt werden können (Bild 1). Nur so kann langfristig nachhaltiges Bauen und der damit verbundene Wandel zu einem regenerativen System ermöglicht werden. Stark vereinfacht ermöglicht die Kreislaufwirtschaft also die Entkopplung des (nachhaltigen) wirtschaftlichen Wachstums von dem Verbrauch von Ressourcen.

#### 1.2 Die politische Motivation der Circular Economy

Die Förderung der Kreislaufwirtschaft steht ganz oben auf der politischen Agenda der EU, da sie das Potenzial hat, die Auswirkungen auf Klima und Umwelt zu verringern und ein nachhaltiges Wirtschaftswachstum zu fördern. Die Europäische Kommission hat ihr Ziel angekündigt, Europa bis 2050 zu einer kohlenstoffneutralen und kreislauffähigen Wirtschaft zu machen. Der neue Fahrplan für die Kreislaufwirtschaft wurde im Frühjahr 2020 veröffentlicht.

Seit der Veröffentlichung des ersten EU-Aktionsplans zur Kreislaufwirtschaft im Jahr 2015 hat sich das Konzept weiterentwickelt und im Laufe der Jahre immer mehr an Bedeutung auf der EU-Agenda gewonnen. Sein Anwendungsbereich und Schwerpunkt erweitert sich von einer rein abfallwirtschaftlichen Perspektive hin zu einem globaleren, multisektoralen und sektorübergreifenden Ansatz.

Während die EU ihre neue Finanzierungsperspektive 2021–2027 in Angriff nimmt, müssen auch bspw. Infrastrukturprojekte, die jetzt geplant und entworfen werden, klimasicher und idealerweise als Teil einer Kreislaufwirtschaft geplant werden.

### 2 Circular Economy in der Praxis – ein Rahmenwerk für nachhaltige Innovation

Nun zur Realität – die Anwendung des Kreislaufwirtschaftsgedankens auf die gebaute Umwelt ist sehr komplex, teil-

## OUTLINE OF A CIRCULAR ECONOMY

### PRINCIPLE

# 1

Preserve and enhance natural capital by controlling finite stocks and balancing renewable resource flows  
ReSOLVE levers: regenerate, virtualise, exchange



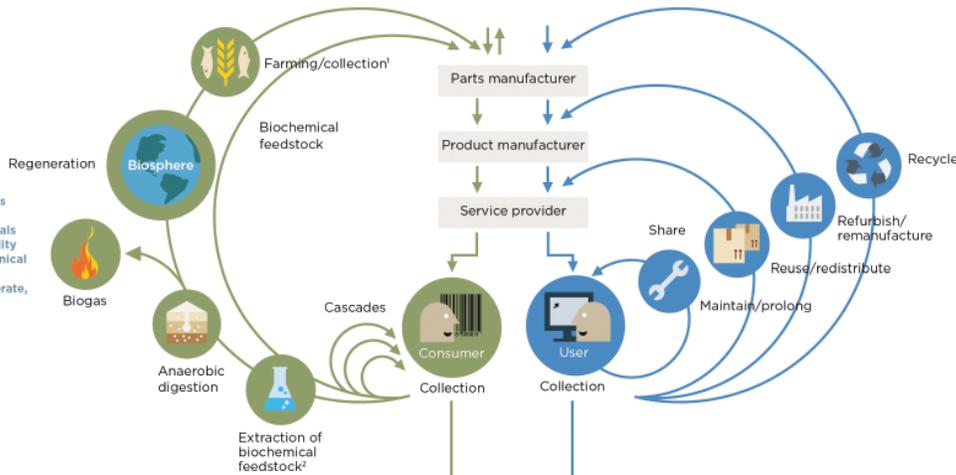
Renewables flow management

Stock management

### PRINCIPLE

# 2

Optimise resource yields by circulating products, components and materials in use at the highest utility at all times in both technical and biological cycles  
ReSOLVE levers: regenerate, share, optimise, loop



### PRINCIPLE

# 3

Foster system effectiveness by revealing and designing out negative externalities  
All ReSOLVE levers

Minimise systematic leakage and negative externalities

1. Hunting and fishing
2. Can take both post-harvest and post-consumer waste as an input

**Bild 1** Butterfly-Diagramm (Quelle: Ellen MacArthur Foundation).

weise mit Zielkonflikten behaftet und wird kurz- und mittelfristig immer auch pragmatische Kompromisse mit sich bringen. Es gibt jedoch zentrale Leitprinzipien, die einen regenerativen und restaurativen Ansatz für (Bau-)Systeme fördern.

Allen Prinzipien immanent, ist der Fokus auf Materialressourcen jedoch immer auch im Kontext des gesamten Ökosystems (Produkt, Gebäude, Stadt) und der assoziierten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu sehen – die Circular Economy stellt somit ein umfängliches Rahmenwerk für nachhaltige Innovation zur Verfügung.

## 2.1 Die wesentlichen Prinzipien und Konzepte der Circular Economy

### 2.1.1. Prinzip 1 – Materialreduktion und Erhalt wertvoller Materialressourcen

Die für das Bauen verwendeten Materialmengen aus nicht erneuerbaren Quellen müssen systematisch reduziert werden.

Hierzu zählt bspw. auch die Wiederverwendung oder Erneuerung von Bestandsbauten bzw. -infrastrukturen. In der Planungsrealität müssen Designteam also bereits in der Initialphase die Absicht und das Konzept eines Projekts drastisch hinterfragen.

Die Verwendung weiterer Ressourcen wie Wasser, Land oder fossiler Brennstoffe ist signifikant zu reduzieren. Die Prinzipien der Circular Economy beziehen also nicht nur Materialien, sondern immer auch das gesamte Ökosystem mit ein. So sind bspw. bereits erschlossene Grundstücke und Bauland jenen vorzuziehen, welche erst aufwendig erschlossen werden müssen.

### 2.1.2 Prinzip 2 – Design zur Vermeidung von Abfall

Abfall zu reduzieren bedeutet, bereits am Anfang der Wertschöpfungskette Bau anzusetzen und Systeme so zu konzipieren, dass die darin enthaltenen Ressourcen im gesamten Lebenszyklus wertvoll bleiben. Dies impliziert wichtige Designkonzepte wie Langlebigkeit, Adaptivität und Flexibilität

**Tab. 1** Zusammenfassung der Prinzipien einer zirkulären Bauwirtschaft (Quelle: EU Waste Hierarchy + Ellen MacArthur Foundation).

