

Ressourcenminimierung im urbanen Kontext

Innerhalb der Systemgrenze Erde sind die vom Menschen nutzbaren Ressourcen faktisch begrenzt. Dennoch steigt der Verbrauch natürlicher Ressourcen durch ein anhaltendes Wachstum der Weltbevölkerung und einen Anstieg des Wohlstands in vielen Regionen jährlich weiter an. Die gebaute Umwelt (v. a. in Form von Städten und urbanen Strukturen) gehört zu den Haupttreibern des Ressourcenverbrauchs. In der hier vorgestellten Studie wird in einer phänomenologischen Untersuchung die Auswirkung bestimmter Parameter auf den Ressourcenverbrauch von typischen Wohnbauten analysiert. Darin werden das klassische Einfamilienhaus, vier- und sechsgeschossige Mehrfamilienhäuser und 20- bzw. 40-geschossige Wohnhochhäuser quantifiziert und in drei unterschiedlichen urbanen Dichten in einem städtischen Kontext betrachtet. Darauf aufbauend zeigt eine Fallstudie Optimierungspotenzial für Hochhäuser auf, die sich unter bestimmten Umständen als eine nachhaltige Gebäudetypologie erweisen können.

Stichworte Ressourcen; Emissionen; urbane Strukturen; Flächenverbrauch; Hochhaus

Minimal resource consumption in the urban context

Within the earth's boundaries, global resources are limited. However, a continuing growth of global population and an accompanying increase of wealth, causes an annual increase of resource consumption. The built environment, especially urban structures are the main drivers for resource consumption. In phenomenological investigation, the study, summarized here, analyses the impacts of certain parameters of typical urban residential buildings on resource consumption. Herein, the classic single-family house, four- and six-storey apartment buildings and 20- and 40-storey high-rise residential buildings are quantified and put in relation in three different urban densities. In conclusion, a case study shows the optimisation potential of high-rise buildings that can become a sustainable building typology under certain circumstances.

Keywords resources; embodied emissions; urban structures; area consumption; high-rises

1 Hintergründe

1.1 Einleitung

Seit der Entstehung der ersten urbanen Strukturen im 9. Jahrtausend v. Chr. [1] ist das menschliche Habitat geprägt von Gebäuden und deren versorgender bzw. erschließender Infrastruktur. Als Konsequenz eines permanenten Strebens nach Wachstum und Wohlstand ebenso wie eines rasanten Bevölkerungswachstums vervielfachte sich das anthropogene Materiallager zwischen 1900 und 2010 um den Faktor 23 [2]. Die Summe der Rohstoffe, die in Gebäuden, Infrastruktur und dauerhaften Gütern wie Maschinen o. Ä. gebunden sind, erreichte 2010 792 Gt (= 792 Mrd. t) und nimmt seitdem jährlich weiter zu. Da die verfügbare Menge an Rohstoffen innerhalb des Systems Erde begrenzt ist, wird die Weltbevölkerung zwangsläufig mit einer Ressourcenverknappung konfrontiert werden, die v. a. das Bauwesen als größten Verbraucher treffen wird.

1.2 Urbanisierung

Im Jahr 2005 konsumierten Städte 75% der globalen Energie- und Materialflüsse [3]. Urbane Strukturen haben somit einen sehr großen Einfluss auf einen zukunftsfähigen Umgang mit den globalen, endlichen Ressourcen.

Der Grad der Urbanisierung hat in den letzten 10.000 Jahren stetig zugenommen. Im Jahr 2007 hatten erstmalig mehr Menschen ihren Lebensraum in urban geprägten Gebieten als in ländlichen Regionen [4]. Hochrechnungen zeigen, dass in den Jahren bis 2030 eine zusätzliche (Netto-)Summe von 2,46 Mrd. Menschen gebaute Lebensräume in den bestehenden oder neu entstehenden Städten benötigen wird. Die größte Frage der Zukunft wird sein, wie mehr gebaute Umwelt mit weniger Material geschaffen werden kann [5].

1.3 Emissionen und Ressourcen im Bauwesen

Bis vor Kurzem lag der Fokus von Forschungen und von politischen Maßnahmen auf der Reduktion der betriebsbedingten Gebäudeenergie. So entstanden in Deutschland die Wärmeschutzverordnung, die Energieeinsparverordnung und das aktuell geltende Gebäudeenergiegesetz. Ein Gebäudeemissionsgesetz oder Gebäudekreislaufgesetz, wie von Prof. Werner Sobek an anderer Stelle gefordert, wird bislang nicht umgesetzt. In [6, 7] wird aufgezeigt, dass das Bauwesen für bis zu 50% der globalen Emissionen verantwortlich ist und die sog. grauen Emissionen zukünftig einen immer größeren Anteil daran einnehmen werden. Allmählich steigt im Bauwesen das Bewusstsein um den Stellenwert der grauen Emissionen sowie des Ressourcenverbrauchs. Eine

