



**Bundesinstitut  
für Bau-, Stadt- und  
Raumforschung**

im Bundesamt für Bauwesen  
und Raumordnung



BBSR-Online-Publikation Nr. 17/2020

## **Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland**

Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds  
„Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt

Das Projekt des Forschungsprogramms „Zukunft Bau“ wurde vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI) durchgeführt.

ISSN 1868-0097

## IMPRESSUM

### **Herausgeber**

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### **Wissenschaftliche Begleitung**

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat II 5 – Nachhaltiges Bauen  
Merten Welsch (Projektleitung)  
merten.welsch@bbr.bund.de  
mit Unterstützung durch  
Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lützkendorf

### **Auftragnehmer**

treeze Ltd., fair life cycle thinking, CH-8610 Uster  
Livia Ramseier, Rolf Frischknecht  
info@treeze.ch

### **Stand**

Dezember 2020

### **Vervielfältigung**

Alle Rechte vorbehalten

Die vom Auftragnehmer vertretene Auffassung ist nicht unbedingt mit der des Herausgebers identisch.

### **Zitierweise**

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.): Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland. Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt. BBSR-Online-Publikation 17/2020, Bonn, Dezember 2020.



Liebe Leserinnen und Leser,

aus dem Bereich der Klimaforschung liegen seit vielen Jahren Erkenntnisse zur globalen Klimaerwärmung vor. Die Bundesregierung hat sich daher das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität zu erreichen.

Für den Gebäudebereich unterstützt das BBSR die entsprechenden politischen Ziele des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat mit konkreten Vorschlägen für Methoden, Anforderungsniveaus, Umsetzungsempfehlungen und Arbeitshilfen. Hierzu zählt unter anderem auch die vorliegende Studie „Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland – Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds ‚Errichtung und Nutzung von Hochbauten‘ auf Klima und Umwelt“.

Darin werden erstmalig in einer sektorübergreifenden Betrachtung die Gesamtanteile an Treibhausgasemissionen in Deutschland bilanziert, die aus der Herstellung, Errichtung, Modernisierung und durch die Nutzung und den Betrieb von Wohn- und Nichtwohngebäuden einschließlich vor- und nachgelagerter Prozesse entstehen. Mit 362 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten entfällt auf den Gebäudebereich ein Anteil von rund 40 %.

Die Forschungsergebnisse unterstreichen damit die herausgehobene Bedeutung des Gebäudebereiches und können somit die Diskussion unterstützen, mit welchen Maßnahmen in welchen Bereichen die deutlichsten Fortschritte erzielt werden können. Darüber hinaus lassen sich mit den Ergebnissen Grundlagen definieren für eine kontinuierliche Erfassung und Auswertung der Treibhausgasemissionen im Handlungsfeld Gebäude, beispielsweise durch ergänzte Erhebungen über das Statistische Bundesamt.

Ich wünsche Ihnen eine aufschlussreiche Lektüre.

A handwritten signature in black ink that reads "Markus Eltges". The signature is written in a cursive, flowing style.

Dr. Markus Eltges

Leiter des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)

# Inhalt

1	EINFÜHRUNG	3
1.1	Ausgangslage und Zielsetzung	3
1.2	Struktur des Berichtes	4
2	METHODIK UND DATENGRUNDLAGE	5
2.1	Übersicht	5
2.2	Berechnung von Umweltfußabdrücken	5
2.3	Datengrundlagen	8
2.3.1	Multiregionale Input-Output-Tabelle – Exiobase Version 3.4	8
2.3.2	Nutzung und Betrieb	9
2.4	Umweltauswirkungen	11
2.4.1	Treibhausgasemissionen	11
2.4.2	Luftbelastung mit Feinstaub (Luftverschmutzung)	11
2.4.3	Marine Eutrophierung	11
2.4.4	Wassernutzung	12
2.4.5	Biodiversitätsverluste	12
2.5	Planetare Grenzen	12
3	ERGEBNISSE	14
3.1	Überblick	14
3.2	Umweltauswirkungen des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten»	14
3.3	THG-Fußabdruck des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten»	16
3.3.1	Vergleich mit den Handlungsfeldern des Klimaschutzplans 2050	16
3.3.2	THG-Emissionen aus Nutzung und Betrieb von Wohn- und Nichtwohngebäuden im Hochbau	18
3.3.3	THG-Emissionen aus Herstellung, Errichtung und Modernisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden im Hochbau	19
3.4	Vergleich mit den planetaren Grenzen	21
4	DATENQUALITÄT	23
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	25
5.1	Zusammenfassung	25
5.2	Schlussfolgerungen	27
5.3	Reduktionspotenzial	27
5.4	Ausblick	28
6	ANHANG	29
6.1	Abkürzungsverzeichnis	29
6.2	Literatur	29

## Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, die Umweltauswirkungen der Herstellung, Errichtung und Erhaltung sowie der Modernisierung und der Nutzung von Wohn- und Nichtwohngebäuden im Hochbau Deutschlands einschließlich vor und nachgelagerter Prozesse (Umweltfußabdruck des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten») in einer sektorübergreifenden Betrachtung zu quantifizieren. Ein weiteres Ziel der Studie war die entstandenen Umweltauswirkungen hinsichtlich der planetaren Grenzen zu beurteilen. In dieser Studie wurden neben den Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) die Luftbelastung mit Feinstaub (Luftverschmutzung), die Eutrophierung, die verbrauchende Wassernutzung und Biodiversitätsverluste analysiert.

Die Umweltauswirkungen der Wohn- und Nichtwohngebäude in einer sektorübergreifenden Betrachtung umfassen (1) die Umweltauswirkungen von der Rohstoffgewinnung bis zur Errichtung neuer und der Modernisierung bestehender Gebäude; (2) die Umweltauswirkungen von der Gewinnung bis zur Nutzung der Energieträger für die Erzeugung der Raumwärme und -kälte sowie die Erzeugung und Nutzung des Stroms für den Gebäudebetrieb. Rückbau von Wohn- und Nichtwohngebäuden sowie Entsorgung und Recycling der Baustoffe werden hier nicht berücksichtigt.

Als Datengrundlagen dienten die multiregionale Input-Output-Tabelle Exiobase Version 3.4 (Jahr 2011), nationale Statistiken und der Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016. Die Qualität der hier verwendeten Daten wird als genügend bis gut eingestuft.

Die vorliegende Studie hat aufgezeigt, dass im Jahr 2014 40 % (362 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) der THG-Emissionen von Deutschland durch die Herstellung, Errichtung, Modernisierung und durch die Nutzung und den Betrieb von Wohn- und Nichtwohngebäuden verursacht wurden. Zulieferer im Ausland verursachten weitere 35 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Der gesamte Fußabdruck des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» beträgt 398 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente.

75 % des THG-Fußabdruckes des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» (297 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) und damit 33 % der nationalen THG-Emissionen wurden durch die Nutzung und den Betrieb der Wohn- und Nichtwohngebäuden verursacht (siehe Abbildung 1).

25 % des THG-Fußabdruckes des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» (65 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Inland und damit 7 % der nationalen THG-Emissionen, 35 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Ausland) wurde durch die vorgelagerten Lieferketten der Herstellung, Errichtung und Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäude und durch die direkten Emissionen der Bauwirtschaft (Anteil Hochbau) verursacht. Bei der Herstellung, Errichtung und Modernisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Baustoffindustrie + Bauwirtschaft + Lieferketten weiterer Zulieferer) verursachen die Herstellung von Zement, Kalk und Gips mit 21 % und die Kohle-Stromproduktion mit 15 % die größten Anteile der THG-Emissionen der Herstellung, Errichtung und der Modernisierung.

Die hier präsentierte sektorübergreifende Betrachtung hat gezeigt, dass beim Handlungsfeld «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» pro Tonne direkt emittierte Treibhausgase (z.B. durch die Erzeugung von Raumwärme) zusätzlich noch 2.4 Tonnen versteckte Treibhausgasemissionen (indirekt durch Energiebereitstellung und durch die Herstellung, Errichtung und die Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäude) verursacht werden.

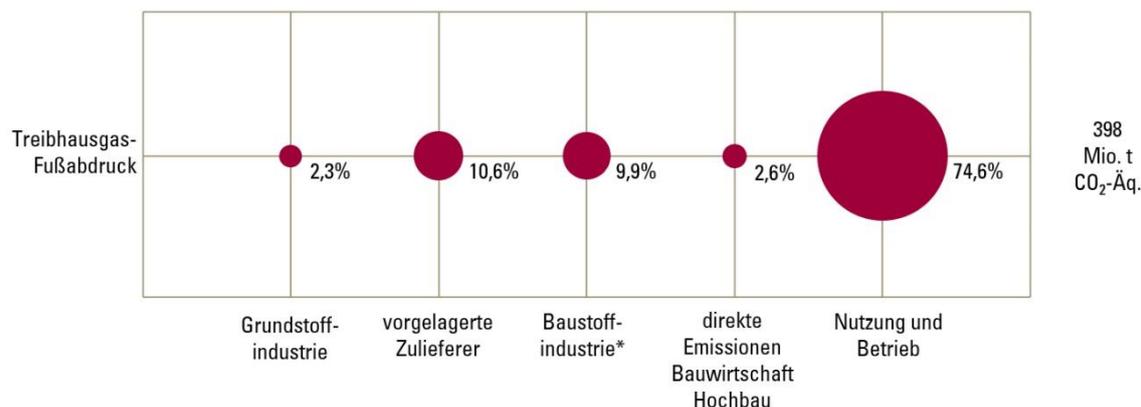


Abbildung 1: THG-Fußabdruck des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» (\*Baustoffindustrie und weitere direkte Zulieferer).

Die Beurteilung hinsichtlich der planetaren Grenzen hat gezeigt, dass eine globale Reduktion der THG-Emissionen um 77 % notwendig ist, um innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen der Erde zu bleiben. Zur Aufteilung der notwendigen Reduktion auf die Handlungsfelder, wurde in dieser Studie davon ausgegangen, dass alle Handlungsfelder ihre THG-Emissionen mit derselben Quote reduzieren müssen. Die handlungsfeldspezifische Reduktion der THG-Emissionen für das Handlungsfeld «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» beträgt demzufolge 77 %. Soweit in Deutschland sektorspezifische Reduktionsziele formuliert werden, müsste diese Aussage angepasst werden.

Die obengenannte notwendige Reduktion basiert auf einem globalen Grenzwert, der eine 50 % Wahrscheinlichkeit widerspiegelt, den Anstieg der Temperatur bis 2100 unterhalb 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau halten zu können. Neuere wissenschaftliche Erkenntnisse zeigen auf, dass ein maximaler Anstieg der Temperatur um weniger als 1.5°C anzustreben ist. Auf Basis des Paris-Abkommens fordern die im IPCC organisierten Wissenschaftler deshalb Netto-Null Emissionen bis spätestens 2050.

# 1 Einführung

## 1.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Die Bundesregierung Deutschland hat zum Erreichen der Ziele des von Deutschland ratifizierten Paris-Abkommens (UNFCCC 2015) den Klimaschutzplan 2050 erarbeitet (BMU 2016). Der Klimaschutzplan 2050 beschreibt für die Handlungsfelder Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie, Landwirtschaft sowie Landnutzung und Forstwirtschaft Minderungsziele bei Treibhausgasemission für 2030 und 2050 sowie Reduktionsmassnahmen. Im Handlungsfeld Gebäude werden die direkt bei der Nutzung (Raumwärme, -kühlung und Warmwasser) der Wohn- und Nichtwohngebäude entstehenden Treibhausgasemissionen adressiert. Die THG-Emissionen der vorgelagerten Sektoren werden nach dem Quellprinzip anderen Handlungsfeldern (z.B. der Energiewirtschaft) zugeordnet (BMU 2016). Die Baustoffproduktion ist im Handlungsfeld Industrie adressiert.