Priorität	Prinzip	Konzept
1	Materialreduktion und Erhalt wertvoller Materialressourcen (Suffizienz)	Minimierung der verwendeten Materialmengen Minimierung weiterer Ressourcen wie Land, Wasser oder Energie Bezug von Ressourcen aus ökologisch und sozial verantwortungsvollen Quellen
2	Design zur Vermeidung von Abfall	Design für Langlebigkeit Adaptivität/Flexibilität (siehe auch Mehrfachnutzung DGNB) Wiederverwendung (siehe auch DGNB) Werthaltigkeit Umnutzung Stoffliche Verwertung (siehe auch DGNB) Reduktion von Baustellenabfällen, Abbruch, Aushub und Abfällen aus dem Gebäudebetrieb
3	Nachhaltiges Abfallmanagement	Management von Abfällen aus Abbruch und Rückbau Management von Abfällen aus Aushüben Management von Baustellenabfällen Management von Abfällen aus dem Gebäudebetrieb

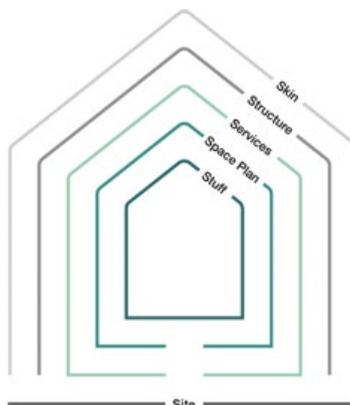
von Gebäuden und auf Systemebene die Fähigkeit zur verlustfreien Rückgewinnung und Wiederverwendung von Materialien sowie Mehrfachnutzung von Flächen. Wie viele Nutzungen lässt ein Gebäude in einem Lebenszyklus von bspw. 80 Jahren also zu? Wie schnell und regelmäßig können Teile des Gebäudes angepasst und umgewidmet werden und wie kann dadurch ein verfrühtes Lebenszyklusende vermieden werden?

Hierfür sind sorgfältige Designentscheidungen zu treffen. So sind bspw. die lichte Deckenhöhe sowie das Stützenraster in einem Bürogebäude ebenso entscheidend für eine möglichst flexible Nutzung wie das Haustechnikkonzept eines Gebäudes, welches ohne größere Eingriffe verschiedene Nutzungen ermöglicht. Diese Flexibilität kann weiterhin gestärkt werden, indem bspw. modulare Trennwandsysteme zum Einsatz kommen, welche permanente Nutzungsänderungen ermöglichen.

### 2.1.3 Prinzip 3 – Nachhaltiges Abfallmanagement

Nachdem der Verbrauch von Materialressourcen entweder vermieden oder aber zumindest reduziert werden konnte, stellt das letzte Prinzip das bestmögliche Management von Abfällen in den Vordergrund. Hierzu zählen sowohl Abfälle aus dem Abbruch und dem Rückbau als auch aus dem Bau und Betrieb von Gebäuden.

Baustellenabfälle geraten zunehmend in den Fokus. Hier sind insbesondere die Produzenten in der Verantwortung,



**Bild 2** 6S-Modell – Shearing Layers nach Stuart Brand (Quelle: Arup).

Verpackungsabfälle auf ein Mindestmaß zu reduzieren und etwaige Konfektionen auf der Baustelle so zu ermöglichen, dass dabei möglichst wenig Abfall entsteht.

Bei größeren Infrastrukturprojekten sind insbesondere Erdaushübe im Kontext der weiteren Verwendung kritisch zu überprüfen, sodass eine Deponierung vermieden werden kann. Hierfür müssen Planende zunehmend Strategien entwickeln und verfolgen, damit das Ziel einer maximalen Wiederverwendung erreicht werden kann.

### 2.2 Zusammenfassender Überblick und Hierarchie

Zusammenfassend sind die Prinzipien sowie damit verbundene Design- und Managementkonzepte in Tab. 1 darge-

## Leichtbau und der böse Bube Beton

Nachhaltigkeit ist in den Fokus des gesellschaftlichen Interesses gerückt, hat längst alle Branchen erreicht und ist fester Bestandteil des verantwortungsvollen Denkens und Handelns. So hat sich auch die Arbeit der Bauschaffenden verändert, indem in allen Prozessen Ressourceneinsparung und CO<sub>2</sub>-Minimierung berücksichtigt werden. Die Auswirkungen dieser Aspekte sind im Brückenbau und im Bauwesen allgemein erkennbar. Der meist verbaute Baustoff Beton steht wegen seines hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bei der Herstellung in der Kritik. Ihn zu verdammen kann nicht Teil der Lösung sein, da er als Multitalent viele Vorteile – wie Formbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Dauerhaftigkeit, Brandschutz und Schallschutz – besitzt. Wichtig ist es jetzt, mit dem „bösen Buben“ richtig umzugehen. Neuartiger Leichtbau mit Beton verspricht hier eine Antwort. Davon soll in diesem Beitrag die Rede sein.

### 1 Einleitung

Für das Bauen heute – und nicht erst in der Zukunft – ist die Nachhaltigkeit, also Ressourceneinsparung und geringer CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, längst im Bewusstsein der Planenden angekommen und hat deren Arbeitsweise schon jetzt maßgeblich beeinflusst. Eine Bewertung der Nachhaltigkeit von Bauwerken erfolgt objektiv, qualitativ und quantitativ nach ökonomischen, ökologischen und soziokulturellen Gesichtspunkten. Die Ziele des nachhaltigen Bauens liegen in der Minimierung des Verbrauchs von Energie und fossilen Ressourcen. Berücksichtigt werden dabei alle Lebenszyklusphasen eines Bauwerks. Dabei wird die Optimierung sämtlicher Einflussfaktoren auf den Lebenszyklus angestrebt: von der Wahl des Baustoffes, seiner Gewinnung über seinen Einsatz bis hin zu seinem Rückbau und seiner Wiederverwertung.

Der Leichtbau ermöglicht einen wertvollen Lösungsansatz, da durch reduzierten Materialeinsatz Ressourcen eingespart werden. Dies bedeutet eine Minimierung des Strukturgewichts, allerdings bei gleichbleibender Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Ziel des Leichtbaus ist es, die Art, Anzahl und Anordnung von Bauteilen zu optimieren und zudem eine maximale Ausnutzung der Eigenschaften der verwend-

ten Materialien zu erzielen. Dazu gehören einerseits die Lebensdauererhöhung von Konstruktionen und im Massivbau die Reduzierung der Betonmenge sowie das schrittweise Ersetzen von Stahl(-bewehrung) durch vorgespanntes Carbon. Dies führt zu einer Steigerung der Material- und Energieeffizienz im Vergleich zu den üblichen Bauweisen. Oft entstehen so schlanke und gestalterisch anspruchsvolle Strukturen, die zu mehr Baukultur beitragen und gleichzeitig zur Reduktion der Treibhausgasemissionen führen.