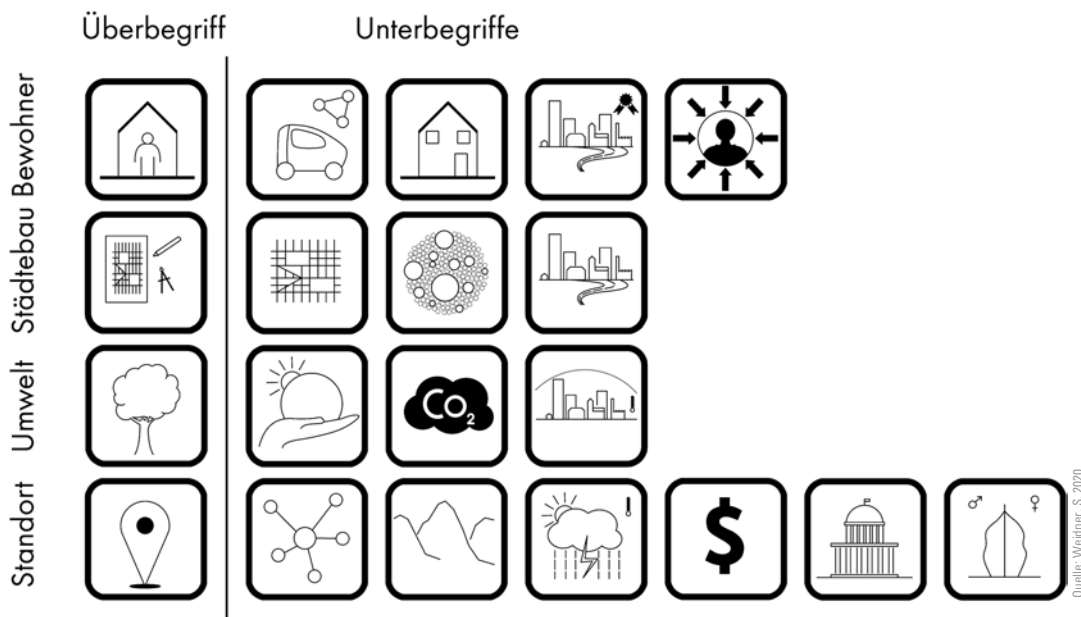


Bild 1 Parameter erster und zweiter Hierarchie zur Begriffsdefinition von nachhaltigen urbanen Strukturen
Parameters of first and second hierarchy for defining the phrase of sustainable urban structures

wesentliche Voraussetzung für einen Paradigmenwechsel ist die Steigerung der Transparenz bez. der verbauten Massen im Bauwesen. Erst mit einer vollumfänglichen Wissensgrundlage lassen sich Optimierungen erarbeiten.

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Studie [8] zur Ressourcenminimierung von urbanen Strukturen vorgestellt und anschließend Rückschlüsse für eine Anwendung der Erkenntnisse in der Praxis aufgezeigt.

2 Urbane Strukturen

2.1 Nachhaltigkeit

Um jene Aspekte einer urbanen Struktur zu identifizieren, die den Ressourcenverbrauch beeinflussen, wurde zu Beginn der Untersuchung eine Parameterstudie durchgeführt. Daraus ergaben sich vier übergeordnete Kategorien, die wiederum in zahlreiche Einzelkriterien unterteilt werden können (Bild 1).

Die Multiparameterfrage nach einer Ressourcenminimierung im urbanen Raum weist eine Vielzahl an Faktoren auf, die in gegenseitiger Abhängigkeit passiv oder aktiv den Ressourcenverbrauch von urbanen Strukturen beeinflussen können. Diese reichen von den Wohn- und Lebensgewohnheiten der Bewohner:innen bis hin zu Standortabhängigkeiten wie dem Bruttoinlandsprodukt oder der (Verkehrs-)Anbindung. Es zeigt sich, dass einige Faktoren, wie z. B. das Wohnerverhalten, nur schwer von den Bauschaffenden beeinflusst werden können. Zwar können durch veränderte Angebote an Wohnungsgrößen oder durch Bebauungspläne gewisse Vorgaben gemacht werden; ob diese jedoch angenommen werden, lässt sich nicht steuern.

Tatsächlich von Architekt:innen und Planer:innen beeinflussbar sind allerdings folgende Parameter, die in der weiteren Untersuchung quantifiziert und miteinander in Korrelation gesetzt werden:

- Ressourcenverbrauch von Gebäuden und Verkehrsanlagen
- Flächenverbrauch
- Bauliche Dichte
- Gebäudetypologie
- Bebauungsstruktur

Diese Parameter wurden auf einer virtuellen Fläche von 1 km² in Form von 15 Szenarien miteinander verglichen. Daraus konnten anschließend Rückschlüsse zur Beantwortung der Frage gezogen werden, wie sich der Ressourcen- und Flächenverbrauch in Abhängigkeit von der Bebauungsstruktur und der baulichen Dichte verändert.

2.2 Rahmenbedingungen

Die grundsätzlichen Rahmenbedingungen der Untersuchung, die während der Studie unveränderlich blieben, umfassen zum einen den Baustandard und die Standortfaktoren und zum anderen die Größe und Bewohneranzahl der Wohneinheiten. Unabhängig von der Gebäudetypologie beherbergen Wohneinheiten in dieser Studie 2,2 Personen mit jeweils 40 m² Wohnraum (= Nutzungsfläche, NUF) pro Person. Dies entspricht im Wesentlichen dem europäischen Median [9]. Die phänomenologische Studie legt den Fokus auf Wohnnutzung, weshalb Gebäudetypologien für eine typische urbane Wohnsiedlung ausgewählt wurden. Neben dem klassischen Einfamilienhaus wurden Mehrfamilienhäuser in viergeschossiger Zeilenbebauung und sechsgeschossiger Blockrandbebauung sowie ein 20- und ein 40-geschossiges solitäres

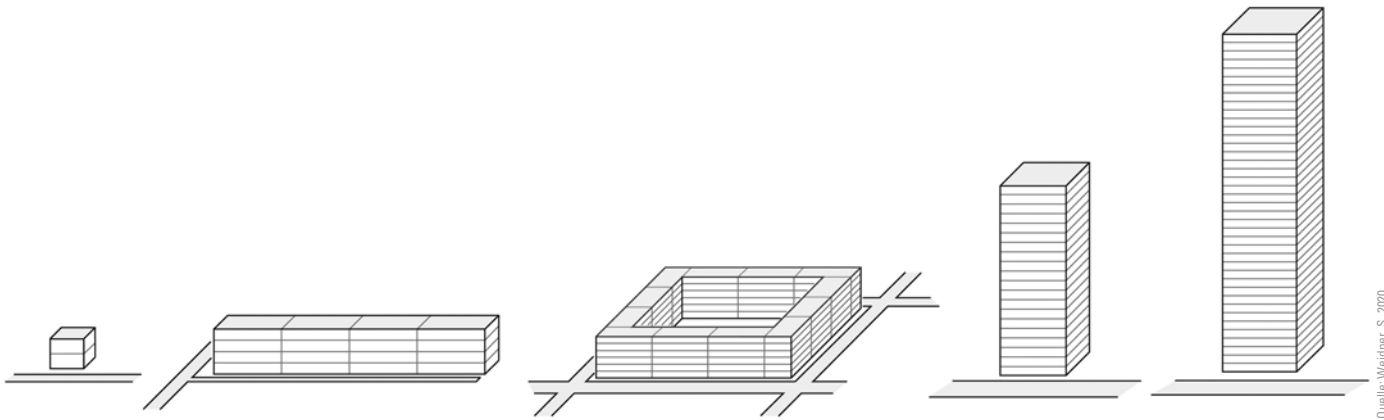


Bild 2 Schematische Darstellung der untersuchten urbanen Strukturen, Darstellung maßstabslos
Schematic depiction of urban structures in this study