Um zielgerichtete Reduktionsmassnahmen für Wohn- und Nichtwohngebäude zu eruieren, ist es ergänzend sinnvoll, die Umweltauswirkungen der Wohn- und Nichtwohngebäude aus einer gesamtheitlichen Perspektive zu erfassen. Dazu ist eine sektorübergreifende Analyse notwendig.

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, die Umweltauswirkungen der Herstellung, Errichtung, Erhaltung und Modernisierung einerseits und der Nutzung und des Betriebs von Wohn- und Nichtwohngebäuden im Hochbau Deutschlands andererseits zu quantifizieren (in der vorliegenden Studie als Umweltfußabdruck des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» bezeichnet).

Begriffsdefinition:

### **Umweltfußabdruck des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten»**

In der vorliegenden Studie beinhaltet der Begriff «Fußabdruck» die gesamten Umweltauswirkungen, die durch den Hochbau in Deutschland von der Rohstoffgewinnung bis zur Herstellung, der Errichtung, dem Erhalt und der Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäude verursacht werden. Die Nutzung und der Betrieb der Wohn- und Nichtwohngebäude werden berücksichtigt und sind inbegriffen. Rückbau von Wohn- und Nichtwohngebäuden sowie Entsorgung und Recycling der Baustoffe werden nicht erfasst, da Daten über die tatsächliche Entsorgung fehlen. Das Entsorgen von Produktionsabfällen in den Lieferketten ist jedoch enthalten.

Die Quantifizierung des Umweltfußabdrucks erfolgt über die Analyse von Teilgrößen des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten». Die Teilgrößen des Handlungsfelds sind in Tabelle 1.1 dargestellt.

Tabelle 1.1: Beschreibung der Teilgrößen des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» (Wertschöpfungskette Bau und Nutzung/Betrieb). Die Spalten A-D ergeben die «embodied impacts», Spalte E beschreibt die «operational impacts».

Herstellung, Errichtung, Erhalt und Modernisierung von Hochbauten Wertschöpfungskette BAU				Nutzung und Betrieb
Baustoffindustrie und weitere direkte Zulieferer mit Vorstufen			Direkte Emissionen der Bauwirtschaft (Anteil Hochbau)	
Grundstoff- industrie	Vorgelagerte Zulieferer	Baustoffindustrie und weitere direkte Zulieferer		
A	B	C	D	E
Abbau / Gewinnung von Energieträgern (z.B. Kohle) und mineralischen Rohstoffen (z. B. Kalkstein, Metallerze).	Zulieferer der Baustoffindustrie und der weiteren direkten Zulieferer.	Baustoffhersteller (z.B. Zement, Metalle, Holzprodukte) und weitere Zulieferer (z.B. Energieversorger).	Bauprozesse im Kontext von Neubau und Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäude.	Energiebereitstellung für Raumwärme, Raum- kühlung, Warmwasser, und Beleuchtung in Wohn- und Nichtwohngebäuden.

Ein weiteres Ziel der Studie war es, die entstandenen Umweltauswirkungen hinsichtlich der planetaren Grenzen zu beurteilen.

Die vorliegende Studie lehnt sich in Bezug auf Methodik und Umweltindikatoren an den für die Schweiz erarbeiteten Umweltatlas Lieferketten Schweiz an, in welchem unter anderem die Schweizer Bau- und Immobilienwirtschaft detaillierter analysiert wurde (Alig et al. 2019).

## 1.2 Struktur des Berichtes

In Kapitel 2 wird die Methodik und die Datengrundlage beschrieben. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 3. In Kapitel 4 wird die Datenqualität beurteilt. Der Bericht schliesst mit Schlussfolgerungen und einem Ausblick in Kapitel 5 ab.

## 2 Methodik und Datengrundlage

### 2.1 Übersicht

Die Umweltauswirkungen der Wohn- und Nichtwohngebäude in einer sektorübergreifenden Perspektive umfassen:

- die Umweltauswirkungen von der Rohstoffgewinnung bis zur Fertigung neuer und zur Modernisierung bestehender Gebäude inklusive aller Prozessstufen;
- die Umweltauswirkungen von der Gewinnung bis zur Nutzung der Energieträger für die Erzeugung der Raumwärme und -kälte sowie der Produktion und Nutzung des Stroms für den Betrieb der Gebäude.

Rückbau und Entsorgung von Wohn- und Nichtwohngebäuden wird nicht berücksichtigt, da keine Angaben zum Anteil der Wohn- und Nichtwohngebäude an den Aktivitäten der Entsorgungssektoren verfügbar waren. Vorgelagerte Entsorgungsaufwendungen (z.B. Entsorgung von Produktionsabfällen bei den Baustoffherstellern) sind jedoch in der Analyse enthalten.

### 2.2 Berechnung von Umweltfußabdrücken

Um die sektorübergreifenden Umweltauswirkungen (auch «kumulierte Umweltauswirkungen» oder «Umweltfußabdruck» genannt) der Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland zu quantifizieren werden einerseits Daten zum Güterkreislauf in Deutschland und weltweit und andererseits Umweltdaten zu den produzierenden Sektoren benötigt. Diese Daten sind in mit Umweltdaten erweiterten Input-Output Tabellen (IOT) enthalten.

Im Rahmen des EXIOPOL<sup>1</sup>-Projekts wurde eine multiregionale IOT (MRIOT) erstellt (Tukker et al. 2014). In Abbildung 2 ist die Struktur der MRIOT Exiobase aufgezeigt.

---

<sup>1</sup> A new Environmental Accounting Framework Using Externality Data and Input-Output Tools for Policy Analysis

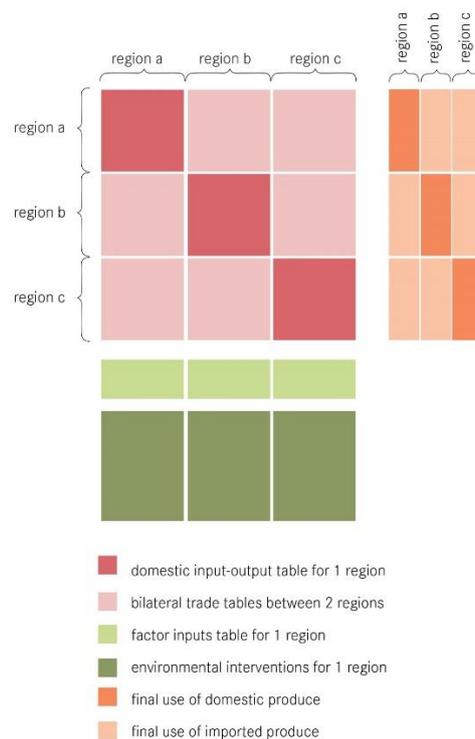


Abbildung 2: Struktur einer mit Umweltdaten erweiterten IO Tabelle (Quelle: Tukker et al. 2014)

Um den Umweltfußabdruck eines Sektors zu bestimmen sind die folgenden Berechnungsschritte notwendig:

### 1. Berechnen der Bruttoproduktionsleistung (X)

Aus den MRIOT Bestandteilen Transaktionsmatrix (Z) und Endnachfrage (Y) kann die Bruttoproduktionsleistung eines Zielsektors bestimmt werden (1). Die Transaktionsmatrix (Z) widerspiegelt die Wirtschaftsverflechtungen der Sektoren und zeigt auf, welche Mengen die Bauwirtschaft von anderen Sektoren bezieht, um ihre Produktionsleistung zu erfüllen.

$$X = Z + Y \quad (1)$$

### 2. Berechnen der inversen Leontief-Matrix

Um die kumulierten Umweltauswirkungen der Bauwirtschaft, das heißt den Umweltfußabdruck des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» zu berechnen, müssen die Umweltauswirkungen aller an der Produktion des Endproduktes beteiligten Sektoren anteilmässig aggregiert werden. Dabei müssen auch reziproke Bezüge miteinbezogen werden. Dies kann durch die Verwendung der Leontief-Matrix erreicht werden (Suh & Huppel 2002). Dabei zeigen die

Koeffizienten der Leontief-Matrix die kumulierte Menge, welche von den Sektoren produziert werden müssen, um eine Einheit des jeweiligen Sektors zu produzieren (Suh & Huppes 2002). Zur Berechnung der Leontief-Matrix wird die Inter-Sektoren-Matrix  $A$  benötigt. Die Inter-Sektoren-Matrix zeigt die direkten Bezüge der Sektoren pro Million Euro an, siehe (2). Die Inverse der Differenz zwischen der Einheitsmatrix und der Inter-Sektoren Matrix entspricht der inversen Leontief-Matrix (3).

$$A = Z * \frac{1}{X} \quad (2)$$

$$L = (E - A)^{-1} \quad (3)$$

### 3. Berechnen der Produktionsleistungen der vorgelagerten Sektoren

Die Multiplikation der inversen Leontief-Matrix mit der Bruttonproduktionsleistung der Bauwirtschaft resultiert in den durch das Handlungsfeld induzierten Produktionsleistungen der vorgelagerten Sektoren.

### 4. Berechnen der Umweltauswirkungen

Die durch das Handlungsfeld induzierten Produktionsleistungen in den Sektoren werden mit den jeweiligen sektorspezifischen Umweltauswirkungen ( $S$ ) multipliziert<sup>2</sup>. Die Summe ergibt den Umweltfußabdruck der Baustoffindustrie und der Bauwirtschaft inkl. Vorstufen im Sinne der «embodied impacts» (hier Bauprozesse, Herstellung der Bauprodukte, deren Lieferketten sowie weitere direkte Zulieferer der Bauwirtschaft, jedoch ohne Berücksichtigung der Nutzung und des Betriebs der Gebäude).

Der gesamte Umweltfußabdruck der Wohn- und Nichtwohnungsgebäude im Sinne des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» beinhaltet auch die Umweltauswirkungen der Nutzung und des Betriebs der Gebäude. Diese wurden mit statistischen Daten und Ökobilanzen zur Energiebereitstellung in Deutschland ermittelt.

---

<sup>2</sup> Für den Zielsektor wird eine Korrektur vorgenommen, um Doppelzählungen zu vermeiden.

## 2.3 Datengrundlagen

### 2.3.1 Multiregionale Input-Output-Tabelle – Exiobase Version 3.4

Die aktuell öffentlich verfügbare Version von Exiobase ist die Version 3.4<sup>3</sup>. Die Exiobase Version 3.4 enthält eine Zeitreihe der Jahre 1995 bis 2011 und beinhaltet Daten zu 44 Ländern und 5 Weltregionen, 163 Sektoren, 200 Produkten, 513 Ressourcenkategorien, 27 Luftschadstoffen, 20 Landnutzungstypen und 194 Wassernutzungskategorien (Beschreibung der Daten siehe Stadler et al. 2018). Die Daten basieren auf internationalen und nationalen Datenbanken.

Den in Exiobase angegebenen Schadstoff-Emissionen, Ressourcenverbräuchen und Landnutzungen<sup>4</sup> wurden Bewertungsfaktoren der verwendeten Umweltindikatoren (auch «Wirkungsabschätzungsmethoden» genannt, siehe Unterkapitel 2.4) zugeordnet. Folgende Schritte wurden zur Anpassung der Daten vorgenommen:

1. Zuordnung der in Exiobase 3.4 enthaltenen Emissionen und Ressourcenverbräuche zu den Elementarflüssen, die in den Wirkungsabschätzungsmethoden verwendet werden.
2. Anpassungen der Ressourcenverbräuche und Emissionen
3. Regionalisierung der Wasser- und Landnutzung

Zusätzlich zu diesen Anpassungen wurden bei einigen Flüssen auch Umrechnungen der Einheiten vorgenommen.