Der für den Hochbau so wichtige Gesichtspunkt der Bauphysik – insbesondere der Wärmedämmung – findet beim Leichtbau allerdings kaum Berücksichtigung. Der Energieverbrauch eines Gebäudes über den Lebenszyklus beinhaltet die Anteile aus Bau, Instandhaltung, Heizung und Kühlung, Beleuchtung, elektrischer Ausstattung sowie Rückbau. Da der Energieverbrauch aus Heizen und Kühlen den größten Anteil hat, wurde in Deutschland die Energieeinsparverordnung (EnEV) [1] eingeführt. Als Reaktion darauf haben Aspekte der Wärmedämmung nun nicht nur bei einem Neubau eine zunehmende Bedeutung bei der Planung, sondern auch bei der nachträglichen energetischen Sanierung.

Bei einer Gebäudehülle müssen die Anforderungen der EnEV erfüllt und ein geringer Energieverbrauch während der Nutzung sichergestellt werden. Darüber hinaus sollte der Baustoff aber auch während des gesamten Lebenszyklus kaum Kosten und CO<sub>2</sub> (aus Wartung, Reparatur, Sanierung etc.) produzieren und nach Ablauf der Lebenszeit auch umweltgerecht recycelbar sein. Im Hinblick auf den ökonomischen, ökologischen und soziokulturellen Nutzen bietet hierfür Infraleichtbeton (ILC, engl.: Infra-Lightweight Concrete) eine ernstzunehmende Alternative zu herkömmlichen Wärmedämmsystemen, denn ILC ist eine tragende Wärmedämmung, die monolithisches Bauen wieder ermöglicht und bei Nutzungsende nicht getrennt werden muss. Er verspricht eine einfache, dauerhafte und ästhetische Bauweise, solange wir noch auf eine Wärmedämmung im Bauwesen angewiesen sind. Denn mit erneuerbarer und CO<sub>2</sub>-neutraler Energie wird jede Wärmedämmung weniger wichtig.

Wie der Infraleichtbeton den Hochbau verbessern kann, so verspricht der Carbonbeton den Brückenbau zu verän-

dern, dessen Erforschung ebenfalls an der Technischen Universität Berlin erfolgt. Die dort gemachten Erfahrungen fließen stetig in das nachhaltige Bauen ein. Im Folgenden soll das Potenzial von ILC und vorgespanntem Carbonbeton aufgezeigt werden, indem in den nächsten Abschnitten verschiedene Einsatzmöglichkeiten von diesen gezeigt werden.

## 2 Wohngebäude aus Infraleichtbeton

Betone sind in verschiedensten Ausführungen herstellbar. Dabei kommt es immer auf den Anwendungsbereich an. Im Brückenbau werden eher hochfeste Betone benötigt, während im konstruktiven Wasserbau sehr dichte Betone verwendet werden. Für den Hochbau ist es hingegen wichtig, für die Nutzer nicht nur eine raumbegrenzende Gebäudehülle zu schaffen, sondern auch vor Umwelteinflüssen wie extremen Temperaturen, Wind und Niederschlag sowie vor Schadstoffen und Lärm zu schützen. Für alle Betone gilt jedoch, möglichst dauerhaft, kostengünstig und mittlerweile auch besonders nachhaltig und umweltfreundlich zu sein. Infraleichtbeton besitzt das Potenzial, allen – teilweise widersprüchlichen – Anforderungen gerecht zu werden, und er wurde in den letzten 15 Jahren von der TU Berlin entsprechend auf den Prüfstand gestellt.

Infraleichtbeton wiegt weniger als normativ erfasste Leichtbetone, die gemäß Eurocode 2 [2] ein spezifisches Gewicht von 800 bis 2000 kg/m<sup>3</sup> haben, was zu einer für Beton sehr geringen Wärmeleitfähigkeit führt. Bei Druckfestigkeiten im Bereich eines gegelten LC8/9 ist ILC im Hochbau

sehr gut anwendbar. Ein Forschungsvorhaben zum Potenzial im Geschosswohnungsbau (namens INBIG), erarbeitet von Ingenieuren, Architekten und Partnern aus der Industrie, zeigte 2016 die Vorteile gegenüber konventionellen geschichteten Wandaufbauten [3]. Durch eine monolithische Bauweise kann ILC als tragende Wärmedämmung Bauprozesse vereinfachen, er ist weniger anfällig für Ausführungsfehler, langlebiger und rezyklierbar. Durch seine poröse Struktur ist ILC diffusionsoffen, fördert die Raumbehaglichkeit und kann sogar durch den viel schnelleren Carbonatisierungsprozess CO<sub>2</sub> aus der Luft aufnehmen. Kehrseite hierzu ist, dass eine nichtrostende Bewehrung nötig wird.

Bereits 2007 wurde das erste Einfamilienhaus aus Infraleichtbeton gebaut (Bild 1). Die Außenwände wurden mit Bewehrung aus Glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und die Oberfläche mit einer Hydrophobierung versehen. Das Gebäude besteht im Kern aus Normalbeton, einem Leichtbetondach und einer 50 cm starken Gebäudehülle aus ILC. Die damalige ILC-Rezeptur [4] erreichte eine mittlere Druckfestigkeit von  $f_{ilcm} = 7,8$  MPa bei einer Trockenrohdichte von 760 kg/m<sup>3</sup> und einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{10^\circ, tr} = 0,18$  W/(m·K). Das Wohnhaus hat sich in jeder Beziehung bewährt: In puncto Dauerhaftigkeit, Wärmeschutz, Schallschutz und Raumklima gibt es nur Zustimmung.

Ein weiterer Vorteil des Materials liegt darin, dass in der Gebäudehülle auftretende Versprünge, Loggien, Balkone und Flachdächer in unterschiedlichen Ebenen thermisch vom Kern nicht mehr entkoppelt werden müssen. Das vereinfacht die Planung und Ausführung enorm, ermöglicht



Bild 1 Wohnhaus in Berlin-Pankow, 2007 (Quelle: TU Berlin).



**Bild 2** Ruppiner Landhaus aus Infralichtbeton (Architekten: Besonias Almeida Arquitectos (Buenos Aires)).

wieder komplexe Sichtbetonstrukturen und führt weg von der allorts einheitlichen Architektur mit Wärmedämmverbundsystemen (WDVS). Davon profitiert der Entwurf der argentinischen Architekten Besonias Almeida Arquitectos des rund 60 Kilometer nördlich von Berlin entstehenden Wohnhauses aus Infralichtbeton (Bild 2). Die Gebäudekubatur resultiert aus unterschiedlich dimensionierten, verschachtelten ein- und zweigeschossigen Betonkörpern. Architekt Clemens Bonnen überführte den Entwurf des Gebäudes, welches voraussichtlich 2021 fertiggestellt wird, in die Ausführungsphase. Zur Einhaltung der EnEV [5] werden für die Außenwände ein ILC8-D0,70 sowie in Übergangsbereichen ein LC16/18 und ein C25/30 im Kern verwendet.