Wohnhochhaus untersucht. Bild 2 zeigt die fünf Untersuchungsobjekte in einer Übersicht. Alle Gebäude sind in Massivbauweise (Stahlbeton bzw. Mauerwerk) ausgeführt, da sie die meistverbreitete Bauweise in Deutschland ist und Alternativen wie z. B. die Holzbauweise bislang nur einen relativ geringen Anteil haben (auch wenn dieser langsam zunimmt).

Zur Fragestellung, welche Auswirkung eine Veränderung der urbanen Dichte auf den Verbrauch von Ressourcen hat, wurden Dichten von 400 Einwohner pro km² als dünn besiedelte Struktur, 4000 Einwohner pro km² als typische durchschnittliche Dichte von mittelgroßen Städten und 20.000 Einwohner pro km² stellvertretend für sehr dicht besiedelte Strukturen miteinander verglichen.

2.3 Quantifizierung

2.3.1 Flächenverbrauch

Versiegelte und damit überbaute Flächen bedeuten stets einen Verbrauch der natürlichen Ressource Boden. Grundsätzlich gilt: Je höher ein Gebäude, desto geringer der Flächenverbrauch pro Bewohner bzw. Wohneinheit. Diese These ist wohl kaum umstritten, dennoch ist anzumerken, dass die Gleichung keinem linearen Verlauf folgt, da die Geschossflächeneffizienz und damit auch die Grundfläche stark von der Gebäudetypologie abhängt.

Vertikale und horizontale Verkehrsflächen sowie Technik- und Konstruktionsgrundflächen können sich je Bauwerk und Geschossigkeit deutlich unterscheiden. Die Bruttogeschossfläche nach DIN 277-1:2016-01, die sich aus den 88 m² NUF pro Wohneinheit ergibt, variiert demnach je nach Gebäudetyp zwischen 126 m² für das viergeschossige Mehrfamilienhaus und 157 m² für das 40-geschossige Hochhaus. Die Unterschiede liegen v. a. darin begründet, dass die Konstruktions- und Technikgrundfläche bei EFH und Hochhäusern einen größeren Anteil einnimmt als bei MFH. Mit zunehmender Höhe nehmen dann die Anforderungen an die vertikale Erschließung und damit auch die Verkehrsfläche zu. Die ursprünglichen 88 m² erfahren demnach eine Steigerung um bis zu 178%. Tab. 1 stellt den berechneten Flächenverbrauch je Gebäudetyp dar. Die Nutzungsgrundfläche einer Wohneinheit (WE) bleibt stets unverändert bei 88 m² und jede WE umfasst 2,2 Einwohner.

Auch die Erschließung der Baukörper verursacht Ressourcenverbrauch, da Wohnwege, -straßen, Sammel- und Quartiersstraßen für eine verkehrstechnische Anbindung der Gebäude benötigt werden. Je nach urbaner Dichte und Bebauungssituation wurden phänomenologisch die Straßentypen mit durchschnittlichen Straßenbreiten in die Szenarien integriert. Grundsätzlich hängt der Flächenbedarf für fließenden Verkehr pro Einwohner v. a. von der Bevölkerungsdichte ab, wie aus Tab. 2 hervorgeht.

Tab. 1 Übersicht über den Flächenverbrauch je Untersuchungsobjekt; Abkürzungen: Einfamilienhaus (EFH), Mehrfamilienhaus (MFH), Hochhaus (HH), Einwohner (EW), Wohneinheit (WE)
Overview of the area consumption per investigated object

	EFH	MFH 4	MFH 6	HH 20	HH 40
Geschosse	2	4	6	20	40
BGF/WE	131 m ²	126 m ²	133 m ²	147 m ²	157 m ²
Grundfläche	65,5 m ²	1008 m ²	4788 m ²	590,5 m ²	942,5 m ²
Einwohner	2,2	70,4	475,2	176	528
Flächenverbrauch/EW	29,8 m ²	14,3 m ²	10,1 m ²	3,6 m ²	1,8 m ²

Tab. 2 Durchschnittliche Fläche in m² pro Einwohner (EW) je urbane Dichte, basierend auf [10]
Intermediate area in m² per citizen [10]

EW/km ²	5000	10.000	15–20.000	30–35.000	40.000
m ² /EW	24,0	13,0	9,3–5,6	4,8–4,3	4,0

2.3.2 Ressourcenverbrauch

Die Quantifizierung des Ressourcenverbrauchs der fünf unterschiedlichen Gebäude ist ein zentraler Bestandteil der hier vorgestellten Studie. In der Literatur existieren bislang nur wenige Veröffentlichungen zum Thema Ressourcenverbrauch von Gebäuden. Diesen Umstand gilt es so bald wie möglich zu beseitigen und mit der Forderung einer transparenten Darlegung der verbauten Materialmengen das Bewusstsein von Bauschaffenden zu schärfen.

Bei Einfamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern bieten ein paar wenige Quellen [11, 12] einen Ansatzpunkt zur Quantifizierung. In Tab. 3 werden daraus abgeleitet die durchschnittlichen Werte dargelegt. Dabei wurden die Gründung, die Geschossdecken, horizontale und vertikale Tragwerkelemente, das Dach und die Fassade in die Berechnung mit einbezogen.

Bild 3a zeigt die Durchschnittswerte mit einem Korridor von ± 20% und den Abgleich mit Vergleichswerten, die zum größten Teil innerhalb des Korridors verlaufen. Es wird deutlich, dass das Einfamilienhaus sehr ressourcenintensiv ist, während die Stapelung von Geschossen und das Teilen einer gemeinsamen Tragwerksstruktur den Ressourcenverbrauch pro m² BGF reduzieren.