Für die Quantifizierung der Umweltauswirkungen der Herstellung, Errichtung, der Modernisierung und der Nutzung von Wohn- und Nichtwohngebäuden wurde das letzte in Exiobase Version 3.4 verfügbare Jahr 2011 verwendet.

Für die Analyse der Umweltauswirkungen der Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland wurden in einem ersten Schritt die Umweltauswirkungen der deutschen Bauwirtschaft<sup>5</sup> ausgewertet. Die deutsche Bauwirtschaft hatte im Jahr 2011 eine Bruttonominalleistung von 266.439 Millionen Euro (Exiobase Version 3.4). Im Jahr 2014 wurden 250.998 Millionen Euro Hochbauinvestitionen getätigt (Statistisches Bundesamt 2020).

Die Exiobase-Daten wurden mit Python und mit Hilfe des Modules Pymrio analysiert (Stadler 2019).

---

<sup>3</sup> Online unter: <https://www.exiobase.eu/index.php/data-download/exiobase3mon>

<sup>4</sup> Diese werden als "Elementarflüsse" bezeichnet.

<sup>5</sup> Exiobase v3.4 Sektor "construction (45)"

### 2.3.2 Nutzung und Betrieb

Für die Analyse der Umweltauswirkungen der Nutzung und des Betriebs von Wohn- und Nichtwohngebäuden in Deutschland wurden Daten aus nationalen Statistiken verwendet. Um einen Vergleich mit den Daten im Klimaschutzplan 2050 (BMU 2016) zu ermöglichen, wurde für die Nutzung und den Betrieb der Gebäude Statistiken für das Jahr 2014 verwendet. In Tabelle 2.1 sind die berücksichtigten Endenergieverbräuchen nach Anwendungsbereichen für das Jahr 2014 dargestellt. Für den Anwendungsbereich Gewerbe, Handel, Dienstleistungen wurde die Endenergieverbräuche für Raumwärme, Warmwasser, Klimakälte und Beleuchtung berücksichtigt. Für den Anwendungsbereich private Haushalte wurden die Endenergieverbräuche für Raumwärme, Warmwasser, sonstige Prozesswärme, Klimakälte, sonstige Prozesskälte, mechanische Energie, IKT (Informations- und Kommunikationstechnologie) und Beleuchtung berücksichtigt. Die Daten wurden der Tabelle 7b aus «Zahlen und Fakten Energiedaten» (BMW 2019) entnommen. Die Aufteilung der Position «Gase» auf Erdgas und Propan/Butan sowie die Aufteilung der Kohle auf Stein- und Braunkohle erfolgte gemäss den Anteilen in der Tabelle 6a aus «Zahlen und Fakten Energiedaten» (BMW 2020a).

Tabelle 2.1: Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen und Energieträger für das Jahr 2014 (BMW 2019, 2020a)

Brennstoff	Einheit	im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen*	in privaten Haushalten**
Heizöl	PJ	181	494
Gas (Erdgas)	PJ	335	760
Gas (Propan/Butan)	PJ	15	21
Strom	PJ	234	467
Fernwärme	PJ	48	153
Kohle (Steinkohle)	PJ	2	10
Kohle (Braunkohle)	PJ	0	14
Holz	PJ	81	269
Total	PJ	896	2.188

\* Berücksichtigung der Raumwärme, Warmwasser, Klimakälte, Beleuchtung

\*\* Berücksichtigung der Raumwärme, Warmwasser, sonst. Prozesswärme, Klimakälte, sonst. Prozesskälte, mechanische Energie, IKT, Beleuchtung

Die Angaben zu den Brennstoffen für den Fernwärmemix des Jahres 2014 wurden der Tabelle 25 aus «Zahlen und Fakten Energiedaten» (BMW 2020b) entnommen (siehe Tabelle 2.2). Ein Verlust von 29 % wurde miteinbezogen.

Tabelle 2.2: Fernwärmemix in Deutschland für das Jahr 2014 (Datengrundlagen: BMWi 2020b; Berechnungen treeze ltd.)

Brennstoff	Einheit	Menge pro PJ Fernwärme	Anteil
Steinkohle	PJ	0,29	22%
Braunkohle	PJ	0,10	8%
Mineralöl	PJ	0,02	1%
Gase	PJ	0,50	38%
Kernenergie	PJ	0,00	0%
nicht erneuerbarer Müll	PJ	0,15	12%
Erneuerbare Energien	PJ	0,24	18%
Total	PJ	1,29	100%

Der Wasserverbrauch durch die Nutzung und den Betrieb von Wohn- und Nichtwohngebäuden ist in Tabelle 2.3 dargestellt.

Tabelle 2.3: Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung an Endverbraucher im Jahr 2013 (Statistisches Bundesamt o.J.-a)

Endverbraucher		Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung an Endverbraucher (2013)
Haushalte u. Kleingewerbe	Mio. m <sup>3</sup>	3.541
Gewerbliche Unternehmen und sonstige Abnehmer	Mio. m <sup>3</sup>	927
Total	Mio. m <sup>3</sup>	4.468

Die von Gebäuden und zugehörigen Freiflächen genutzte Siedlungsfläche betrug 24.942 km<sup>2</sup> (Statistisches Bundesamt o.J.-b).

Als Hintergrunddatenbestand zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen der Energiebereitstellung (direkte Emissionen und Emissionen der Energieträgerbereitstellung) wurde der KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 (KBOB et al. 2016), der auf dem ecoinvent-Datenbestand v2.2 basiert, verwendet. Der KBOB Ökobilanzdatenbestand enthält auch repräsentative Datensätze für Deutschland (Strommix) und Europa (Brenn- und Treibstoffbereitstellung).

Die Analyse der Umweltauswirkungen der Nutzung und des Betriebs erfolgte mit der Ökobilanz-Software SimaPro 9.1.0.7 (PRé Consultants 2020).

## 2.4 Umweltauswirkungen

Zum Analysieren der Umweltauswirkungen des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» werden Wirkungsabschätzungsmethoden eingesetzt. In Wirkungsabschätzungsmethoden werden unterschiedliche Emissionen, Ressourcenverbräuche und Landnutzungen einer Wirkungskategorie (z.B. Treibhausgasemissionen) zugeordnet und innerhalb dieser Kategorie mit Charakterisierungsfaktoren vergleichbar gemacht.

In dieser Studie wurden neben den Treibhausgasemissionen die Luftbelastung mit Feinstaub (Luftverschmutzung), die Eutrophierung, die verbrauchende Wassernutzung und Biodiversitätsverluste durch Landnutzung analysiert. Die Auswahl erfolgte hinsichtlich der Relevanz der Umweltauswirkungen im Gebäudebereich und der Beurteilung der Überschreitung der planetaren Grenzen (Steffen et al. 2015). Die Versauerung von Böden und Seen wird in der erwähnten Publikation nicht adressiert, weshalb diese Umweltwirkung in der hier vorliegenden Studie nicht berücksichtigt wurde.

Nachfolgend werden die verwendeten Wirkungsabschätzungsmethoden erläutert.

### 2.4.1 Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) quantifizieren die Wirkungen verschiedener Treibhausgase bezogen auf die Leitsubstanz CO<sub>2</sub>. Die Treibhauswirkung wird auf Basis der Treibhauspotenziale des 5. Sachstandberichts des IPCC (IPCC 2013) quantifiziert.

Für die Kerosin-Emissionen des Sektors „Flugtransporte“ werden die indirekten Erwärmungseffekte des Luftverkehrs (siehe Sommer et al. 2014) berücksichtigt und ein Treibhauspotential von 1.95 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg CO<sub>2</sub> verwendet.

### 2.4.2 Luftbelastung mit Feinstaub (Luftverschmutzung)

Primäre und sekundäre Partikel können gesundheitliche Probleme wie beispielsweise Atemwegsbeschwerden hervorrufen (Goedkoop et al. 2009). Der Midpoint-Indikator „Particulate matter formation“ aus der ReCiPe 2008 Methode Goedkoop et al. (2009) mit der Einheit kg PM10-eq. wird verwendet, um die Luftverschmutzung durch das Handlungsfeld «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» abzubilden. Dabei werden von Goedkoop et al. (2009) Charakterisierungsfaktoren für die Substanzen PM2.5, PM10, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> und SO<sub>x</sub> berechnet.

### 2.4.3 Marine Eutrophierung

Eutrophierung ist eine Folge des Nährstoffeintrags in ein Gewässer. Der Eintrag von zu vielen Nährstoffen in ein Gewässer kann zu verschiedenen Umweltproblemen führen (Millennium Ecosystem Assessment 2005). Die marine Eutrophierung des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» wird mit dem Midpoint-Indikator „marine eutrophication“ aus der

ReCiPe 2008 Methode Goedkoop et al. (Goedkoop et al. 2009) mit der Einheit kg N-eq. abgebildet. Goedkoop et al. (2009) berechneten zu diesem Zweck Charakterisierungsfaktoren für Emissionen von Stickstoffverbindungen in Luft, Wasser und Boden und deren Potential, zur Eutrophierung der Ozeane beizutragen. Der bau- und gebäudebedingte Beitrag zur Eutrophierung erfolgt im wesentlich durch die NO<sub>x</sub>-Emissionen von fossilen Feuerungen und Kraftwerken.

#### 2.4.4 Wassernutzung

Der Indikator **AWARE (Available WAter REmaining)** wird verwendet, um die verbrauchende Süßwassernutzung des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» zu bewerten. Der AWARE Indikator quantifiziert die nutzbare Menge an Süßwasser in einer Region, indem vom verfügbaren Süßwasser eines Wassereinzugsgebietes die Nachfrage der Ökosysteme und der Menschen abgezogen wird (Boulay et al. 2017). Die resultierenden regionalisierten Charakterisierungsfaktoren werden aus der Inverse der nutzbaren Menge an Süßwasser einer Region berechnet und mit einem globalen Durchschnittswert normiert (Boulay et al. 2017). Die Charakterisierungsfaktoren liegen zwischen 0.1 und 100 und besitzen die Einheit m<sup>3</sup>Wasser-eq/m<sup>3</sup> Wasser. Je höher der Charakterisierungsfaktor ist, desto weniger nutzbares Wasser ist in der Region vorhanden. Ein hoher Charakterisierungsfaktor bedeutet demnach eine hohe Wasserknappheit in der Region. Der AWARE Indikator wird von der UNEP/SETAC Life Cycle Initiative zur Bewertung der Wassernutzung empfohlen (Frischknecht & Jolliet 2017).

#### 2.4.5 Biodiversitätsverluste

Biodiversitätsverluste werden überwiegend durch eine veränderte Landnutzung verursacht (Millennium Ecosystem Assessment 2005). Zur Bewertung der Biodiversitätsverluste des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» wird die Methode von Chaudhary et al. (2015) verwendet. Chaudhary et al. (2015) quantifizierten regionalisierte Charakterisierungsfaktoren für sechs Landnutzungstypen und fünf Taxa. Basierend auf dem sogenannten «Countryside species area relationship model» wird der regionale Artverlust aufgrund der Landnutzung bestimmt. Um globale Charakterisierungsfaktoren zu erhalten, werden die regionalen Charakterisierungsfaktoren mit Vulnerabilitätswerten der jeweiligen Taxa in einer Region gewichtet, um die globale Gefährdung einer Art abzubilden (Chaudhary et al. 2015). Chaudhary et al. (2015) berechneten aus den globalen Charakterisierungsfaktoren länderspezifische und Taxa übergreifende Charakterisierungsfaktoren mit der Einheit PDF (potentially disappeared fraction) \* Jahr.