### 3 Öffentliche Gebäude aus Infralichtbeton

In Berlin-Lichtenberg wurde 2018 die eingeschossige „Beton-oase“ (Bild 3) als Familienzentrum und Jugendfreizeiteinrichtung fertiggestellt. Der für die 50 cm starken Außenwände und Vordächer verwendete ILC8-D0,70 konnte die Forderungen nach EnEV [5] einhalten. Erstmals wurden mit dem Einsatz von Balken und Dächern aus Infralichtbeton die entwickelten Bemessungsgrundlagen [6] in die Praxis überführt und im Rahmen der Zustimmung im Einzelfall (ZiE) die Bemessungsansätze durch experimentelle Untersuchungen an 1:1-Prüfkörpern bestätigt. Die weitestgehend porrenfreie Oberfläche ermöglicht ein wasserabführendes Vlies auf der Schalung. Eine verzinkte Bewehrung und abschlie-



**Bild 3** Jugendfreizeiteinrichtung Beton-oase Berlin-Lichtenberg, 2018 (Quelle: Gruber + Popp Architekten, Foto: Alexander Blumhoff).

ßende Hydrophobierung der Oberflächen stellen die Dauerhaftigkeit der Wände sicher.

Der Anwendungsbereich von ILC soll mit dem in Bild 4 gezeigten Pilotprojekt im Gewerbebau maßgeblich erweitert werden. Erstmals werden im Rahmen einer weiteren Zustimmung im Einzelfall für die bis zu 9,00 m hohen und 40 cm starken Außenwände aus ILC8-D0,70 Brandwandversuche durchgeführt, wobei auch das Abplatzverhalten an der beflamten Oberfläche untersucht wird. Das nachhaltige Gebäudekonzept beinhaltet auch eine weitspannende Dachkonstruktion aus Leimholzbindern. Die Bauweise einer monolithischen Gebäudehülle aus tragender Wärmedämmung in Sichtbetonqualität soll auf zukünftige Bauwerke dieses Gebäudetyps übertragen werden.

## Was jeder im Bauwesen über Ökobilanzen wissen sollte

Die Ökobilanzierung (engl. *Life-Cycle Assessment*, LCA) hat sich in den letzten Jahrzehnten als eines der wichtigsten Hilfsmittel bei der ökologisch orientierten Planung von Bauwerken etabliert und wird in Zukunft eine noch wichtigere Rolle spielen. Als wissenschaftlich fundiertes Werkzeug erlaubt sie eine umfassende Bewertung und damit Optimierung der Umweltwirkungen. Dieser Artikel vermittelt praxisorientiertes Grundlagenwissen, um allen am Bau Beteiligten, vom Architekten über den Bauingenieur bis zu den Gewerken, ein Verständnis von Ökobilanzen – ihres Potenzials, aber auch ihrer Grenzen – zu ermöglichen.

### 1 Warum dieser Artikel?

Jeder von uns kann sich unter der Bilanz einer Firma etwas vorstellen und jeder von uns glaubt, die zentralen Aussagen zu verstehen: Viel Gewinn ist besser als weniger Gewinn. Viel mehr können wir als Nicht-Finanzspezialisten normalerweise nicht aus einer Bilanz herauslesen. Dabei braucht es gar nicht viel zusätzliches Rüstzeug, um weitere wichtige Schlüsse aus einer Bilanz ziehen zu können. Ist der Gewinn wohl eher nachhaltig oder beruht die beeindruckende momentane Profitabilität nur darauf, dass der Maschinenpark auf Verschleiß gefahren wird, zu wenig in Innovationen investiert wird oder Produkte auf Halde produziert werden?

Ähnlich verhält es sich mit Ökobilanzen. Jeder kann sich intuitiv vorstellen, was eine Ökobilanz ist. Und ähnlich wie bei der Gewinn-und-Verlust-Rechnung eines Unternehmens

stecken hinter den plakativen Endergebnissen oft vielfältige Zusatzinformationen, die man sich mit einigen methodischen Grundlagen erarbeiten kann. Die Belohnung ist ein deutlicher Erkenntnisgewinn, denn es geht bei Ökobilanzen um viel mehr als die vordergründig oft dominierende Frage, ob Lösung A ökologisch besser ist als Lösung B.

Die Ökobilanzierung hat sich im Baubereich als ein Standardwerkzeug zur Quantifizierung und Bewertung von Umweltauswirkungen etabliert und jeder Planer oder Ausführende sollte sich deshalb mit dem minimalen Rüstzeug auseinandergesetzt haben, das wir in diesem Artikel zu vermitteln versuchen.

### 2 Was ist eine Ökobilanz?

#### 2.1 Die wesentlichen Charakteristika der Ökobilanzierung

Bei der Ökobilanzierung wird die traditionelle Betrachtung der Umweltwirkungen von Produkten oder Prozessen in zwei Dimensionen erweitert:

1. Die Ökobilanzierung umfasst idealerweise den gesamten Lebenszyklus von der Gewinnung der Rohstoffe bis zur Entsorgung bzw. der Vorbereitung für eine wie auch immer geartete Wiederverwertung.
2. Bei der Ökobilanzierung werden alle relevanten Umweltwirkungen (soweit sie quantifizierbar sind) betrachtet.

Auf diese Weise erlauben Ökobilanzen eine sehr umfassende und gründliche Untersuchung.

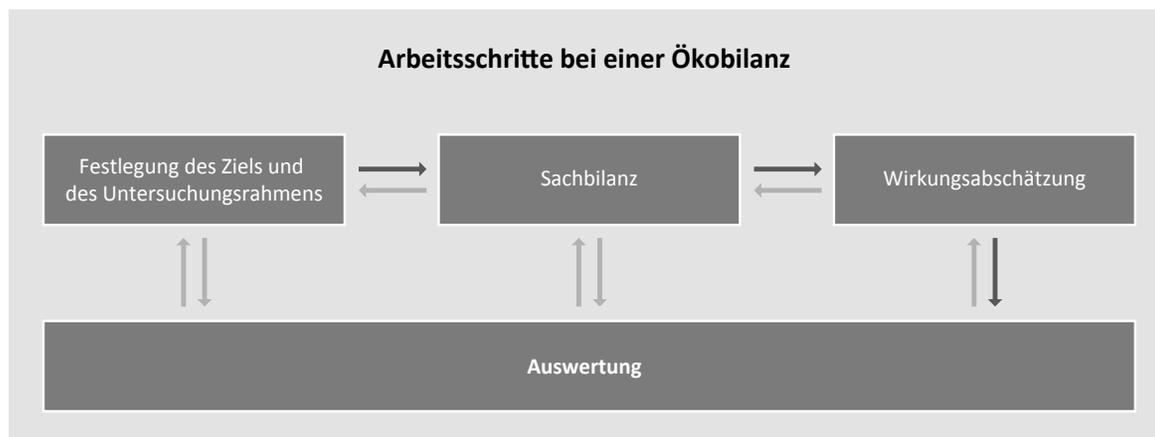


Bild 1 Arbeitsschritte bei einer Ökobilanz (Quelle: ISO 14040 [1]).