Für höhere Gebäude können zwei unterschiedliche Graphen zum Verlauf des Ressourcenverbrauchs referenziert werden: „Premium for height“ von Fazlur Khan [13], eine wohlbekannte Darlegung des steigenden Stahlverbrauchs pro m² mit zunehmender Höhe, und die etwas weniger

bekannte DAR-Formel [14], die auf Stahlbetongebäude zwischen 22 und 80 Geschossen angewandt werden kann. Beide Graphen zeigen, dass das Konstruktionsgewicht von Hochhäusern pro m² BGF konstant zunimmt. Im Falle von Khan verläuft das Gewicht exponentiell durch die zunehmenden lateralen Kräfte, bei der DAR-Formel linear. In der Auswertung ergibt sich ein Verlauf wie in Bild 3b dargestellt. Ein Korridor von ± 20% weist den Rahmen auf, innerhalb dessen sich typischerweise die Gewichtsentwicklung von Hochhäusern bewegt.

Da Gründung und Fassaden in keiner der beiden Rechnungen inkludiert wurden, wurden sie im Rahmen dieser Untersuchung mit 15% des Gesamtgewichts für die Gründung und 1,5% des Gesamtgewichts für die Fassade hinzuaddiert. Das final errechnete Gewicht pro m² ist in Tab. 3 dargestellt, während Tab. 4 eine Aufschlüsselung des Gewichts nach Materialität zeigt.

Für die Quantifizierung der Ressourcen von Wegen und Straßen wurden im Vorfeld nach Bauklasse und für die Frostempfindlichkeitsklasse F2 in Zone I Annahmen getroffen, die in Tab. 5 zusammengefasst sind.

Tab. 3 Gewicht pro m² BGF je nach Gebäudetypologie
Embodied weight per m² GFA

Gebäudetypologie (Geschossanzahl)	EFH	MFH 4	MFH 6	HH 20	HH 40
Bestimmtes Gewicht (Mittel)	2,0 t/m ²	1,5 t/m ²	1,3 t/m ²	1,5 t/m ²	1,9 t/m ²

Quelle: Weidner, S. 2020

Tab. 4 Prozentuale Verteilung der Baumaterialien (Hauptkategorien)
Proportional distribution of building materials

EFH, MFH 4, MFH 6					HH 20, HH 40		
Beton	Ziegel	Holz	Metall	Rest	Beton	Stahl	Rest
57,0%	34,9%	3,5%	2,2%	2,4%	94,5%	3,5%	2,0%

Quelle: Weidner, S. 2020

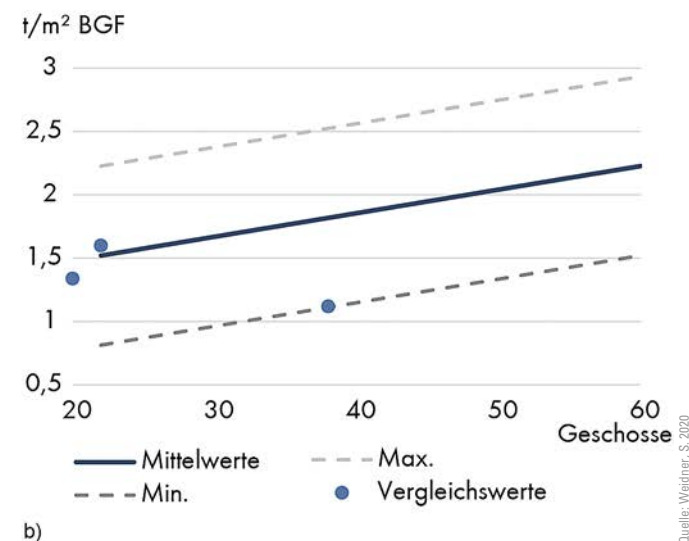
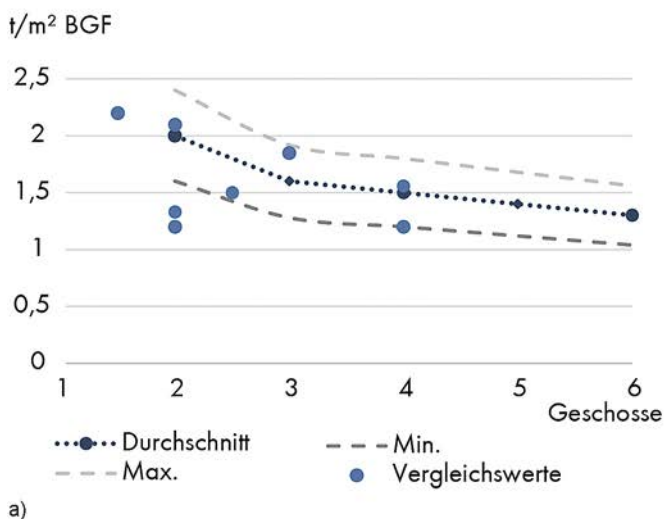


Bild 3 Gewichtsentwicklung mit zunehmender Höhe: a) für EFH bis mehrgeschossige MFH, b) für Hochhäuser
Development of weight with gaining height: a) for single family and multifamily houses, b) for high-rises

Tab. 5 Ressourcenaufwand nach Bauklasse je m² Straßenfläche
Resource consumption per construction class and per m² street

Bauklasse	Gesteinskörnung Asphalt	Bitumen	Gesteinskörnung Frostschicht	Gesamt
Bk _{3,2}	0,50 t/m ²	0,03 t/m ²	0,56 t/m ²	1,09 t/m ²
Bk _{1,8}	0,46 t/m ²	0,02 t/m ²	0,60 t/m ²	1,08 t/m ²
Bk _{1,0}	0,41 t/m ²	0,02 t/m ²	0,64 t/m ²	1,07 t/m ²
Bk _{0,3}	0,32 t/m ²	0,02 t/m ²	0,52 t/m ²	0,86 t/m ²

Quelle: Weidner, S. 2020

3 Szenarien

Für die Szenarienbildung werden die fünf unterschiedlichen Gebäudetypologien und vier verschiedenen Straßentypen auf 1 km² nach einem vorgegebenen Prinzip positioniert. Somit entstehen je Dichte fünf Szenarien, die durch die stringente Reduktion der veränderlichen Parameter konkrete Aussagen zu den Faktoren Dichte und Gebäudetypologie ermöglichen. Die Bebauung sowie die verkehrstechnische Erschließung durch lineare Straßen wurden gem. einem systematisch vorgegebenen Raster platziert. Bild 4 zeigt diese Vorgehensweise am Beispiel der Szenarien 11–15 bei einer urbanen Dichte von 20.000 Einwohnern pro km².

Für jedes der 15 Szenarien wurde der Gesamtflächen- und der Gesamtressourcenverbrauch bestimmt (jeweils gesamt, pro Person und pro Haushalt). Dabei zeigt sich, dass v. a. der Vergleich pro Bewohner die aussagekräftigste Einheit bildet. Tab. 6 fasst die erhobenen Daten zusammen

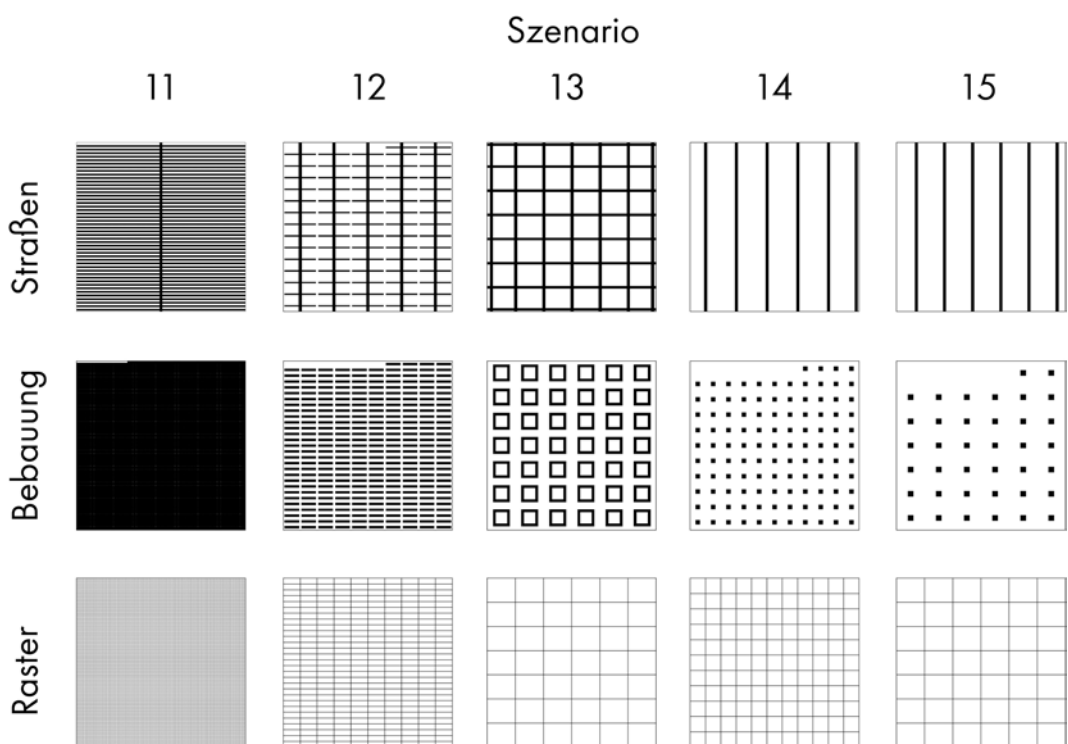
men und ermöglicht dadurch quantitative Vergleiche zwischen Gebäudetypologien und urbanen Dichten.

4 Auswertung

Aus den Vergleichen und Gegenüberstellungen können vier grundsätzliche Aussagen abgeleitet werden, die Planenden eine Hilfestellung zur Erfassung des Ressourcenverbrauchs der geplanten bebauten Umwelt geben.

- 1) Die Wahl der Gebäudetypologie ist von essenzieller Bedeutung.
In Abhängigkeit von der Gebäudetypologie variieren Ressourcen- und Flächenverbrauch stark. In diesem Kontext sind v. a. die Variablen „Geschossflächeneffizienz“, „Wohnfläche pro Person“ und „Konstruktionsgewicht pro m² BGF“ relevant. Die Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch je Variable fallen unterschiedlich stark aus. Damit das 20-geschossige Hochhaus die ressourcenschonendste Typologie wird, müsste bspw. die Geschossflächeneffizienz von durchschnittlich 60% auf 75% ansteigen und zusätzlich das Gewicht pro m² BGF von 1,5 t auf 1,4 t reduziert werden.
- 2) Je dichter, desto besser.

Die geringste Dichte (400 EW/km²) verursacht bei jeder Gebäudetypologie sowohl den höchsten Flächen- als auch den höchsten Ressourcenverbrauch, während das dichteste Szenario (20.000 EW/km²) jeweils die geringsten Werte aufweist. Eine derartige Erhöhung der urbanen Dichte bedeutet eine Reduktion der Ressourcenverbräuche der Szenarien 1–5 um 31%, von durchschnittlich 166 t pro Kopf auf 114 t. Der



Quelle: Weidner, S. 2020

Bild 4 Übersicht zu Raster, Bebauung und Straßen der Szenarien 11–15
Overview of grid, buildings and street of scenario 11–15

Tab. 6 Ressourcen- und Flächenverbrauch pro Einwohner (EW) je Szenario
Resource- and area consumption per inhabitant and scenario

Szenario	1	6	11	2	7	12	3	8	13	4	9	14	5	10	15
Typol.	EFH		MFH 4			MFH 6			HH 20		HH 40				
EW/km ²	400	4000	20.000	400	4000	20.000	400	4000	20.000	400	4000	20.000	400	4000	20.000
m ² /EW	204,6	84,75	53,7	62,35	33,86	21,94	37,35	25,07	19,83	31,75	18,78	8,13	20,72	10,66	6,57
t/EW	306,15	177,94	144,71	132,18	104,77	93,39	105,73	92,69	87,15	130,63	116,9	105,44	155,86	145,18	140,81

Quelle: Weidner, S. 2020

Hauptgrund in dieser Falluntersuchung besteht darin, dass die verkehrstechnische Infrastruktur von mehr Menschen gleichzeitig geteilt werden kann und somit jeder einzelne Bewohner weniger Straße benötigt. Diese Aussage gewinnt sogar noch deutlich an Bedeutung, wenn die unterschiedlichen Wohnverhalten von ländlichen und städtischen Bewohnern berücksichtigt werden, da die Wohnfläche pro Person auf dem Land im Vergleich zur Stadt deutlich ansteigt. Dieser Umstand war jedoch Bestandteil dieser Studie.

3) Das sechsgeschossige Mehrfamilienhaus ist stets das ressourceneffizienteste.

Von den fünf in der Studie untersuchten Gebäudetypologien verbraucht das sechsgeschossige MFH in Blockrandbebauung bei jeder urbanen Dichte die wenigsten Ressourcen. Der Hauptgrund liegt in der relativ hohen Geschossflächeneffizienz von durchschnittlich 68% und dem geringen Konstruktionsgewicht pro m² BGF (1,3 t/m² BGF). Allerdings ist anzumerken, dass eine andere städtebauliche Formation dieser Gebäudetypologie, z.B. in einer linearen Zeilenbebauung, zu weiteren Einsparungen führen würde. Unter den hier gesetzten Rahmenbedingungen bedeutet die Blockrandstruktur mit einem unbebauten Innenhof einen im Vergleich zur Zeile erhöhten Aufwand für die erschließende Infrastruktur.

4) Der Flächenverbrauch ist bei Hochhausstrukturen immer am geringsten.

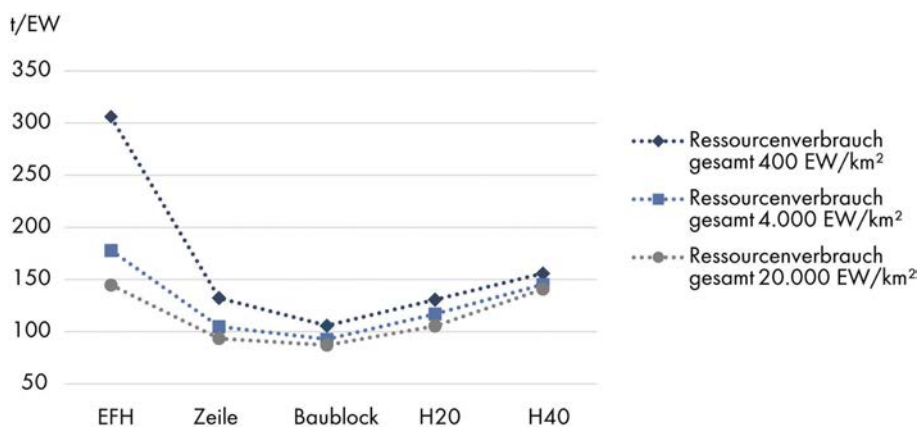
Dank eines kleinen Fußabdrucks und nur 3,3 bzw. 1,8 m² überbauter Fläche pro Person sind Hochhäuser bei Weitem die flächeneffizienteste Gebäudetypologie. Diese Unterschiede werden v. a. bei einer hohen urba-

nen Dichte deutlich, da hier für EFH knapp 53,7 m² pro Person anfallen und 21,9 m² bzw. 19,8 m² für MFH 4 und MFH 6, aber nur 8,1 m² bzw. 6,6 m² für die 20- bzw. 40-geschossigen Hochhäuser. Der Flächenverbrauch von Hochhausstrukturen ist damit weniger als halb so groß wie bei den anderen urbanen Strukturen. Je nachdem, wie knapp der Faktor Fläche an den jeweiligen Standorten ist, kann die Gebäudetypologie des Hochhauses als besonders zukunftsfähige Bebauung angesehen werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die städtebaulichen Rahmenbedingungen einen großen Einfluss auf den Ressourcenverbrauch einer urbanen Struktur haben. Das vielfach romantisierte Einfamilienhaus stellt (insbesondere wenn in konventioneller Bauweise errichtet), keine nachhaltige Bebauungsstruktur dar. Dies wird durch weitere Faktoren, wie bspw. Verkehrsaufkommen, Anbindungsaufwand oder Wohnverhalten, verstärkt. Dichte, urbane Strukturen mit mehrgeschossigen Gebäuden bieten den großen Vorteil der effizienten Erschließung und Anbindung, wodurch sich der Verbrauch von Flächen und Ressourcen maßgeblich reduzieren lässt. Bild 5 fasst die jeweiligen Verbrauchswerte abschließend zusammen.

5 Anwendung der Ergebnisse in der Praxis

Die Ergebnisse aus der vorgestellten Untersuchung werden bereits jetzt in der Praxis im Büro der Autor:innen genutzt. Insbesondere bei der unterstützenden Bearbeitung von städtebaulichen Masterplänen wird auf eine an-



Quelle: Weidner, S. 2020

Bild 5 Grafischer Überblick über die gesamten Ressourcenverbräuche (Gebäude und Straßen) der unterschiedlichen urbanen Strukturen und Dichten
Graphic overview of total resource consumption (buildings and street) per urban structure and density

gemessene Höhengestaltung, Geschossflächeneffizienz, Optimierung des Gewichts der Tragstruktur und hohe urbane Dichte geachtet.

Bebaubare Flächen sind in Innenstädten, auch in Deutschland, nur sehr begrenzt verfügbar. Zusätzlich gibt es die städtebauliche Forderung nach innerstädtischen Freiflächen, v. a. Versickerungsflächen für eine natürliche Verdunstung und vorbeugenden Hochwasserschutz. Hierfür kann die Gebäudetypologie der Hochhäuser einen Lösungsansatz darstellen, da sie einen äußerst geringen Flächenverbrauch aufweisen. Dies kann allerdings nur dann mit hohen Nachhaltigkeitsforderungen korrelieren, wenn der Ressourcen- und Emissionsverbrauch etwa durch entsprechende Recyclingtechnologien und das konsequente Verfolgen des Urban-Mining-Prinzips reduziert werden kann. In Abschn. 6 werden daher anhand eines exemplarischen Hochhauses die möglichen Optimierungspotenziale zur Reduktion von grauen Emissionen aufgezeigt.

Eine Voraussetzung für gelungenen Hochhausbau muss stets auch die Erfüllung städtebaulicher Rahmenbedingungen sein, wie u. a. eine öffentliche Zugänglichkeit des Bauwerks in den Sockelbereichen, eine adäquate Nutzungsdurchmischung und die harmonische Integration in das Stadtgefüge.

6 Optimierungsansätze für Hochhäuser

Graue Emissionen von Hochhäusern können durch unterschiedliche Maßnahmen optimiert werden. In [15] zeigen die Autoren zwei alternative Ansätze auf, die eine Möglichkeit zur deutlichen Reduktion der grauen Emissionen bieten. Die Ausgangslage bildet ein 29-geschossiges Hochhaus in Hamburg in herkömmlicher Massivbauweise. Die erste Alternative entsteht durch eine radikale Optimierung der Stahlbetonstruktur. Bild 6 veranschaulicht schematisch die drei untersuchten Designvarianten.

Da die Decken für das Gros des Ressourcen- und Emissionsverbrauchs verantwortlich sind, ist eine Optimierung dieser Bauteile besonders effektiv. Durch den Einsatz von mineralischen Hohlkörperdecken kann der Verbrauch von Beton und auch Bewehrungsstahl so gesenkt werden, dass in diesem Fallbeispiel knapp $52 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./m}^2$ BGF eingespart werden können. Weitere Reduktionen ergeben sich aus der Verwendung von Recyclingbeton (für einen geringeren Primärmaterialaufwand), CO_2 -reduziertem Zement und CO_2 -optimiertem Bewehrungsstahl. Durch weitere Optimierungen im Bereich des Ausbaus und der Fassade können die Emissionen des konventionellen Gebäudes um ca. die Hälfte reduziert werden. Anstatt $433 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./m}^2$ BGF werden nun für die Lebenszyklusphasen A1–A3 nur noch $202 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./m}^2$ BGF emittiert.

Zusätzliche Optimierungen der grauen Emissionen eines Gebäudes können durch die Verwendung des Werkstoffs

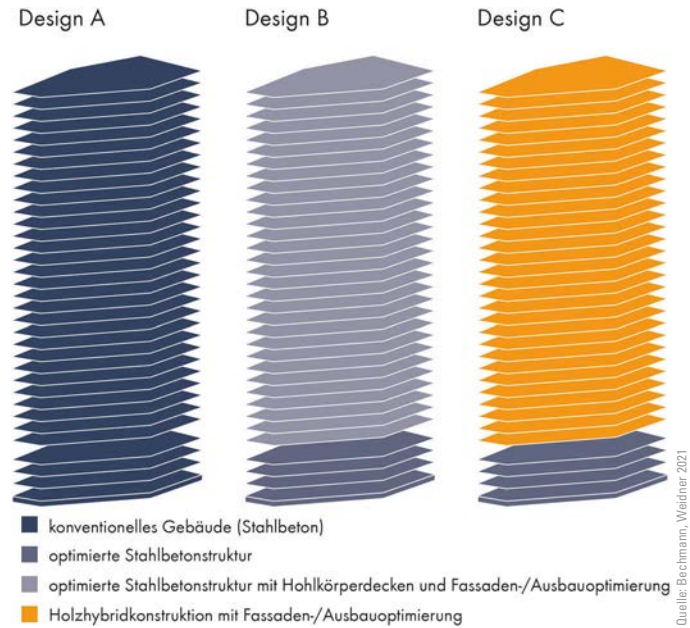


Bild 6 Design A, B, C in der Übersicht
Design A, B, C of the case study

Holz erzielt werden. Dies liegt v. a. in der CO_2 -Bindekapazität von Holz begründet, woraus sich ein positiver Effekt auf die Emissionsberechnung ergibt. Sofern der Werkstoff materialgerecht eingebaut wird und der Grundsatz der Suffizienz Anwendung findet, stellt Holz im Bauwesen eine gute Möglichkeit dar, CO_2 langfristig zu binden, sofern die Bauteile nach Verwendung wiederverwendet werden können und keine Degradierung in der Holzkaskade erfolgt [7]. Damit eine gleichwertige Wiederverwendung von bspw. Holzbalken möglich wird, ist eine gesonderte Betrachtung der Verbindungstechnik sowie der Oberflächenbehandlung notwendig und muss bereits in der Planung bedacht werden. Weiterführend ist es notwendig, dass für ein konsequentes Recycling auch auf Normierungsebene z. B. beim Abfallschlüssel der Umgang mit Altholz überarbeitet wird.

In der Fallstudie können durch den Einsatz der Holzhybridbauweise in den Deckenelementen die grauen Emissionen auf nur noch $94 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./m}^2$ BGF gesenkt werden. Tab. 7 fasst die erzielten Reduktionsmaßnahmen final zusammen.

7 Fazit und Ausblick

Urbane Strukturen sind hauptverantwortlich für den Großteil des globalen Ressourcenverbrauchs. Vor dem Hintergrund einer steigenden Ressourcenverknappung ist es umso wichtiger, die Konsequenzen planerischer Entscheidungen abschätzen zu können und bereits auf städtebaulicher Ebene Ressourcen- und Flächenverbräuche zu adressieren. Die hier vorgestellte Studie legt dar, wie groß die Differenzen zwischen unterschiedlichen Gebäudetypologien und urbanen Dichten ausfallen können. Es zeigt sich, dass die klassische Einfamilienhausssiedlung nicht als nachhaltige Stadtentwicklung zur Lösung der

Tab. 7 Zusammenfassung des Design-Vergleichs eines 29-geschossigen Hochhauses
Summary of the high-rise case study

Angaben in kg CO ₂ -Äq./m ² BGF	Design A	Design B	Design C	
Reduktion	Hohlkörperdecken	–	–52 kg	–
	CO ₂ -reduzierter Beton	–	–74 kg	–57 kg
	CO ₂ -reduzierter Bewehrungsstahl	–	–55 kg	–45 kg
	Optimierter Ausbau und Fassade	–	–21 kg	–21 kg
	Holzhybriddecken	–	–	–110 kg
Graue Emissionen in kg CO ₂ -Äq./m ² BGF		433 kg	202 kg	94 kg

Quelle: Bechmann, Weidner 2021

bevorstehenden globalen Herausforderungen geeignet ist. Des Weiteren lässt sich feststellen, dass, nach aktuellem Stand der Technik, mehrgeschossige Mehrfamilienhäuser durchschnittlich die ressourcenschonendsten Alternativen darstellen. Dies kann sich jedoch durch Optimierungen im Bereich der Hochhausplanung auch zugunsten vielgeschossiger Hochhäuser verändern, deren großer Vorteil v. a. in dem Minimum an überbauter Fläche liegt. Wenn sich diese Gebäudetypologie harmonisch in den städtischen Kontext integrieren lässt, zudem auf Gebäudeebene die Geschossflächeneffizienz erhöht und der Ressourcenaufwand reduziert werden kann, können Hochhäuser durchaus eine zukunftsfähige Typologie darstellen. Die hier vorgestellte Fallstudie eines 29-geschossi-

gen Hochhauses deutet an, dass bereits mit heute verfügbaren Maßnahmen deutliche Optimierungen erzielt werden können. Ein Blick in die Zukunft von Hochhaus-tragwerken, wie sie aktuell an der Universität Stuttgart im Sonderforschungsbereich 1244 erforscht werden [16], präsentiert weitere innovative Konzepte, die zu einer radikalen Ressourcen- und Emissionsreduktion führen können. Adaptive Elemente sind hierbei in die Tragstruktur eines Hochhauses integriert, um gezielt auf externe Einflüsse reagieren zu können und somit Spannungsspitzen im Tragwerk zu reduzieren. Solche und andere Technologien werden einen wichtigen Beitrag zur konsequenten Ressourcenminimierung im Bauwesen leisten.

Literatur

- [1] Kraas, F.; Leggewie, C.; Lemke, P. (2016) *Der Umzug der Menschheit: die transformative Kraft der Städte*. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen.
- [2] Krausmann, F. et al. (2017) *Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use*. Proceedings of the National Academy of Sciences 114, no. 8, pp. 1880–1885. <https://doi.org/10.1073/pnas.1613773114>
- [3] Swilling, M. et al. (2013) *City-level decoupling: urban resource flows and the governance of infrastructure transitions* [online]. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8488>
- [4] United Nations Department of Economic and Social Affairs (2018) *World urbanization prospects: the 2018 revision – Excel-Tabellen* [online]. <https://population.un.org/wup/Download>
- [5] Sobek, W. (2016) *Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume* in: Scheerer, S.; van Stipriaan, U. [Hrsg.] *Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach*. Dresden: Technische Universität, Institut für Massivbau, S. 62–76.
- [6] Sobek, W. (2022) *non nobis: über das Bauen in der Zukunft. Buch 1: Ausgehen muss man von dem, was ist*. Stuttgart: av edition.
- [7] Weidner, S. et al. (2021) *Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien*. Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 12, S. 969–977. <https://doi.org/10.1002/best.202100065>
- [8] Weidner, S. (2020) *Grundlagen für die Planung von ressourcenminimalen urbanen Strukturen* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- [9] European Commission (2018) *Housing space per person – Energy – European Commission, Energy* [online]. [energy/en/content/housing-space-person](https://energy.ec.europa.eu/en/content/housing-space-person) [Zugriff am: 10. Dez. 2018]
- [10] Korda, M. [Hrsg.] (2005) *Städtebau: Technische Grundlagen; mit 131 Tabellen*. 5., neubearb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag.
- [11] Lehmann, H.; Stanetzky, C. (1999) *Zukunftsfähiges Bauen heißt Ressourcennutzung optimieren* in: Käö, T.; Schmidt-Bleek, F.; Huncke, W. [Hrsg.] *Das Wuppertal Haus: Bauen und Wohnen nach dem Mips-Konzept*. Basel: Birkhäuser, S. 16–21.
- [12] Müller, A. (2013) *Das Rohstoffpotenzial von Bauabfällen Das Rohstoffpotenzial von Bauabfällen Construction and Demolition Waste – its potential as raw material*. Wasser und Abfall, H. 1.
- [13] Ali, M. M. (2001) *Art of the skyscraper: the genius of Fazlur Khan*. New York, NY: Rizzoli.
- [14] Rizk, A. S. S. (2010) *Structural Design of Reinforced Concrete Tall Buildings*. CTBUH Journal I, pp. 34–41.
- [15] Bechmann, R.; Weidner, S. (2021) *Reducing the Carbon Emissions of High-Rise Structures from the Very Beginning*. CTBUH Journal IV, pp. 30–35.
- [16] Sobek, W. et al. (2021) *Adaptive Hüllen und Strukturen: Aus den Arbeiten des Sonderforschungsbereichs 1244*. Bautechnik 98, H. 3, S. 208–221. <https://doi.org/10.1002/bate.202000107>

Autorin und Autoren

Dr.-Ing. Stefanie Weidner (Korrespondenzautorin)
stefanie.weidner@wernersobek.com
Werner Sobek AG
Albstraße 14
70597 Stuttgart

Dipl.-Ing. Roland Bechmann
roland.bechmann@wernersobek.com
Werner Sobek AG
Albstraße 14
70597 Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
werner.sobek@wernersobek.com
Werner Sobek AG
Albstraße 14
70597 Stuttgart

Zitieren Sie diesen Beitrag

Weidner, S.; Bechmann, R.; Sobek, W. (2022) *Ressourcenminimierung im urbanen Kontext*. Bautechnik 99, H. 1, S. 41–49.
<https://doi.org/10.1002/bate.202100093>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.
Eingereicht: 14. Oktober 2021; angenommen: 9. Dezember 2021.