### 2.5 Planetare Grenzen

Nathani et al. (2019) analysierten den Umweltfußabdruck von acht Schweizer Sektoren hinsichtlich der planetaren Grenzen und identifizierten den benötigten Reduktionsbedarf, um innerhalb der Belastungsgrenzen der Erde zu bleiben. In dieser Studie wird dieselbe Methodik zur

Analyse des Umweltfußabdruckes der Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland hinsichtlich der planetaren Grenzen angewandt. Nathani et al. (2019) verwendeten in ihrer Studie den Ansatz, dass alle Sektoren ihre Umweltauswirkungen mit derselben Quote («contraction of absolute emissions») reduzieren müssen. In der vorliegenden Studie wurden die in Tabelle 2.4 aufgezeigten globalen Fußabdrücke und Grenzwerte verwendet. Der globale Treibhausgas-Fußabdruck wurde aus UNEP (2014) entnommen, die restlichen globalen Fußabdrücke wurden basierend auf den Daten der Exiobase Version 3.4 berechnet.

Tabelle 2.4: Grenzwerte für den globalen Fußabdruck, globaler Fußabdruck im Jahr 2011 und notwendige Reduktionsrate auf globalem Level.

Indikator	Einheit	Grenzwert für globalen Fußabdruck [Referenzjahr]	Globaler Umweltfußabdruck [2011]	Notwendige Reduktion [globales Level]	Literatur
Wertschöpfung	Mio. Euro		52.300.000		Globaler FP: Exiobase v3.4 Jahr 2011
Treibhausgas-Fußabdruck	Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> -Äq.	12.300	53.000	77%	Grenzwert für globalen FP: Dao et al. 2015 Globaler FP: UNEP 2014
Luftverschmutzungs-Fußabdruck	Mio. Tonnen PM10-Äq.	66	114	42%	Grenzwert für globalen FP: Frischknecht & Büsser Knöpfel 2013 Globaler FP: Exiobase v3.4 Jahr 2011
Eutrophierungs-Fußabdruck	Mio. Tonnen N-Äq.	48	57	17%	Grenzwert für globalen FP: Dao et al. 2015 Globaler FP: Exiobase v3.4 Jahr 2011
Biodiversitäts-Fußabdruck	nano PDF * a	15.000.000	103.000.000	85%	Grenzwert für globalen FP: Frischknecht et al. 2018; Steffen et al. 2015 Globaler FP: Exiobase v3.4 Jahr 2011

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Überblick

In diesem Kapitel werden die Umweltauswirkungen der Herstellung, der Errichtung neuer und der Modernisierung bestehender Hochbauten einerseits und der Nutzung und des Betriebs der Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland andererseits dargestellt. Im Unterkapitel 3.2 werden die Umweltauswirkungen des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» entlang der Wertschöpfungskette BAU sowie der Nutzung und des Betriebs aufgezeigt. Die detaillierte Analyse des THG-Fußabdruck erfolgt in Unterkapitel 3.3. In Unterkapitel 3.4 erfolgt die Beurteilung der Umweltfußabdrücke hinsichtlich der planetaren Grenzen.

### 3.2 Umweltauswirkungen des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten»

In Abbildung 3 sind die Wertschöpfung und die Umweltauswirkungen der Herstellung, der Errichtung neuer, der Modernisierung bestehender und der Nutzung und des Betriebs der Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland entlang der Wertschöpfungskette BAU sowie der Nutzung und des Betriebs dargestellt. Das Handlungsfeld «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» erreichte im Jahr 2014 eine Wertschöpfung<sup>6</sup> von 244.522 Mio. Euro. Der gesamte THG-Fußabdruck beträgt 398 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente. 75 % des THG-Fußabdruckes (297 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) und damit 33 % der nationalen THG-Emissionen wurden in diesem Jahr durch Nutzung und Betrieb der Wohn- und Nichtwohngebäude verursacht. Dies umfasst die direkten THG-Emissionen, die beispielsweise bei der Verbrennung von Brennstoffen für die Raumwärme entstehen, und die THG-Emissionen, die bei der Herstellung der Brennstoffe und des Stroms emittiert werden.

25 % des THG-Fußabdruckes des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» (65 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Inland und damit 7 % der nationalen THG-Emissionen, 35 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Ausland) wurde durch die vorgelagerten Lieferketten der Herstellung, Errichtung und Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäuden und durch die direkten Emissionen der Bauwirtschaft (Anteil Hochbau) verursacht.

Die Bauwirtschaft (Anteil Hochbau) selbst trägt statistisch zwar 45 % zur Bruttowertschöpfung bei, verursacht aber über Bauprozesse nur 2.6 % (10.3 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) des gesamten THG-Fußabdruckes. Die restlichen 22.8 % im Handlungsfeld «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» werden durch die Grundstoffindustrie (2.3 %, 9 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente), die vorgelagerten Zulieferer (10.6 %, 42 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) der Baustoffindustrie inkl. weiterer direkter Zulieferer (9.9 %, 39 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) verursacht. Bei den anderen

---

<sup>6</sup> Die Wertschöpfung der Nutzung und des Betriebs konnte mit den verfügbaren Daten nicht ermittelt werden.

Umweltfußabdrücken werden 33 % bis 70 % der Umweltauswirkungen durch Nutzung und Betrieb der Hochbauten verursacht.

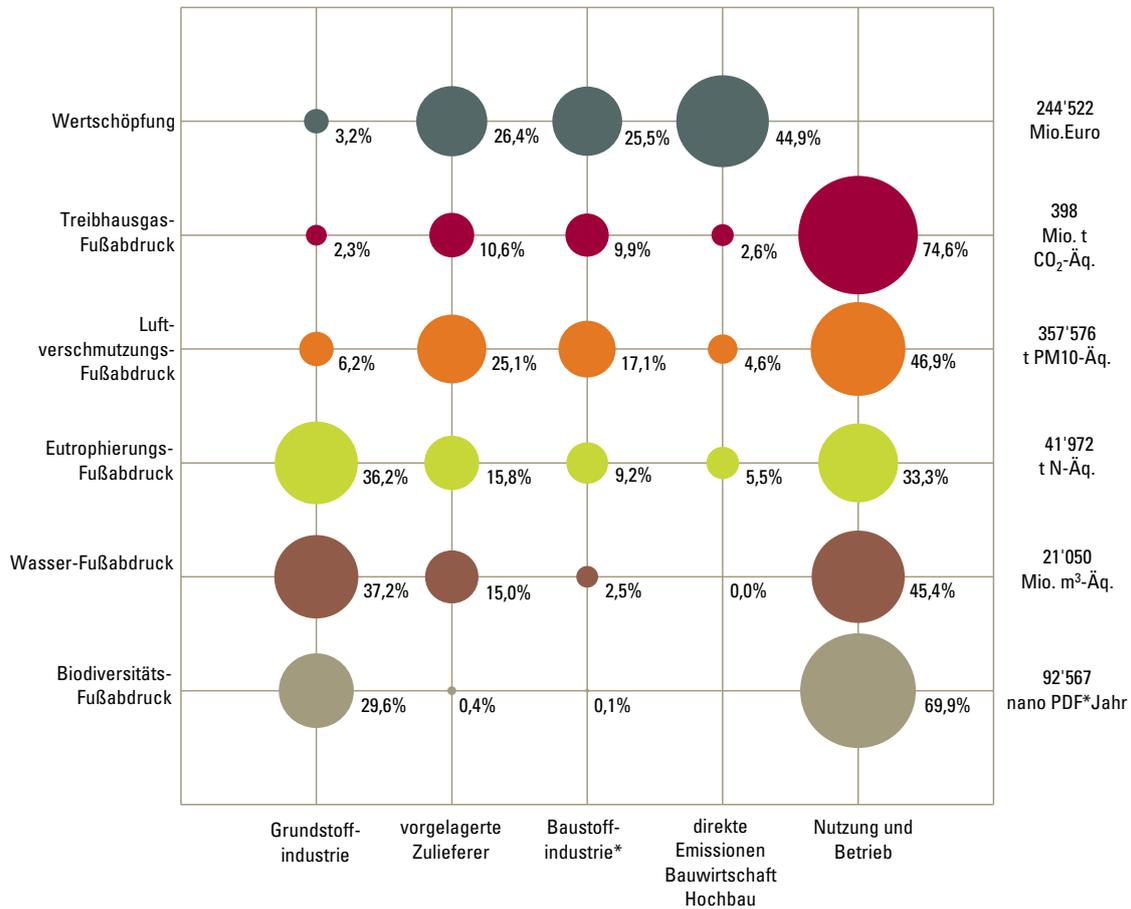


Abbildung 3: Wertschöpfung und Umweltfußabdrücke des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» (\* Baustoffindustrie und weitere direkte Zulieferer).

### 3.3 THG-Fußabdruck des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten»

In diesem Unterkapitel wird der THG-Fußabdruck der Herstellung, der Errichtung neuer, der Modernisierung bestehender und der Nutzung und des Betriebs der Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland detaillierter analysiert. In Abschnitt 3.3.1 wird der THG-Fußabdruck der Wohn- und Nichtwohngebäude mit den in Deutschland emittierten THG-Emissionen verglichen. Die THG-Emissionen der Nutzung und des Betriebs von Wohn- und Nichtwohngebäuden werden in Abschnitt 3.3.2 dargestellt. Die THG-Emissionen der Herstellung, Errichtung und der Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäude werden in Abschnitt 3.3.3 erläutert.

#### 3.3.1 Vergleich mit den Handlungsfeldern des Klimaschutzplans 2050

Gemäß dem Klimaschutzplan 2050 der deutschen Bundesregierung wurden 2014 in Deutschland 902 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittiert (BMU 2016). In Tabelle 3.1 Spalte «THG-Emissionen, gesamt\*» sind diese auf die im Klimaschutzplan 2050 definierten Handlungsfelder aufgeteilt (gemäß Tab.1 in BMU 2016). Beim Handlungsfeld «Industrie» wurde die «Bauwirtschaft» auf Basis der Berechnungen der hier vorliegenden Studie separat dargestellt.

Die Nutzung und der Betrieb der Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland verursacht gemäß den Berechnungen in dieser Studie insgesamt 297 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Davon wurden 117 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente durch Verbrennung der Brennstoffe verursacht (= direkte THG-Emissionen). Diese Emissionen sind im Handlungsfeld «Gebäude» ersichtlich und entsprechen 98 % der im Klimaschutzplan für Gebäude ausgewiesenen 119 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente<sup>7</sup>. 180 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente wurden zusätzlich durch die Bereitstellung der verwendeten Brennstoffe oder des Stroms verursacht (= vorgelagerte bzw. indirekte THG-Emissionen). Diese Emissionen sind im Handlungsfeld «Energiewirtschaft» verbucht, das einem volkswirtschaftlichen Sektor entspricht.

Die direkten Emissionen der Bauwirtschaft (aus Bauprozessen) und die direkten und vorgelagerten Emissionen ihrer Zulieferer (Baustoffindustrie und weitere) im Inland betragen 65 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente, wobei die Industrie insgesamt (41 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) und die Energiewirtschaft (16.4 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) die wesentlichen Emittenten sind. Das Handlungsfeld «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» verursacht – basierend auf Daten von 2014 – etwas mehr als die Hälfte (54.8 %) der gesamten THG-Emissionen der deutschen Energiewirtschaft und 22.6 % der THG-Emissionen der deutschen Industrie.