Die Erstellung einer Ökobilanz erfolgt in mehreren Arbeitsschritten, wobei sich die Systematik der ISO 14040 [1], wie sie in Bild 1 dargestellt ist, international durchgesetzt hat. In einem ersten Schritt werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen festgelegt; dazu gehört z. B. die Festlegung des Untersuchungsgegenstands. Im nächsten Schritt wird die sogenannte Sachbilanz erstellt; hierzu werden alle Material- und Energieflüsse entlang der betrachteten Wertschöpfungskette bilanziert. Man erhält dadurch ein vollständiges Bild der durch einen Prozess unmittelbar oder mittelbar ausgelösten Emissionen und Ressourcenverbräuche. Allerdings umfasst diese Sachbilanz normalerweise mehrere hundert Einträge. Sie wird daher im nächsten Schritt, der sogenannten Wirkungsabschätzung, auf typischerweise fünf bis 20 Kennzahlen verdichtet, die dann im letzten Schritt, der Auswertung, interpretiert werden. Die Anordnung der Schritte in der Grafik sowie die Pfeile deuten dabei an, dass es sich

hier nicht unbedingt um einen linearen Prozess handelt. So können z. B. Ergebnisse einer ersten Auswertung eine Änderung des Untersuchungsgegenstands oder die Erhebung zusätzlicher Sachbilanzdaten auslösen.

### 2.2 Phasen und Module des Lebenszyklus

Bei der Beschreibung des Lebenszyklus benutzt man im Bereich von Gebäuden und Bauprodukten normalerweise die in der Norm EN 15978 [2] definierten Phasen A bis D, welche wiederum in Module unterteilt werden (siehe Bild 2). Dabei beschreiben die unter A zusammengefassten Module die Herstellung der Bauprodukte sowie die Errichtung des Gebäudes, die Aktivitäten unter B die Nutzung und die unter C die Entsorgung. Das Modul D beinhaltet Effekte, die per Definition außerhalb des eigentlichen Lebenszyklus des Gebäudes liegen, für die Bewertung aber trotzdem relevant sein können.

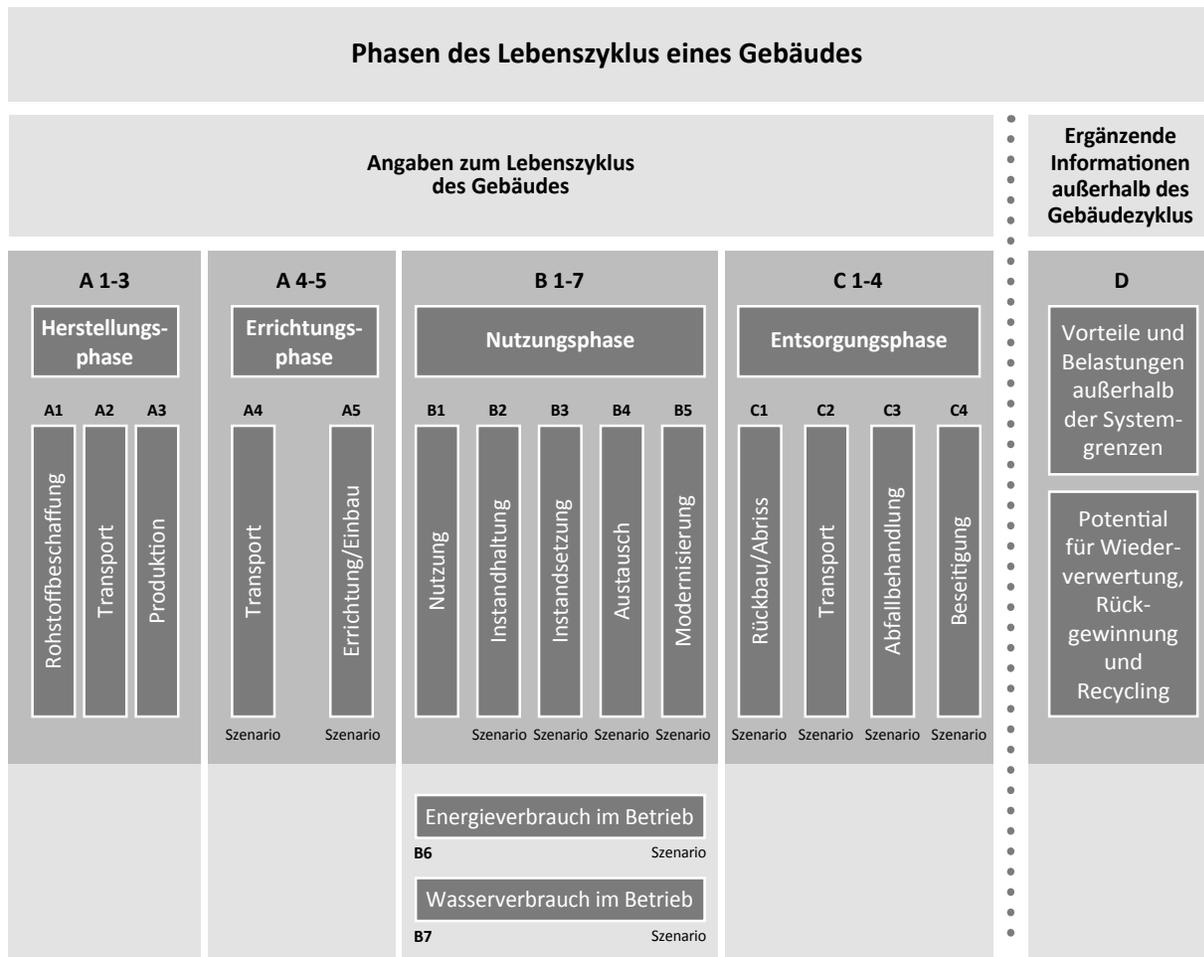


Bild 2 Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes (Quelle: EN 15978 [2]).

Im Einzelnen beinhalten die Phasen und Module folgende Prozesse:

**Herstellungsphase (A1–A3):** Die Herstellungsphase deckt alle Prozesse „von der Wiege bis zum Verlassen des Werkgeländes“ ab. Dabei beinhaltet A3 die Prozesse beim eigentlichen Hersteller des beschriebenen Produkts, während A2 den Transport aller direkten Vorprodukte zum Hersteller und A1 die gesamte Wertschöpfungskette der direkten Vorprodukte beschreiben.

**Errichtungsphase (A4 und A5):** Hierzu zählen der Transport des Bauproduktes vom Werk zur Baustelle (A4) sowie die Errichtung bzw. der Einbau der Bauprodukte (A5), also im Wesentlichen die Prozesse auf der Baustelle.

**Nutzungsphase (B1–B7):** Das Modul der Nutzung (B1) beschreibt die Effekte der Nutzung von Gebäuden, die nicht in den anderen Modulen abgebildet werden, wie z. B. Ausgasungen oder Auswaschungen. Die Module Instandhaltung (B2), Instandsetzung (B3), Austausch (B4) und Modernisierung (B5) beschreiben alle Arbeiten, die notwendig sind, um das Gebäude funktionsfähig zu halten. Die Grenzen zwischen den einzelnen Modulen sind dabei fließend – was so lange kein Problem ist, wie Nicht- und Doppelzählungen vermieden werden. Der Energieverbrauch im Betrieb (B6) umfasst neben der Heizung, Kühlung, Warmwasserbereitung und Be- und Entlüftung auch die Beleuchtung sowie ggf. die Überwachung, Automatisierung und gebäudeinterne Transporte (z. B. Aufzüge, Rolltreppen), nicht jedoch den Energieverbrauch von Hausgeräten, Unterhaltungselektronik und gewerblichen oder industriellen Maschinen (z. B. Werkzeugen).

**Entsorgungsphase (C1–C4):** Hierzu gehören die Module C1 Rückbau/Abriss, C2 Transport, C3 Abfallbehandlung und C4 Beseitigung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in das Modul C3 explizit die Aufwendungen zwecks Wiederverwendung, Rückgewinnung oder Recycling fallen.

**Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenzen (D):** Hierzu gehören mögliche Reduktionen zukünftiger Umweltbelastungen durch Recycling als wohl momentan häufigster Anwendungsfall, aber z. B. auch der Export von im Gebäude generierter Energie.

Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Phasen und Module des Lebenszyklus ist zu beachten, dass diese im Allgemeinen einen sehr unterschiedlichen Beitrag zur Ökobilanz eines Gebäudes leisten. So dominiert – gerade bei älteren Gebäuden – das Modul B6 Energieverbrauch im Betrieb

wichtige Kategorien der Ökobilanz (genauer: die Energie- und Treibhausgasbilanz). Bei energetisch optimierten Gebäuden oder bestimmten Umweltwirkungen, wie z. B. dem Wasserverbrauch oder dem Abfallaufkommen, stellt sich die Situation oft anders dar und die Auswirkungen werden gerade nicht durch die Nutzung, sondern durch die Errichtung des Gebäudes dominiert. Es ist die Stärke der Ökobilanz, hier für verschiedene Anwendungsfälle und Umweltwirkungen alle Bereiche abzuklopfen, um Erkenntnisse zu gewinnen und Problemverlagerungen zu vermeiden.

Auch ist zu berücksichtigen, dass sich hinter den einzelnen Modulen oft umfangreiche Wertschöpfungsketten verbergen. Beispielsweise beinhaltet das Modul A1 Rohstoffbeschaffung bei der Herstellung eines Stahlträgers alle Prozesse von der Gewinnung des Eisenerzes über dessen Pelletierung, die Roheisenherstellung, die Weiterverarbeitung zum Stahl bis zur Herstellung von Halbzeugen, wobei die unterschiedlichen Prozessschritte zum Teil noch detaillierter analysiert und auch die Transportprozesse bilanziert werden. Ähnliche Untersuchungen sind für die anderen eingesetzten Materialien wie Energieträger, Reduktionsmittel (Koks) oder Legierungsbestandteile nötig.

In der täglichen Arbeit wird dieser Prozess durch Datenbanken unterstützt, die die benötigten Daten für eine Vielzahl von Produkten und Prozessen zur Verfügung stellen.

### 2.3 Wirkungskategorien

Wie bereits erwähnt, werden in einer Ökobilanz fast alle quantifizierbaren Umweltauswirkungen systematisch erfasst und dann in vergleichsweise wenigen Wirkungskategorien zusammengefasst.

Das Beispiel des Klimawandels verdeutlicht dies: Wenn Treibhausgase wie CO<sub>2</sub> oder Methan in die Luft emittiert werden, führt dies über einen verstärkten Treibhauseffekt zu einer Erwärmung der Erdatmosphäre, die wiederum über vielfältige Folgen wie Anstieg des Meeresspiegels, veränderte Niederschlagsmuster usw. zu Schäden wie Verlust von Lebensraum in Küstennähe oder Ernteausfällen führen kann. Der potenzielle Beitrag zur Erderwärmung wird bestimmt, indem man alle Emissionen von Treibhausgasen auf äquivalente Mengen der Leitsubstanz CO<sub>2</sub> umrechnet.

Dieses Prinzip wird bei den meisten der gängigen Wirkungskategorien angewandt. Die wichtigsten Wirkungskategorien, wie sie gemäß EN 15804 [3] für Bauprodukte verwendet werden, finden sich in Tabelle 1.

## Wiederverwendung im Stahlbau und Metalleichtbau in Europa

Die Umsetzung der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft im Bausektor hat großen Einfluss auf die globalen klimapolitischen Ziele und besitzt großes Potenzial, die Umweltauswirkungen der Herstellung von Bauprodukten und die Abhängigkeit von nicht erneuerbaren natürlichen Ressourcen zu reduzieren. Der Stahlbau und der Metalleichtbau nehmen hierbei eine besondere Rolle ein, da sich Baukonstruktionen aus Metall nicht nur für das Recycling, sondern auch für die Wiederverwendung sehr gut eignen. Im Rahmen des Forschungsprojekts „PROGRESS – PROvisions for Greater REuse of Steel Structures“ hat sich ein europäisches Forschungskonsortium mit diesem Thema beschäftigt und Methoden und Lösungen entwickelt, welche die Wiederverwendung der verschiedenen Komponenten eingeschossiger Gebäude in Stahlbauweise ermöglichen. Der vorliegende Beitrag fasst die Ergebnisse des Projekts PROGRESS zusammen und gibt einen Überblick über europäische Aktivitäten im Bereich der Wiederverwendung im Stahl- und Metalleichtbau. Es werden sowohl der Rückbau und die Wiederverwendung bestehender Gebäude betrachtet als auch die Frage, wie neue Gebäude entworfen, gebaut und dokumentiert werden können, um eine künftige Wiederverwendung zu ermöglichen.

### 1 Allgemeines

Sowohl bei der Herstellung von Bauprodukten als auch beim Bau und beim Abriss von Gebäuden entstehen große Mengen an Abfall. Laut Eurostat waren die Bau- und Abbruchaktivitäten in Europa im Jahr 2018 für 36 % des Feststoffabfallaufkommens verantwortlich [1]. Darüber hinaus verbraucht der Bausektor jedes Jahr etwa die Hälfte aller in Europa gewonnenen natürlichen Ressourcen, wobei für die Umwandlung in Bauprodukte ein sehr hoher Energiebedarf besteht. Es wird geschätzt, dass 40–50 % aller gewonnenen Rohstoffe in Bauprodukte umgewandelt werden [2]. Der Großteil der Energie wird in den ersten drei Stufen des Produktionsprozesses verbraucht: Ressourcenabbau, Rohstoffgewinnung und Fertigung von Halbzeugen. Als wichtige Bauart hat der Stahlbau ein sehr hohes Potenzial, um zur Steigerung der Ressourcen-

effizienz im Bausektor beizutragen, da sich der Werkstoff Stahl besonders für das Recycling und Bauteile aus Stahl für die Wiederverwendung eignen.

Innerhalb des Stahlbausektors machen eingeschossige hallenartige Gebäude in Stahlbauweise einen großen Teil des Marktes aus. Zudem besitzen die Tragwerke dieser Gebäude i. d. R. große Spannweiten und befinden sich leicht zugänglich in sicheren Arbeitshöhen. Da diese Gebäude das größte Potenzial für eine Wiederverwendung besitzen, standen sie im Fokus des europäischen RFCS-Forschungsvorhabens „PROGRESS – PROvisions for Greater REuse of Steel Structures“, welches durch den Research Fund for Coal and Steel der Europäischen Kommission [3] mitfinanziert wurde.

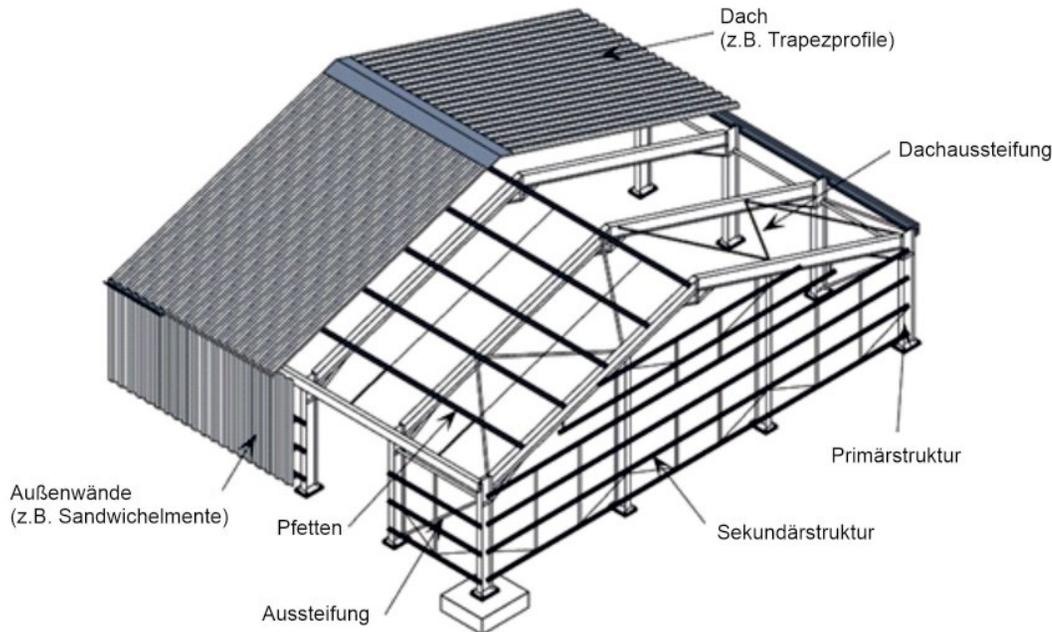
Das Hauptziel des Projekts war die Entwicklung von Methoden und Lösungen, welche die Wiederverwendung verschiedener Komponenten von eingeschossigen Gebäuden in Stahlbauweise ermöglichen. Das Projekt befasste sich sowohl mit dem Rückbau und der Wiederverwendung bestehender Gebäude als auch mit der Frage, wie neue Gebäude entworfen, gebaut und dokumentiert werden können, um eine künftige Wiederverwendung zu erleichtern. Dabei wurden sowohl Primär- (Rahmen) und Sekundärstrukturen als auch die Gebäudehülle betrachtet (Bild 1).

Das Hauptziel der Wiederverwendung besteht darin, den Kreislauf der Material- und Produktströme zu schließen und geeignete Bedingungen für die Umsetzung des Kreislaufwirtschaftsprinzips im Bausektor zu schaffen. Der Lebenszyklus eines Bauprodukts ist durch mehrere Phasen gekennzeichnet:

- A: Produkt- und Bauphase
- B: Nutzungsphase
- C: End-of-Life-Szenario
- D: Wiederverwendung, Wiederverwertung und Recycling

In diesem Zusammenhang mangelt es an klaren Definitionen in Bezug auf Wiederverwendung, Wiederverwertung und Recycling. Deshalb wurden im Rahmen des Projekts die folgenden Definitionen festgelegt:

- Wiederverwertung (Recovery) ist jeder Vorgang, dessen Hauptergebnis Abfall ist, der einem nützlichen Zweck dient, indem er andere Materialien ersetzt, die sonst zur



**Bild 1** Grundlegende Komponenten von eingeschossigen hallenartigen Gebäuden in Stahlbauweise [3]

Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder Abfall, der zur Erfüllung dieser Funktion vorbereitet wird.

- Recycling (Recycling) von Stahl beinhaltet das Wiedereinschmelzen von Schrott zu neuen Halbfertigprodukten. Dieser Vorgang ist weniger energieintensiv als die Stahlherstellung aus Eisenerz, stellt aber dennoch einen erheblichen Energieaufwand dar. Typischerweise erzeugen Elektrolichtbogenöfen, die beim Recycling eingesetzt werden, etwa 25 % der Treibhausgasemissionen, die bei der Stahlherstellung aus Eisenerz über die Hochofenroute entstehen.
- Wiederverwendung (Reuse) ist definiert als die abermalige Verwendung eines Produkts oder einer Komponente nach der ersten Lebensdauer. Dabei werden an dem Produkt oder der Komponente nur notwendige und geringfügige Veränderungen vorgenommen, wobei eine ähnliche (oder dieselbe) Form beibehalten wird.

Wie in Bild 2 dargestellt, lassen sich je nach Grad der Demontage mehrere grundlegende Fälle der Wiederverwendung von Komponenten im Bauwesen erkennen:

- $D_0$ : Wiederverwendung des gesamten Primärtragwerks
- $D_1$ : Wiederverwendung der demontierten Stahlkonstruktion (z. B. Stahlfachwerkträger)

- $D_2$ : Wiederverwendung der gefertigten Komponenten (z. B. Sandwichelemente, Stützen etc.)
- $D_3$ : Wiederverwendung einzelner Bauteile (z. B. Stahlprofile)

Unter den Gesichtspunkten des Rückbaus und des Transports sind mehrere Szenarien möglich (Tab. 1):

- $D_A$ : In-situ-Wiederverwendung ohne Demontage
- $D_B$ : Wiederverwendung am selben Standort in der gleichen Konfiguration
- $D_C$ : Wiederverwendung am selben Standort in anderer Konfiguration
- $D_D$ : Wiederverwendung an einem anderen Standort in der gleichen Konfiguration
- $D_E$ : Wiederverwendung an einem anderen Standort in anderer Konfiguration

Im Falle der In-situ-Wiederverwendung ( $D_A$ ) werden die Komponenten nicht demontiert und bleiben mit dem Primärtragwerk verbunden. Sie können repariert, verstärkt oder beschichtet werden, um ihre Demontage und ihren Austausch zu vermeiden. Dabei müssen die Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit erneut nach den geltenden Vorschriften geführt werden. Die Wiederverwendung des gesamten Primärtragwerks ist ein typisches Szenario einer In-situ-Wiederverwendung.

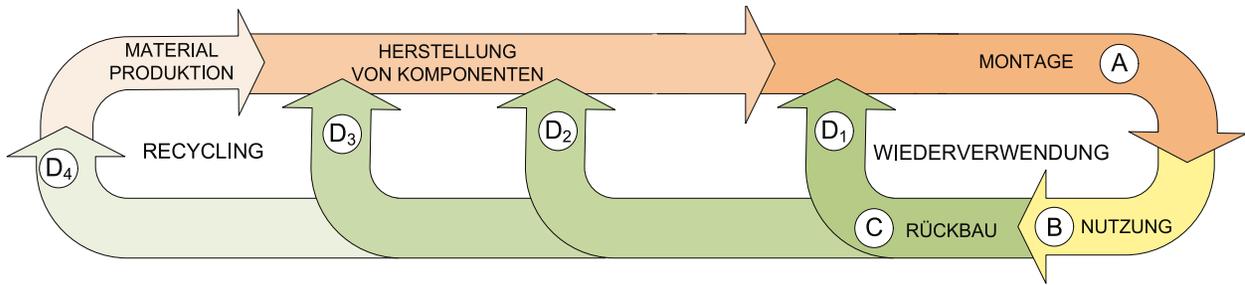


Bild 2 Wiederverwendungsszenarien im Lebenszyklus von Stahlkonstruktionen [3]

Tab. 1 Klassifikation von Wiederverwendungsszenarien [3]

	In-situ-Wiederverwendung	Wiederverwendung			
		am selben Standort		an anderem Standort	
		in gleicher Konfiguration <sup>1</sup>	in anderer Konfiguration	in gleicher Konfiguration	in anderer Konfiguration
Gesamtes Stahltragwerk	D <sub>0-A</sub>	–	–	D <sub>0-D</sub>	–
Demontierte Stahlkonstruktion	–	D <sub>1-B</sub>	D <sub>1-C</sub>	D <sub>1-D</sub>	D <sub>1-E</sub>
Gefertigte Komponenten	–	D <sub>2-B</sub>	D <sub>2-C</sub>	D <sub>2-D</sub>	D <sub>2-E</sub>
Einzelne Bauteile	–	D <sub>3-B</sub>	D <sub>3-C</sub>	D <sub>3-D</sub>	D <sub>3-E</sub>

<sup>1</sup> Dieses Szenario ist unwahrscheinlich, da das Bauwerk im Falle eines Rückbaus in genau der gleichen Konfiguration am selben Ort wieder aufgebaut würde.

## 2 Beispiele für Wiederverwendung im Stahlbau

Die Beispiele in Tab. 2 zeigen Projekte, bei denen Stahlkonstruktionen und Stahlbaukomponenten aus bestehenden eingeschossigen Gebäuden entfernt und entweder bei der Sanierung oder bei Neubauten wiederverwendet wurden [3].

Die Beispiele zeigen, dass die Wiederverwendung der alten Stahlkonstruktion effizienter sein kann als der Entwurf und die Errichtung einer neuen Stahlkonstruktion mit denselben Abmessungen und derselben Funktionalität. In den meisten der untersuchten Fälle wurde die gesamte Primärstruktur wiederverwendet (Wiederverwendungsgrad 80–100 %). Der Demontage- und der Wiederverwendungsprozess werden durch die Verwendung von Schrauben als Verbindungsmittel und die Verfügbarkeit von detaillierten Projektinformationen (einschließlich der Zertifikate für Stahlprodukte) erleichtert. In diesem Fall müssen die mechanischen Eigenschaften des Stahls nicht durch Tests bestimmt werden, was den Entwurfsprozess beschleunigt. Eine Herausforderung bei der Wiederverwendung alter Stahlstrukturen ist die Anpassung des Gebäudes an neue funktionale Anforderungen.

## 3 Abfall- und Produktstatus von wiederverwendeten Komponenten

Zur Interpretation des Abfall- und Produktstatus wurde neben einer Literaturstudie auch eine Umfrage bei den Behörden und Akteuren in Großbritannien, Deutschland, Dänemark, Österreich, den Niederlanden und der Region Flandern in Belgien durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Umfragen wurden Empfehlungen für die Interpretation des Abfall- oder Produktstatus von wiederzuverwendenden Komponenten erarbeitet.

Das dabei entstandene empfohlene Verfahren stellt sicher, dass das wiederverwendete Produkt in der Lage ist, die allgemeinen Kriterien der Richtlinie des europäischen Parlaments und Rats [4] zu erfüllen, und eine Qualität aufweist, die den Anforderungen der einschlägigen Bauvorschriften entspricht. Dabei ist es von wesentlicher Bedeutung, dass durch die Umsetzung dieses Verfahrens keine unnötigen Hindernisse für die Wiederverwendung entstehen und der bestehende Handel mit wiederverwendbaren Produkten nicht eingeschränkt wird. Deshalb wurde das Verfahren so