---

<sup>7</sup> Die geringe Abweichung zu den Daten des Klimaschutzplans (minus 2 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq.) sind bedingt durch unterschiedliche Emissionsfaktoren der Energieträger.

Die Zulieferer im Ausland verursachen weitere 35 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Insgesamt wurden durch die Herstellung, Errichtung und die Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäuden (ohne Nutzung und Betrieb) in Deutschland – basierend auf Daten von 2014 – rund 101 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittiert. Die Aufteilung der Emissionen gemäss den Handlungsfeldern ist in Abbildung 4 ersichtlich.

Tabelle 3.1: Vergleich der in Deutschland emittierten THG-Emissionen mit dem THG-Fußabdruck der Wohn- und Nichtwohngebäude.

Handlungsfeld	THG-Emissionen, gesamt*	THG-Emissionen, Nutzung und Betrieb von Wohn- und Nichtwohngebäuden	THG-Emissionen, Inland, Herstellung, Errichtung und Modernisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden	THG-Emissionen, Ausland, Herstellung, Errichtung und Modernisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden	Anteil THG-Fußabdruck Wohn- und Nichtwohngebäude Inland an THG-Emissionen, gesamt
	2014 (Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq.)	Nutzungsphase 2014 (Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq.)			
Energiewirtschaft	358	180	16,4	13,5	54,8%
Gebäude	119	117	0,0	0,0	98,4%
Verkehr	160	0	4,0	5,4	2,5%
Industrie	181	0	41,0	13,1	22,6%
anteilige Direktmissionen Bauwirtschaft aus Bauprozessen (Anteil Hochbau)		0	10,3	0,2	
Landwirtschaft	72	0	0,1	1,7	0,2%
Teilsomme	890	297	62	34	40,3%
Sonstige	12	0	3,9	1,6	32,8%
<b>Gesamtsumme</b>	<b>902</b>	<b>297</b>	<b>65</b>	<b>35</b>	<b>40,2%</b>

\*Aus BMU (2016), Tab.1; Berechnungen treeze ltd.

Insgesamt werden rund 40 % der gesamten THG-Emissionen in Deutschland durch die Herstellung, Errichtung, die Modernisierung und die Nutzung und den Betrieb der Wohn- und Nichtwohngebäude (Hochbau) (d.h. durch das Handlungsfeld «Errichtung und Nutzung von Hochbauten») verursacht.

Deutlich wird damit die volkswirtschaftliche Bedeutung dieses Handlungsfelds, sowohl im Hinblick auf den Anteil an den THG-Emissionen bei einer sektorübergreifenden Betrachtung als auch

im Hinblick auf existierende bedeutenden Emissionsquellen innerhalb des Handlungsfelds. Die bedeutenden Emissionsquellen bergen auch die grossen Minderungspotentiale. Möglichkeiten einer Einflussnahme sind gegeben durch Reduzierung des Energiebedarfs in der Nutzungsphase, Art und Umfang von Baumaßnahmen sowie die Dekarbonisierung von Prozessen der Energiebereitstellung und Baustoffproduktion, wie eine aktuelle Schweizer Studie (Alig et al. 2020) zeigt.

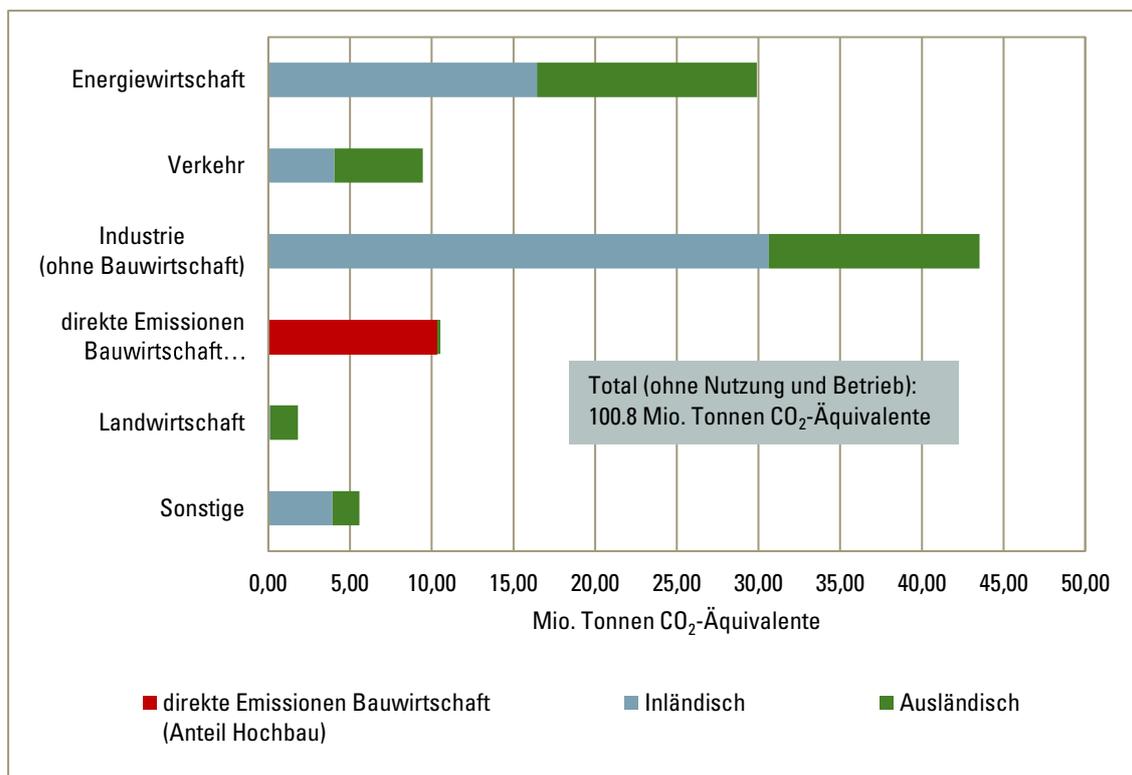


Abbildung 4: THG-Emissionen der Herstellung, Errichtung und der Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland aufgeteilt nach Handlungsfeldern im Klimaschutzplan (inkl. Lieferketten).

### 3.3.2 THG-Emissionen aus Nutzung und Betrieb von Wohn- und Nichtwohngebäuden im Hochbau

In Tabelle 3.2 sind die direkten und vorgelagerten THG-Emissionen verursacht durch die Nutzung und den Betrieb der Wohn- und Nichtwohngebäude dargestellt. Die Wohngebäude verursachten im Jahr 2014 mit 84 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente direkten und 123 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente vorgelagerten Emissionen knapp 70 % der gesamten THG-Emissionen der Nutzung und des Betriebs der Gebäude in Deutschland.

Tabelle 3.2: THG-Emissionen der Nutzung und des Betriebs von Wohn- und Nichtwohngebäuden in DE.

2014 (in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> -Äq.)		Direkte THG-Emissionen Nutzung und Betrieb	Vorgelagerte THG-Emissionen Nutzung und Betrieb	Totale THG-Emissionen Nutzung und Betrieb
Energiewirtschaft	Wohngebäude	0	123	123
	Nicht-Wohngebäude	0	57	57
Gebäude	Wohngebäude	84	0	84
	Nicht-Wohngebäude	33	0	33
<b>Total</b>		<b>117</b>	<b>180</b>	<b>297</b>

### 3.3.3 THG-Emissionen aus Herstellung, Errichtung und Modernisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden im Hochbau

In Abbildung 5 ist der THG-Fußabdruck der Herstellung, Errichtung und der Modernisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach direkten Zulieferern inklusive der THG-Emissionen ihrer Lieferketten dargestellt. Die THG-Emissionen der Nutzung und des Betriebs werden in der Abbildung 5 nicht dargestellt. Gemäss dieser Perspektive trugen die direkten Emissionen der Bauwirtschaft infolge von Bauprozessen (Anteil Hochbau) 10 % zum THG-Fußabdruck von rund 101 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bei. Mit 25 % (25.6 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) trug die Herstellung von Zement, Kalk und Gips inkl. deren Lieferketten am meisten zum THG-Fußabdruck im Bereich der «embodied impacts» bei. Knapp 5 % des Beitrags stammten von der Herstellung von Zement, Kalk und Gips im Ausland. Im Weiteren verursachten die Herstellung von Kunststoffprodukten und die Herstellung von Metallerzeugnissen (inkl. deren Lieferketten) 8.1 % (8.1 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) resp. 7.6 % (7.6 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) des THG-Fußabdruckes.

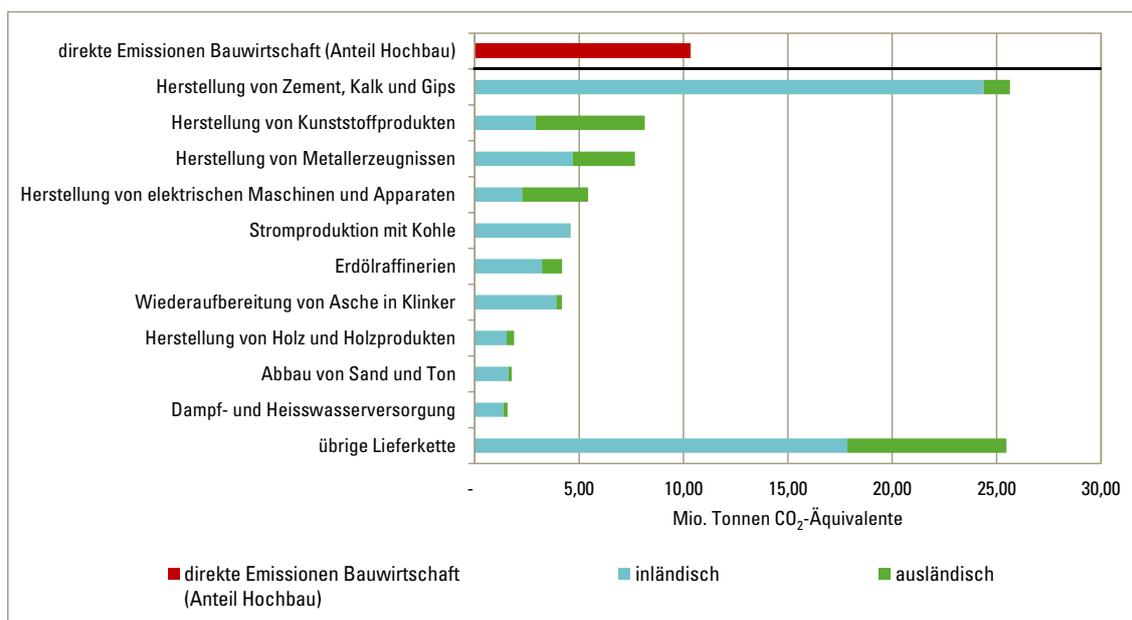


Abbildung 5: Treibhausgas-Fußabdruck der Herstellung, Errichtung und der Modernisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach direkten Zulieferern (inkl. der THG-Emissionen derer Lieferketten).

Gemäss der Perspektive der THG-Emissionen der direkten Zulieferer (inkl. ihrer Lieferkette) der Bauwirtschaft (Hochbau) wurden 78 %<sup>8</sup> des THG-Fußabdruckes durch inländische Zulieferer und deren Lieferketten, 22 % des THG-Fußabdruckes durch ausländische direkte Zulieferer und deren Lieferketten verursacht.

In Abbildung 6 ist der THG-Fußabdruck der Herstellung, Errichtung und der Modernisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach verursachenden Sektoren dargestellt. Anders als in der Perspektive der direkten Zulieferer inkl. ihrer Lieferketten (siehe vorgehender Absatz und Abbildung 5) werden in dieser Perspektive einer Analyse nach verursachenden Sektoren die direkten Emissionen der Sektoren mit der für die deutsche Bauwirtschaft (Anteil Hochbau) erforderlichen Wirtschaftsleistung kombiniert. Gemäss der Perspektive der verursachenden Sektoren trugen die direkten THG-Emissionen der Herstellung von Zement, Kalk und Gips in Deutschland knapp 20 % (19.8 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) zum THG-Fußabdruck der Herstellung, Errichtung und der Modernisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden bei. Weitere 2 % (1.7 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente des THG-Fußabdruckes werden von der Herstellung von Zement, Kalk und Gips im Ausland verursacht. Die direkten THG-Emissionen der Stromproduktion mit Kohle tragen insgesamt 15 % (15.2 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) zum THG-Fußabdruck bei. 11 %-Punkte davon werden durch die Stromproduktion mit Kohle in Deutschland verursacht und 4 %-Punkte durch die Stromproduktion mit Kohle im Ausland.

<sup>8</sup> Inkl. direkte THG-Emissionen der Bauwirtschaft (Anteil Hochbau)

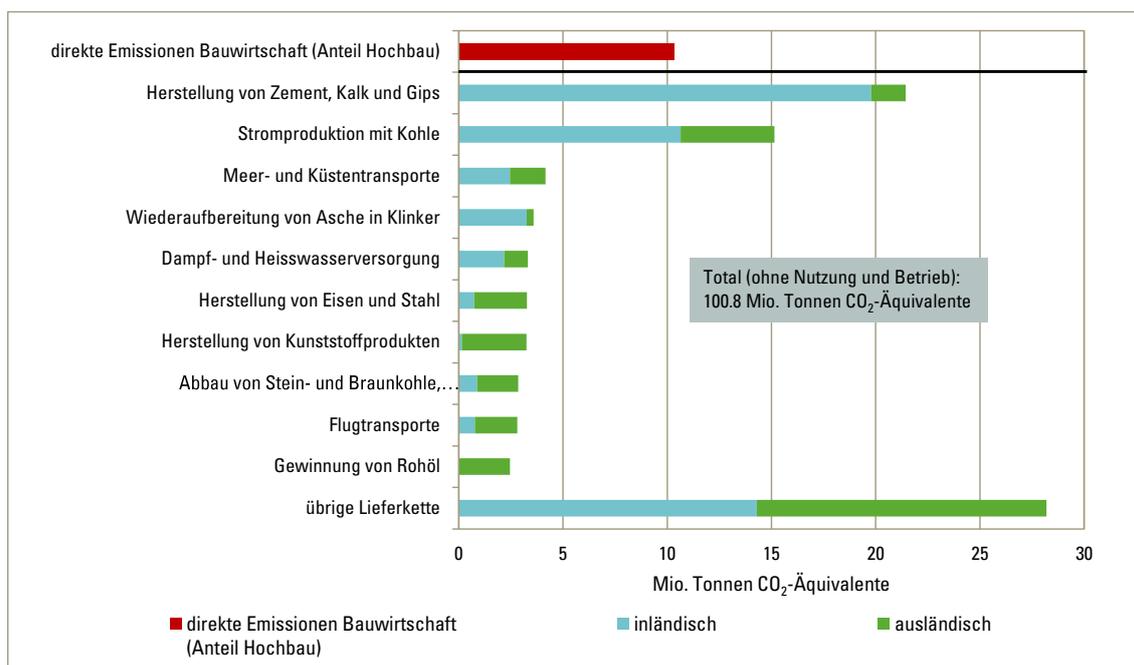


Abbildung 6: Treibhausgas-Fußabdruck der Herstellung, Errichtung und Modernisierung von Wohn- und Nichtwohnbauten nach verursachenden Sektoren.

Gemäss der Perspektive nach verursachenden Sektoren werden 65 % der THG-Emissionen der Herstellung, Errichtung und der Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäuden in Deutschland emittiert.

### 3.4 Vergleich mit den planetaren Grenzen

In Abbildung 7 sind die Anteile der Umweltfußabdrücke der Herstellung, Errichtung, der Modernisierung und der Nutzung und des Betriebes von Wohn- und Nichtwohngebäuden an den globalen Umweltfußabdrücken in parts per million (ppm) dargestellt. Als Vergleichsgrösse ist der Anteil der Wertschöpfung des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» an der Wertschöpfung der gesamten Weltwirtschaft in ppm dargestellt. Die Pfeile zeigen die notwendige Reduktion (siehe Unterkapitel 2.5) der jeweiligen Umweltfußabdrücke zur Einhaltung der planetaren Grenzen.

Den grössten Anteil an den globalen Umweltauswirkungen (in ppm) hat das Handlungsfeld «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» beim THG-Fußabdruck, gefolgt vom Luftverschmutzungs-Fußabdruck. Die Anteile beider Fußabdrücke an den globalen Fußabdrücken sind höher als der Anteil des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» an der globalen Wertschöpfung.

Die in Abbildung 7 aufgezeigte Reduktion der THG-Emissionen basiert auf dem globalen Grenzwert berechnet nach Dao et al. (2015). Die Berechnungen nach Dao et al. (2015) widerspiegeln eine 50 % Wahrscheinlichkeit, den Anstieg der Temperatur bis 2100 unterhalb 2°C gegenüber dem

vorindustriellen Niveau zu halten. Neuere wissenschaftliche Erkenntnisse zeigen auf, dass ein maximaler Anstieg der Temperatur um weniger als 1.5°C anzustreben ist (IPCC 2019). Auf Basis des Paris-Abkommen (UNFCCC 2015) fordern die IPCC Wissenschaftler deshalb Netto-Null Emissionen bis spätestens 2050.

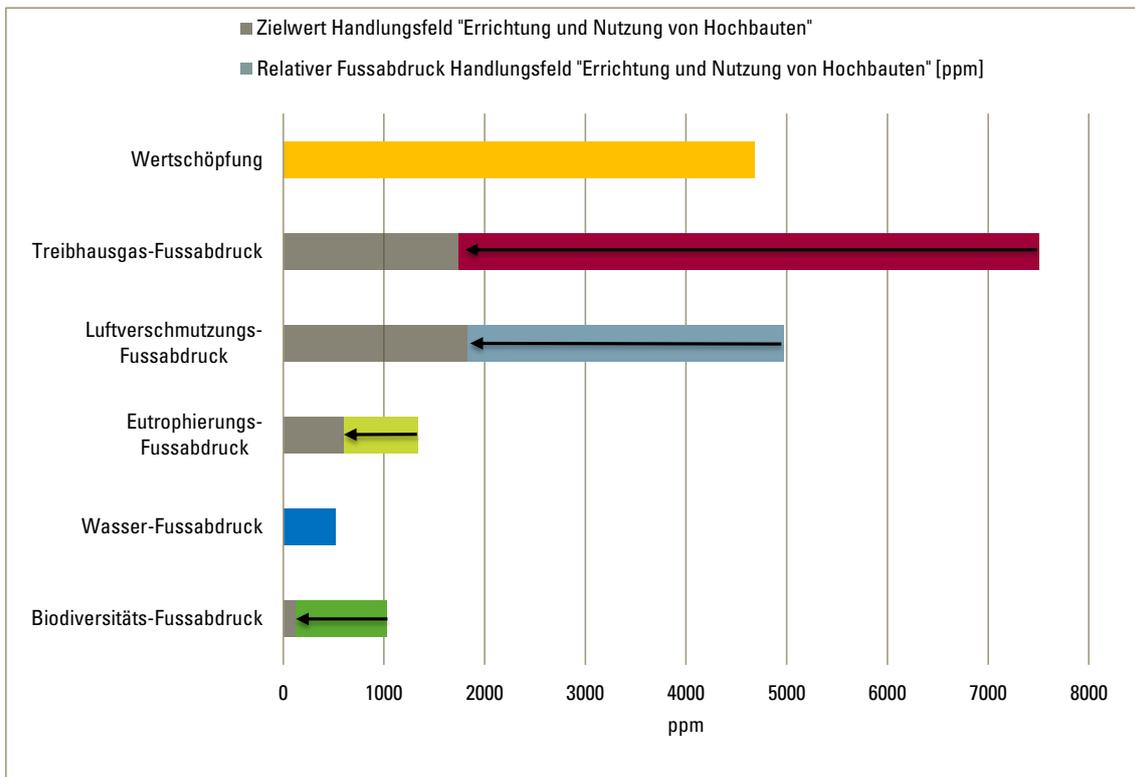


Abbildung 7: Anteile der Umweltfußabdrücke des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» an den jeweiligen heutigen globalen Umweltfußabdrücken in ppm, sowie notwendige Reduktion zur Einhaltung der planetaren Belastungsgrenzen.

## 4 Datenqualität

Die Qualität der in dieser Studie verwendeten Daten wird in Bezug auf die Zielsetzung und die Folgerungen als genügend bis gut eingestuft. Die Daten der Exiobase Version 3.4 sind bis in das Jahr 2011 verfügbar. Für die Analyse des Umweltfußabdruckes der Herstellung, Errichtung und der Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäude von Deutschland das letzte verfügbare Jahr verwendet. Die Wirtschaftsverflechtungen dürften in den darauf folgenden Jahren sich nur wenig verändert haben.

Um eine Vergleichbarkeit mit den im Klimaschutzplan 2050 (BMU 2016) publizierten Daten des Handlungsfelds «Gebäude» zu erreichen, wurde für die Nutzungsphase das Jahr 2014 berücksichtigt. Die Verwendung der zwei unterschiedlichen Bezugsjahre schätzen die Autoren dieser Studie als unproblematisch ein, da Gebäude eine sehr lange Lebensdauer aufweisen und sich die Bauweise und die Nutzungsart der Gebäude über diese kurze Dauer von drei Jahren kaum verändert haben wird.

Für die Analyse der Umweltauswirkungen der Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland wurden in einem ersten Schritt die Umweltauswirkungen der deutschen Bauwirtschaft ausgewertet. Die Wirtschaftsverflechtungen der deutschen Bauwirtschaft enthalten Hoch- und Tiefbauprozesse. Es ist nicht möglich anhand der verfügbaren Daten in Exiobase, die Umweltauswirkungen der deutschen Bauwirtschaft in die beiden Bereiche Hoch- beziehungsweise Tiefbau aufzuteilen. Daher wurde in einem zweiten Schritt der Anteil des Hochbaus an den gesamten Bauinvestitionen ermittelt. Die Umweltauswirkungen dieses Anteils wurden dann den Wohn- und Nichtwohngebäuden zugeordnet. Dieses Vorgehen erlaubt eine Abschätzung der Umweltauswirkungen der Herstellung, Errichtung, und der Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäuden und wird von den Autoren dieser Studie als passend eingestuft.

Es ist eine Betrachtung der Situation in konkreten Bezugsjahren einer volkswirtschaftlichen Statistik/Berichterstattung. Die Daten werden u.a. durch die konkrete Bautätigkeit in diesem Jahr sowie Art und Menge hergestellter Bauprodukte beeinflusst. Die in dieser Studie ausgewiesenen Größenordnungen sind nicht auf den Lebenszyklus von Einzelgebäuden übertragbar.

In Tabelle 4.1 ist der Vergleich der direkten THG-Emissionen der Zement- und Stahlherstellung basierend auf den Daten der Exiobase Version 3.4 Datenbank und statistischen Daten dargestellt. Die direkten THG-Emissionen gemäss Exiobase v3.4 sind für beide Sektoren höher als die Literaturangaben. Daraus lässt sich schliessen, dass die Daten aus Exiobase eine Unschärfe mit sich bringen, jedoch die Grössenordnung mit den Literaturangaben übereinstimmt.

Tabelle 4.1: Vergleich der direkten THG-Emissionen basierend auf Daten der Exiobase Version 3.4 mit Literaturangaben.

Sektor	Sektor in Exiobase v.3.4	THG Emissionen (Exiobase v3.4)	THG Emissionen (statist. Daten)	Unterschied (Literaturangabe = 100%)
		Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> -Äq.		
Zementherstellung	Herstellung von Zement, Kalk und Gips	25	19*	132%
Stahlherstellung	Herstellung von Metall-erzeugnissen	2	16**	138%
	Herstellung von Eisen und Stahl	19		

\* 0.556 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq./Tonne Zement (vdZ 2012); Produktionsmenge: 33.540.000 Tonnen<sup>9</sup>

\*\* UBA 2020

Gemäss Rüter (2017) gehen 8 % der deutschen THG-Emissionen auf die Herstellung und Entsorgung von Baumaterialien und Gebäuden zurück. Gemäss den Berechnungen in der hier vorliegenden Studie ist der Anteil der Herstellung, Errichtung und Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäuden an den deutschen THG-Emissionen im Jahr 2014 7 %.

Da der Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 (KBOB et al. 2016) auch repräsentative Datensätze für Deutschland (Strommix) und Europa (Brenn- und Treibstoffbereitstellung) enthält, wird der Datenbestand von den Autoren dieser Studie als geeignet betrachtet.

<sup>9</sup> Online unter: <https://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/a-wichtige-daten-auf-einen-blick/> zuletzt abgerufen am: 8.9.2020.

## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

### 5.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie hat aufgezeigt, dass 40 % (362 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) der THG-Emissionen von Deutschland durch die Herstellung, Errichtung, die Modernisierung und durch die Nutzung und den Betrieb von Wohn- und Nichtwohngebäuden verursacht werden. 75 % des THG-Fußabdruckes des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» (297 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) und damit 33% der nationalen THG-Emissionen wurden durch die Nutzung und den Betrieb der Wohn- und Nichtwohngebäuden verursacht.

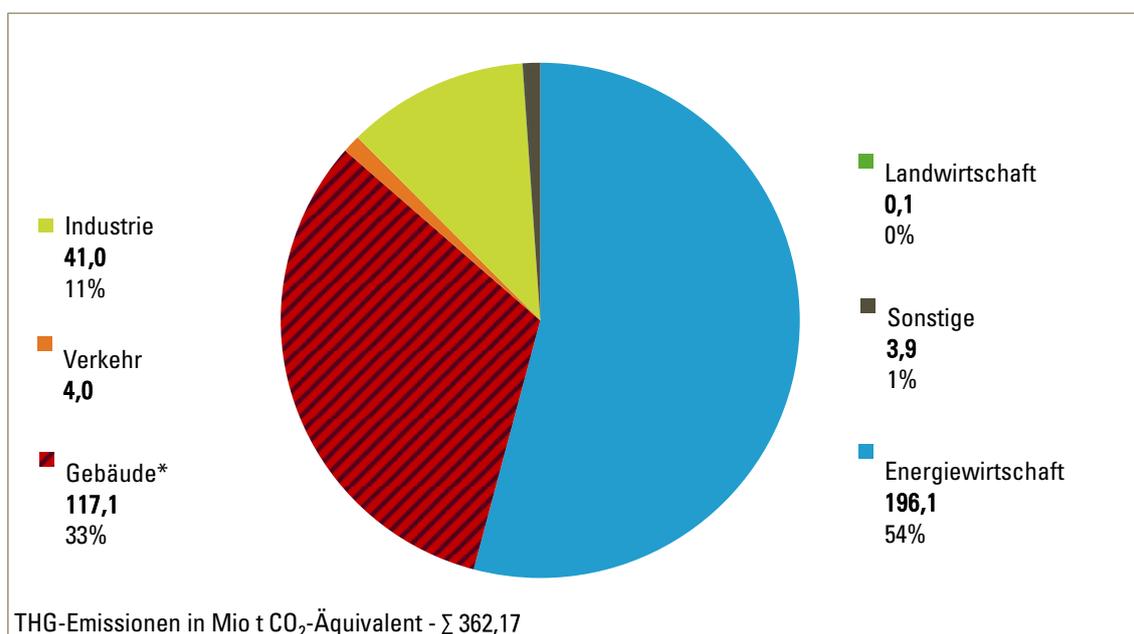


Abbildung 8: Emissionen der Produktherstellung sowie der Transport und Baustellenprozesse; indirekte Emissionen aus dem Betrieb von Hochbauten (Strom und Wärme); \*direkte Emissionen aus dem Betrieb von Hochbauten (entspricht dem Handlungsfeld Gebäude im Klimaschutzplan 2050). Berechnungen durch Treeze Ltd.

25 % des THG-Fußabdruckes des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» (65 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Inland und damit 7 % der nationalen THG-Emissionen, 35 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Ausland) wurde durch die vorgelagerten Lieferketten der Herstellung, Errichtung und Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäude und durch die direkten Emissionen der Bauwirtschaft (Anteil Hochbau) verursacht. Bei der Herstellung, Errichtung und der Modernisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Baustoffindustrie + Bauwirtschaft + Lieferketten weiterer Zulieferer) verursachen die Herstellung von Zement, Kalk und Gips mit 21 % und die Stromproduktion mit Kohle mit 15 % die größten Anteile der THG-Emissionen der Herstellung, Errichtung und der Modernisierung.

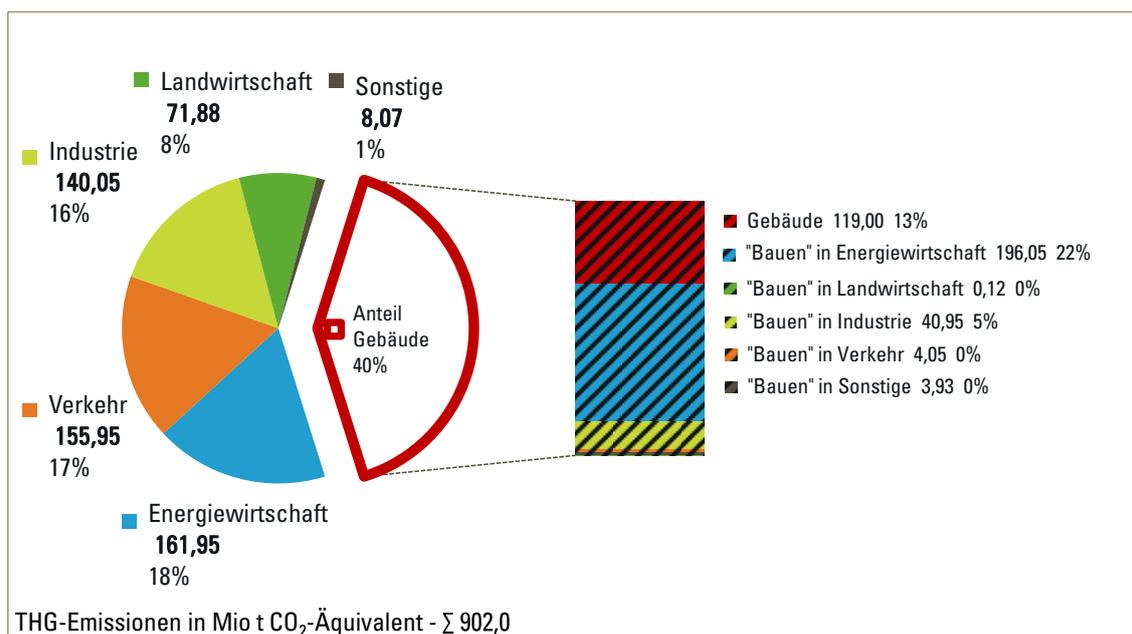


Abbildung 9: THG-Emissionen durch Handlungsfeld „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“, Total gemäss Klimaschutzplan 2050 aus: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), 2016, Klimaschutzplan 2050, S. 8; Berechnungen durch Treeze Ltd.

Die Beurteilung hinsichtlich der planetaren Grenzen hat aufgezeigt, dass eine globale Reduktion der THG-Emissionen um 77 % notwendig ist, um innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen der Erde zu bleiben. Zur Aufteilung der notwendigen Reduktion auf die Handlungsfelder wurde in dieser Studie davon ausgegangen, dass alle Handlungsfelder ihre THG-Emissionen mit derselben Quote reduzieren müssen. Die handlungsfeldspezifische Reduktion der THG-Emissionen für das Handlungsfeld «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» beträgt demzufolge 77 %. Eine sektor- oder handlungsfeldspezifische Vorgabe von Minderungszielen würde Zusatzbetrachtungen notwendig machen.

Die obengenannten notwendigen Reduktionen basieren auf dem globalen Grenzwert berechnet nach Dao et al. (2015). Die Berechnungen nach Dao et al. (2015) widerspiegeln eine 50 % Wahrscheinlichkeit, den Anstieg der Temperatur bis 2100 unterhalb 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu halten. Neuere wissenschaftliche Erkenntnisse zeigen auf, dass ein maximaler Anstieg der Temperatur um weniger als 1,5°C anzustreben ist (IPCC 2019). Auf Basis des Paris-Abkommen (UNFCCC 2015) fordern die IPCC Wissenschaftler deshalb Netto-Null Emissionen bis spätestens 2050.

## 5.2 Schlussfolgerungen

Die hier präsentierte sektorübergreifende Betrachtung hat gezeigt, dass beim Handlungsfeld «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» pro Tonne direkt emittierte Treibhausgase (z.B. durch die Erzeugung von Raumwärme) zusätzlich noch 2.4 Tonnen versteckte Treibhausgasemissionen (indirekt durch Energiebereitstellung und durch die Herstellung, Errichtung und der Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäude) verursacht werden. Damit erhalten Klimaschutzmassnahmen im Gebäudesektor eine deutlich höhere Bedeutung.

Gleichzeitig ist erkennbar, dass weitergehende Massnahmen und Regulierungen zur Reduktion des Energiebedarfs des Gebäudebestands Deutschlands helfen, die Treibhausgasemissionen, die einerseits bei der Nutzung der Gebäude und andererseits in der Energiewirtschaft (Kraftwerke) emittiert werden, deutlich zu senken.

Während die Bauwirtschaft selbst, also das Bauen auf der Baustelle (hier Bauprozesse) vergleichsweise geringe Treibhausgasemissionen verursacht, emittieren die Baustoffindustrie (z.B. Hersteller von Zement, Kalk und Gips, Metallen und Kunststoffen) und weitere direkte Zulieferer der Bauwirtschaft Treibhausgasemissionen in beachtlicher Höhe. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer Einbeziehung von vorgelagerten/indirekten Umweltauswirkungen in eine sektorübergreifende Betrachtung. Diese Emissionen weisen weitere Emissionsminderungspotenziale auf, einmal im Bereich der Entwicklung der Nachfrage nach entsprechenden Bauprodukten und andererseits durch den Übergang zu emissionsarmen und klimaverträglichen Technologien. Durch eine produktneutrale und technologieoffene Herangehensweise werden sämtliche Hersteller motiviert, den Dekarbonisierungsprozess voranzutreiben.

## 5.3 Reduktionspotenzial

Die sektorübergreifende Analyse der Umweltauswirkungen des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» erlaubt ein Identifizieren direkter und indirekter Reduktionspotenziale. Neben der Reduktion der direkten Umweltauswirkungen spielt das Lieferketten-Management eine wichtige Rolle.

Die grössten Reduktionspotenziale liegen bei der Verbesserung der Energieeffizienz der Gebäude, bei der Auswahl von Energieträgern zur Erzeugung von Raumwärme, Klimakälte, Warmwasser und Strom und bei der Herstellung und in den Lieferketten von Zement, Kalk und Gips, Kunststoffprodukten und Stahlerzeugnissen.

Durch die weitere und deutliche Steigerung der Energieeffizienz bei Neu- und Bestandesbauten können der Energiebedarf durch Nutzung und Betrieb und damit auch die mit der Energieträgerbereitstellung verbundenen Umweltauswirkungen reduziert werden. Zusätzliche durch Energieeffizienzmassnahmen verursachte Umweltauswirkungen sind in der Regel deutlich geringer als die erzielten Einsparungen. Durch den Wechsel von fossilen auf erneuerbare

Energien können die Treibhausgasemissionen und Umweltauswirkungen der Raumwärme, Klimakälte, von Warmwasser und Strom deutlich gesenkt werden.

Schliesslich kann auch die Baustoffindustrie einschließlich vorgelagerter Prozesse ihren Beitrag zur Erreichung des Netto-Null-Ziels beitragen und ihre Herstellungsprozesse weitgehend CO<sub>2</sub>-frei gestalten oder die noch entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Investitionen in sogenannten Negative Emissionstechnologien oder in das Entziehen des CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre ausgleichen.

#### 5.4 Ausblick

Die sektorübergreifende Analyse der Umweltauswirkungen fokussierte auf die Aktivitäten des Hochbaus. Eine analoge Betrachtung liesse sich zu den Aktivitäten des Tiefbaus machen. Bauwerke des Tiefbaus (Brücken, Tunnels, Strassen, Bahntrassen etc.) haben in der Regel einen deutlich geringeren oder keinen Energieverbrauch in der Nutzungsphase. Deshalb dürfte die relative Bedeutung der Bauprozesse zur Errichtung von Tiefbauten und insbesondere der Baustoffindustrie für dieses Handlungsfeld grösser sein.

Auch stellt sich die Frage, wie die sich die Verflechtungen der deutschen Wirtschaft und die Wertschöpfungsketten des Hochbaus verändern würden, wenn die heutige Sanierungsrate von 1 % auf 2 % verdoppelt würde. Dies führt u.a. zu einer verstärkten Nachfrage nach Bauprodukten.

Die kontinuierliche Veränderung des deutschen Strommixes (Ausstieg aus Kernenergie und Kohlestrom, Ausbau der Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien) wird Auswirkungen auf die Umweltfußabdrücke des Handlungsfelds «Errichtung und Nutzung von Hochbauten» haben. Die Umweltauswirkungen der Nutzung und des Betriebes von Gebäuden wird sinken. Gleichzeitig wird die Bedeutung der durch die Baustoffindustrie verursachte Umweltauswirkungen zunehmen, sofern die Baustoffindustrie ihre Emissionen nicht ebenfalls senken kann.

Es wird vorgeschlagen, in weiteren Betrachtungen die aufgeworfenen Fragen zu untersuchen, u.a. die zukünftigen Reduktionspotenziale der deutschen Baustoffindustrie abzuschätzen und auf Basis des aus dem Paris-Abkommen ableitbaren, erforderlichen Reduktionsbedarfs Strategien zum Erreichen der Ziele zu entwickeln.

## 6 Anhang

### 6.1 Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AWARE	Available Water REmaining
Äq.	Äquivalente
DE	Deutschland
FP	Fußabdruck (englisch: footprint)
GWP	Treibhauspotential (engl. global warming potential)
IOT	Input-Output Tabelle
IPCC	International Panel of Climate Change
Mio.	Millionen
MRIOT	Multiregionale Input-Output Tabelle
PDF	potentially disappeared fraction
ppm	parts per million
THG	Treibhausgas

### 6.2 Literatur

Alig M., Frischknecht R., Nathani C., Hellmüller P. and Stolz P. (2019) Umweltatlas Lieferketten Schweiz. treeze Ltd.& Rütter Sococo AG, Uster & Rüslikon.

Alig M., Frischknecht R., Krebs L., Ramseier L. and Stolz P. (2020) LCA of climate friendly construction materials. treeze Ltd., Uster, Switzerland.

BMU (2016) Klimaschutzplan 2050. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) Berlin, Deutschland.

BMWi (2019) Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen II - Energiedaten Tabelle 7b. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, online unter: [https://www.bmwi.de/SiteGlobals/BMWI/Forms/Listen/Energiedaten/energiedaten\\_Formular.html?&addSearchPathId=304670](https://www.bmwi.de/SiteGlobals/BMWI/Forms/Listen/Energiedaten/energiedaten_Formular.html?&addSearchPathId=304670).

BMWi (2020a) Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren - Energiedaten Tabelle 6a. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, online unter: [https://www.bmwi.de/SiteGlobals/BMWI/Forms/Listen/Energiedaten/energiedaten\\_Formular.html?&addSearchPathId=304670](https://www.bmwi.de/SiteGlobals/BMWI/Forms/Listen/Energiedaten/energiedaten_Formular.html?&addSearchPathId=304670).

BMWi (2020b) Aufkommen und Verwendung von Fernwärme - Energiedaten Tabelle 25. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Online unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Energietraeger/energiedaten-energietraeger-32.html>.

Boulay A.-M., Bare J., Benini L., Berger M., Lathuillière M., Manzardo A., Margni M., Motoshita M., Núñez M., Pastor A. V., Ridoutt B., Oki T., Worbe S. and Pfister S. (2017) The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on Available Water REmaining (AWARE). In: The International Journal of Life Cycle Assessment, pp. 1-11, 10.1007/s11367-017-1333-8.

- Chaudhary A., Verones F., de Baan L. and Hellweg S. (2015) Quantifying Land Use Impacts on Biodiversity: Combining Species–Area Models and Vulnerability Indicators. In: *Environmental Science & Technology*, 49(16), pp. 9987-9995.
- Dao H., Friot D., Peduzzi P., Bruno C., Andrea D. B. and Stefan S. (2015) Environmental limits and Swiss footprints based on Planetary Boundaries. UNEP/GRID-Geneva & University of Geneva, commissioned by the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN), Geneva, Switzerland.
- Frischknecht R. and Büsser Knöpfel S. (2013) Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 1330. Bundesamt für Umwelt, Bern, retrieved from: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01750/index.html?lang=de>
- Frischknecht R. and Jolliet O. (ed.) (2017) *Global Guidance on Environmental Life Cycle Impact Assessment Indicators*, Volume 1. United Nations Environment Programme, UNEP, Paris.
- Frischknecht R., Nathani C., Alig M., Stolz P., Tschümperlin L. and Hellmüller P. (2018) *Umwelt-Fußabdrücke der Schweiz: Zeitlicher Verlauf 1996-2015*. treeze Ltd / Rütter Soceco AG, im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Uster / Rüschlikon.
- Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M. A. J., De Schryver A., Struijs J. and van Zelm R. (2009) *ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*. First edition. Report I: Characterisation, NL, retrieved from: [icia-recipe.net/](http://icia-recipe.net/).
- IPCC (2013) *The IPCC fifth Assessment Report - Climate Change 2013: the Physical Science Basis*. Working Group I, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.
- IPCC (2019) *Global Warming of 1.5°C; An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. International Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- KBOB, eco-bau and IPB (2016) *KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016; Grundlage für die KBOB-Empfehlung 2009/1:2016: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2016*. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, retrieved from: <http://www.ecoinvent.org>.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. World Resource Institute, Washington DC, USA.
- Nathani C., Frischknecht R., Hellmüller P., Alig M., Stolz P. and Tschümperlin L. (2019) *Environmental hotspots in the supply chain of Swiss companies*. Rütter Soceco AG & treeze Ltd., Rüschlikon & Uster.
- PRé Consultants (2020) *SimaPro 9.1.0.7*, Amersfoort, NL.
- Rüter S. (2017) *Umweltrelevanz des Bausektors – Holz*, Vortrag 2. Akteursforum im Projekt StaRDÄMM.
- Sommer H., Lieb C., Amacher M., Maibach M., Sutter D., Bieler C., Zandonella R., Heldstab J., Rööslü M., Vienneau D., Perez L., Buser H. and Künzle T. (2014) *Externe Kosten des Verkehrs 2010: Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten*. EcoPlan / Infrac, Bern / Zürich CH.
- Stadler K., Wood R., Bulavskaya T., Södersten C., Simas M., Schmidt S., Usubiaga A., Acosta-Fernández J., Kuenen J., Bruckner M., Giljum S., Lutter S., Merciai S., Schmidt J., Theurl M., Plutzer C., Kastner T., Eisenmenger N., Erb K., Koning A. and Tukker A. (2018) *EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables*. In: *Journal of Industrial Ecology*, 22(3), pp., <https://doi.org/10.1111/jiec.12715>.
- Stadler K. (2019) *pymrio v0.4.1*, Trondheim, retrieved from: <https://github.com/konstantinstadler/pymrio>.

Statistisches Bundesamt (2020) Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Arbeitsunterlage Investitionen. Statistisches Bundesamt (Destatis), Erschienen am 10. September 2020, retrieved from: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Inlandsprodukt/investitionen-xlsx-5811108.html>.

Statistisches Bundesamt (o.J.-a) Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung an Letztverbraucher, Eigenverbrauch der Wasserwerke und Wasserverluste. Statistisches Bundesamt Online unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserwirtschaft/oeffentliche-wasserversorgung#45-milliarden-kubikmeter-trinkwasser>.

Statistisches Bundesamt (o.J.-b) FS 3 Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, R. 5.1 Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung, verschiedene Jahrgänge. Statistisches Bundesamt, Online unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/siedlungs-verkehrsf-laechen#anhaltender-flachenverbrauch-fur-siedlungs-und-verkehrszwecke>.

Steffen W., Richardson K., Rockström J., Cornell S. E., Fetzer I., Bennett E. M., Biggs R., Carpenter S. R., de Vries W., de Wit C. A., Folke C., Gerten D., Heinke J., Mace G. M., Persson L. M., Ramanathan V., Rayers B. and Sörlin S. (2015) Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. In: *Science*, 347(6223), pp. 736-747.

Suh S. and Huppes G. (2002) Missing Inventory Estimation Tool Using Extended Input-Output Analysis. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(3), pp. 134-140.

Tukker A., Bulavskaya T., Giljum S., de Koning A., Lutter S., Simas M., Stadler K. and Wood R. (2014) The Global Resource Footprint of Nations; Carbon, water, land and materials embodied in trade and final consumption calculated with EXIOBASE 2.1. CML, TNO, WU, NTNU, Leiden/Delft/Vienna/Trondheim.

UBA (2020) Nationale Trendtabellen für die Treibhausgas-Emissionen nach Sektoren des Klimaschutzgesetzes 1999-2018; Stand zur Vorjahresschätzung: 11.03.2020. Umweltbundesamt (UBA), <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>.

UNEP (2014) The Emissions Gap Report 2014. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi.

UNFCCC (2015) Adoption of the Paris Agreement, Vol. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1 (ed. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)), Paris.

vdZ (2012) Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2011. Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf.