Grundlagen für die Planung von ressourcenminimalen urbanen Strukturen

Von der Fakultät Architektur und Stadtplanung
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte
Abhandlung

von

Stefanie Barbara Weidner

aus Straubing

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren Universität Stuttgart
Mitberichter:	Prof. Dipl.-Ing. Peter Schürmann Institut für Baustofflehre, Bauphysik, Gebäudetechnologie und Entwerfen Universität Stuttgart
Tag der mündlichen Prüfung:	09.07.2020

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart

2020

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK). Das Thema meiner Dissertation ist deutlich geprägt von der dort vermittelten Ideologie.

Auf globaler Ebene stehen uns große Herausforderungen bevor, die ein radikales Umdenken und Um-handeln erforderlich machen. Bislang sind wir jedoch aufgrund von Bequemlichkeit oder auch Gewohnheit nur selten gewillt, diesem nachzukommen. Umweltkatastrophen - allen voran das massenhafte Artensterben, das Abschmelzen der Polkappen und die menschengemachte globale Erwärmung, die als Auslöser all dieser Phänomene gilt, lassen für die zukünftigen Jahre ein düsteres Bild entstehen. Ich hoffe dennoch, dass wir rechtzeitig die Kehrtwende weg von unserer ökonomisch getriebenen Überflussgesellschaft hin zu einer umweltverträglichen Lebensweise schaffen. Wie die vorliegende Arbeit zeigt, ist ein Großteil der Verantwortung dem Bausektor zuzuordnen, der maßgeblich den Ressourcen- und Rohstoffverbrauch sowie die globalen Emissionen beeinflusst. Vor allem für die aufstrebenden Entwicklungs- und Schwellenländer müssen ressourcen- und umweltschonende Wege für deren zunehmenden Wohlstand geschaffen werden. Dort wird sich vieles zum Zustand unseres Planeten entscheiden.

Meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing E.h. Dr. h.c Werner Sobek möchte ich für seine Unterstützung, seine inspirierenden Worte und unsere fruchtbaren Konversationen danken und dafür, dass er mich gelehrt hat, stets zu hinterfragen und selbstständig zu denken.

Vielen Dank auch an Prof. Peter Schürmann, dafür, dass er sich bereit erklärt hat, als Mitberichter diese Dissertation zu unterstützen.

Weiterhin gilt mein großer Dank Herrn Assenbaum, für seine aufopferungsvolle und sehr wertvolle Unterstützung und meinen langjährigen ILEK-Gefährten für das kollegiale, interdisziplinäre Arbeitsumfeld.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie für den bedingungslosen Rückhalt während dieser Zeit bedanken und diese Arbeit Beate Weidner widmen, die ihre Dissertation leider nie vollenden konnte.

Inhalt

Vorwort ... III
Inhalt ... IV
Zusammenfassung ... VI
Abstract ... VII
Abkürzungsverzeichnis ... VIII
1 Einleitung ... 1
2 Nachhaltige urbane Strukturen ... 7
2.1 Parameteridentifikation ... 7
2.1.1 Bewohner ... 9
2.1.2 Städtebau ... 16
2.1.3 Ökologie ... 22
2.1.4 Standort ... 26
2.2 Parameterabhängigkeiten ... 31
2.3 Parameterevaluierung ... 33
3 Parameterquantifizierung ... 37
3.1 Rahmenbedingungen für die Quantifizierung ... 37
3.2 Urbane Dichte ... 39
3.2.1 Urbane Dichte 400 ... 39
3.2.2 Urbane Dichte 4.000 ... 39
3.2.3 Urbane Dichte 20.000 ... 40
3.3 Bebauungsstruktur und Gebäudetypologien ... 41
3.4 Flächenverbrauch ... 44
3.4.1 Flächenverbrauch Wohneinheit ... 45
3.4.2 Flächenverbrauch Bebauungsstruktur ... 49
3.4.3 Flächenverbrauch Verkehrsanlagen ... 55
3.5 Ressourcenverbrauch Gebäude ... 58
3.5.1 Ein- und Mehrfamilienhäuser ... 59
3.5.2 Hochhäuser ... 62
3.5.3 Zusammenfassung Materialverbräuche ... 66
3.5.4 Baustoffzusammensetzung ... 68
3.6 Ressourcenverbrauch Verkehrsanlagen ... 69
4 Betrachtungsrahmen ... 71
4.1 Szenarienerstellung ... 72
4.2 Ressourcenermittlung Dichte 400 ... 74
4.2.1 Szenario 1: Dichte 400 - Bebauungsstruktur EFH ... 75
4.2.2 Szenario 2: Dichte 400 - Bebauungsstruktur Zeile ... 76

4.2.3 Szenario 3: Dichte 400 - Bebauungsstruktur Baublock ... 77
4.2.4 Szenario 4: Dichte 400 - Bebauungsstruktur Hochhaus 20 ... 78
4.2.5 Szenario 5: Dichte 400 - Bebauungsstruktur Hochhaus 40 ... 79
4.3 Ressourcenermittlung Dichte 4.000 ... 80
4.3.1 Szenario 6: Dichte 4.000 - Bebauungsstruktur EFH ... 81
4.3.2 Szenario 7: Dichte 4.000 - Bebauungsstruktur Zeile ... 82
4.3.3 Szenario 8: Dichte 4.000 - Bebauungsstruktur Baublock ... 83
4.3.4 Szenario 9: Dichte 4.000 - Bebauungsstruktur Hochhaus 20 ... 84
4.3.5 Szenario 10: Dichte 4.000 - Bebauungsstruktur Hochhaus 40 ... 85
4.4 Ressourcenermittlung Dichte 20.000 ... 86
4.4.1 Szenario 11: Dichte 20.000 - Bebauungsstruktur EFH ... 87
4.4.2 Szenario 12: Dichte 20.000 - Bebauungsstruktur Zeile ... 88
4.4.3 Szenario 13: Dichte 20.000 - Bebauungsstruktur Baublock ... 89
4.4.4 Szenario 14: Dichte 20.000 - Bebauungsstruktur Hochhaus 20 ... 90
4.4.5 Szenario 15: Dichte 20.000 - Bebauungsstruktur Hochhaus 40 ... 91
5 Auswertung und Diskussion ... 93
5.1 Ressourcenverbrauch Gebäude ... 93
5.1.1 Geschossflächeneffizienz ... 95
5.1.2 Gewicht je m² BGF ... 96
5.1.3 Wohnfläche pro Einwohner ... 97
5.1.4 Zusammenfassung ... 98
5.2 Ressourcenverbrauch urbaner Strukturen ... 101
5.2.1 Dichte 400 ... 101
5.2.2 Dichte 4.000 ... 104
5.2.3 Dichte 20.000 ... 107
5.2.4 Zusammenfassender Vergleich der Dichten ... 109
5.3 Limitationen der Arbeit und weiterer Forschungsbedarf ... 111
6 Fazit und Ausblick ... 115
Literatur ... 121
Abbildungen ... 130
Tabellen ... 133
Anhang ... 136

Zusammenfassung

Was zunächst als provokante Frage an seinen Schützling gedacht war, entwickelte sich zu seinem wohl berühmtesten Zitat. Bereits in den 1960er Jahren fragte Richard Buckminster Fuller: „How much does your building weigh?“ In den vorangegangenen Nachkriegsjahren stellte der Leichtbau bzw. das leichte Bauen eine Notwendigkeit dar, die für den Bausektor von essentieller Bedeutung bei der Bewältigung der bevorstehenden Herausforderungen war. Mit Einzug des Wohlstands stieg der Ressourcen- und Rohstoffverbrauch global und vor allem in den Industrienationen deutlich an und erreicht nun durch einen gleichzeitigen immensen Anstieg der Weltbevölkerung jährlich neue Höchstpunkte.
Ausgehend vom Jahr 2019, werden bis 2050 weltweit 2,46 Mrd. zusätzliche Menschen in den Städten leben. Für diese Fülle von neuen Stadtbewohnern müssen dort mit den vorhandenen, begrenzten Rohstoffen und Ressourcen Lebensräume geschaffen werden. Es stellt sich die Frage, wie für mehr Menschen mit weniger Material gebaut werden kann. Daher liegt der Fokus dieser Arbeit in der Erforschung von Grundlagen zur Planung von ressourcenminimalen urbanen Strukturen zu Wohnzwecken. Die Forschungsfragen, die sich daraus ergeben, lauten:

- *Welche Parameter sind für eine ressourcenspezifische Betrachtung urbaner Strukturen relevant?*
- *Wie verändert sich in Abhängigkeit von der Bebauungsstruktur der Ressourcen- und Flächenverbrauch von Verkehrsanlagen und Gebäuden, bei einheitlicher baulicher Dichte?*
- *Wie verändern sich diese Ergebnisse bei veränderter baulicher Dichte?*

Dazu werden die Parameter Ressourcenverbrauch Gebäude, Ressourcenverbrauch Verkehrsanlagen, Flächenverbrauch, Bebaute Dichte, Gebäudetypologie und Bebauungsstruktur als relevant in Hinblick auf eine ressourcenbezogene Betrachtung identifiziert und auf einem 1 km² großen Betrachtungsfeld in Bezug zueinander gesetzt. Dafür werden drei urbane Dichten von 400, 4.000 und 20.000 Einwohnern pro Quadratkilometer durch fünf unterschiedliche Bebauungsweisen gebildet. Diese bestehen aus einer sortenreinen Bebauung durch Einfamilienhäuser, 4-geschossige Mehrfamilienhäuser, 6-geschossige Mehrfamilienhäuser, 20-geschossige Hochhäuser und 40-geschossige Hochhäuser. Eine Untersuchung von 15 daraus entstehenden Szenarien liefert zum einen Kenntnisse über die zu berücksichtigenden Variablen und deren Auswirkungen und gibt zum anderen Aufschluss darüber, welche Bebauungsstrukturen und Gebäudetypologien unter den hier gewählten Rahmenbedingungen am ressourcenschonendsten sind.
Ziel ist es, Grundlagen und -kenntnisse dafür zu schaffen, dass Städteplaner und Architekten in die Lage versetzt werden, die ressourcenspezifischen Auswirkungen unterschiedlich gewählter Bebauungsstrukturen und städtebaulicher Dichten zu begreifen.
Es zeigt sich, dass unabhängig von der Dichte, eine Bebauung durch 6-geschossige Mehrfamilienhäuser stets die ressourcenschonendste Bebauungsart darstellt. Obwohl Hochhäuser durch ihren geringen Grund- und Verkehrsflächenbedarf die Ressource Boden am wenigsten beanspruchen, fallen sie aufgrund ihrer schlechten Nutzungsflächeneffizienz und durch den erhöhten Materialverbrauch hinter die Mehrfamilienhausbebauung zurück.

Abstract

What started as a provocative question, posed in the 1960s by Richard Buckminster Fuller probably became his most famous and most cited quote. His allegedly simple question was: "How much does your building weigh?" In the preceding years after WWII, building light was a necessity in order to master the challenges with which the building sector was confronted. With increasing prosperity, the consumption of resources and raw materials rose rapidly and reaches new peaks every year due to a simultaneous drastic increase in the world population. Based on projections from 2019, by 2050 there will live an additional 2,46 billion people in the world's cities. For all these people, livable habitats need to be created using the available, limited resources. The main question is how to build more with less? For this reason, the focus of this work lies in the investigation of principles for the planning of resource-minimal, residential urban structures. The research questions that arise from this are as follows:

- *What parameters are relevant for a resource specific analysis of urban structures?*
- *How do resource consumption and land use of infrastructure and buildings change, depending on the urban formation?*
- *How do these results vary with changing urban density?*

In the course of this thesis, the parameters resource consumption of infrastructure and buildings, land use, urban density, building typologies and urban formation are identified as resource-relevant and are put in relation to each other on a virtual study site. The site measures 1.000 m x 1.000 m and its framing parameters are similar to those in Germany in terms of building substance, GDP and climate conditions. Of all possible building typologies and urban formations, the study focusses on those that are representative of residential areas. This results in five different urban scenarios: 2-storey stand-alone single-family houses, 20- and 40-storey residential high-rise buildings, 4-storey apartment buildings in ribbon development and 6-storey apartment buildings in block structures.

Since new urban environments are formed in various densities, these five building typologies are each placed on the site in three different densities: 400 residents per km², representing a rural area, 4,000 residents per km², representing a typical density for medium-sized cities with 1-4 million inhabitants and 20,000 residents per km², representing very dense urban structures such as Paris or Barcelona. In summary, this leads to 15 different case studies, that can provide information on which building typology is the most resource efficient under the given underlying conditions.

It is the objective of this thesis to provide urban planners and architects with the ability to comprehend the resource specific impacts of different urban formations and densities.

It shows that 6-storey apartment buildings always require the least amount of resources, regardless of the urban density. Furthermore, even though land use is lowest for high-rise buildings, due to their small footprint and little horizontal infrastructure, they are still ranked behind low-rise apartment buildings, on account of their inadequate floor area efficiency and increased resource use per m².

Abkürzungsverzeichnis

ASGG	Adrian Smith + Gordon Gill Architecture
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BGF	Brutto-Grundfläche
BK	Baukörper
BKI	Baukosteninformationszentrum
BOMA	The Building Owners and Managers Association
BRI	Bruttorauminhalt
cap	Capita
CTBUH	Council on Tall Buildings and Urban Habitat
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DMC	Domestic Material Consumption
EFH	Einfamilienhaus
EnEV	Energieeinsparverordnung
EW	Einwohner
FAO	Food and Agriculture Organization
GDP	Gross Domestic Product
GFA	Gross Floor Area
GFZ	Geschossflächenzahl
GRZ	Grundflächenzahl
Gt	Gigatonne; 1Gt = 1.000.000.000 t
H20, H40	20- bzw. 40-geschossiges Hochhaus
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPMS	International Property Measurement Standards
LA	Lettable Area
LBO	Landesbauordnung
MFH (4), MFH (6)	4- bzw. 6-geschossiges Mehrfamilienhaus
Mio.	Millionen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
Mrd.	Milliarden
NF	Nutzfläche
NFA	Net Floor Area
NGF	Netto-Grundfläche
NRF	Netto-Raumfläche
NUF	Nutzungsfläche
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development

ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
Pkm	Personenkilometer
RASt	Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen
RMI	Raw Material Consumption
TMC	Total Material Consumption
UBA	Umweltbundesamt
UN	United Nations
WE	Wohneinheit

1 Einleitung

Abbildung 1: Informelle Siedlungen in Kairo, Ägypten

Spätestens seit der Entstehung der ersten Städte im 9. Jahrtausend vor Chr. [1] ist das menschliche Habitat geprägt von Gebäuden und deren versorgender bzw. erschließender Infrastruktur. Diese *gebaute Umwelt* existiert als künstliches Pendant zur natürlichen Umwelt und wird maßgeblich durch menschliche Eingriffe bestimmt. Aus den einstigen Siedlungen entwickelten sich im Laufe der Jahrtausende Metropolen mit mehreren Millionen Einwohnern, wie z.B. die derzeit größte Stadt des afrikanischen Kontinents, Kairo [2]. Diese Millionenstadt dehnt sich mit gewaltiger Intensität aus und beherbergt dabei einen Großteil ihrer Bevölkerung in informellen Siedlungen, wie in Abbildung 1 dargestellt.

Urbanisierung

Das Jahr 2007 markiert einen Wendepunkt der globalen Urbanisierung. Erstmalig hatten in diesem Jahr mehr Menschen ihren Lebensraum in urban geprägten Gebieten als in ländlichen Regionen [2]. Die weiter entwickelten Länder werden bis 2050 sogar einen Urbanisierungsgrad von knapp 90 % erreichen. Global betrachtet zeigen Prognosen, dass 2050 insgesamt zwei Drittel aller Menschen in Städten leben werden – ein Nettozuwachs von 2,46 Mrd. im Vergleich zu 2019 [2]. Während die Weltbevölkerung im selben Zeitraum *nur* um 2,06 Mrd. Menschen steigt, erfahren die urbanen Strukturen also einen noch drastischeren Zuwachs. 2,46 Mrd. Menschen, die innerhalb von 31 Jahren Wohnraum, Arbeitsplätze und entsprechende Infrastruktur in existierenden oder neu formierten Städten benötigen. Daraus wird deutlich, welch enormen Belastungen die urbanen Räume durch die Urbanisierung der Weltbevölkerung ausgesetzt sein werden. Die Ursachen für den Sog in die Städte sind vor allem bessere Aussichten auf Arbeit, Bildung, soziale Kontakte und kulturelle Angebote [1]. Besonders drastisch wird die Situation in den weniger entwickelten Ländern, da allein hier ein Zuwachs der urbanen Bevölkerung um 2,26 Mrd. Menschen erwartet wird [2]. Der große Anstieg in diesen Schwellen- und Entwicklungsländern hat weitreichende Konsequenzen, vor allem wenn er im erweiterten Kontext betrachtet wird, denn genau in diesen Ländern ist für die nächsten Jahrzehnte auch eine fortlaufende Steigerung des Bruttoinlandsprodukts (BIP) zu erwarten [3]. Dies geht einher mit erhöhten Anforderungen und Ansprüchen an den Lebensraum, woraus ein immenser Ressourcenverbrauch resultiert, um mit steigendem Wohlstand den Rückstand zum aktuellen Industrienationenstandard zu überwinden.

Eine der zentralen Fragen der Zukunft wird also sein, wie urbane Strukturen für 2,46 Mrd. Menschen geschaffen werden können und ob das überhaupt mit den traditionellen Methoden der Bauindustrie zu bewältigen ist.

Energie – Emissionen

Das Baugewerbe zeigt sich bereits heute für 50 % des Ressourcenverbrauchs, 45 % des Energieverbrauchs und 35 % der CO_2-Emissionen verantwortlich, wobei der Anteil am globalen BIP nur bei 10 % liegt [4]. In der Öffentlichkeit wird vor allem eine dieser Prozentzahlen thematisiert – der Energieverbrauch. Durch gesetzliche Auflagen, wie z.B. die Energieeinsparverordnung (EnEV), die seit 2002 in Deutschland gültig ist, oder durch Nachhaltigkeitszertifikate, die sich im Wesentlichen nach dem Energieverbrauch der jeweiligen Gebäude richten, werden Bauherren und Planern Vorgaben und Anreize zur Energieeinsparung geliefert. Doch diese Vorgehensweise vermittelt einen irreführenden Eindruck. Die Welt hat kein Energieproblem, denn allein die Sonne liefert 10.000 Mal mehr Energie, als die Menschheit jemals verbrauchen könnte [5]. Energie ist also so gut wie unbegrenzt vorhanden, sie wird derzeit leider zum größten Teil aus Energieträgern umgewandelt, die durch hohes Emissionsaufkommen negative Auswirkungen auf die natürliche Umwelt haben. 2017 stammten 33 % des deutschen Stroms von regenerativen Energieträgern wie Wasser-, Solar- und Windkraft, Hausmüll und Biomasse, der Rest jedoch aus Kernkraft, Erdgas oder Kohle [6]. Vor allem durch den Anteil der fossilen Energieträger entstanden 2018 pro in Deutschland verbrauchter Kilowattstunde immer noch 474 g an Kohlendioxidemissionen [7]. Genau diese Emissionen stellen zusammen mit weiteren sog. Treibhausgasen wie Methan oder Distickstoffmonoxid (N_2O) eines der größten ökologischen Probleme des 21. Jahrhunderts dar. Aufgrund der sehr langen Halbwertszeit von Kohlendioxid (CO_2) erfolgt der Abbau der in der Atmosphäre befindlichen Gase nur sehr langsam und führt durch die kontinuierliche Anreicherung letztendlich zum Anstieg der globalen Mitteltemperatur [8].

Es lässt sich festhalten, dass per se kein Energieproblem vorliegt, sondern ein Emissionsproblem [9]. Wegweisende Projekte, wie beispielsweise das Aktivhaus B10, welches bis 2019 in der Stuttgarter Weißenhofsiedlung stand, beweisen, dass es auch andere Herangehensweisen gibt. Dieses Gebäude zeichnet sich nicht wie etwa Passivhäuser durch dick isolierte Wände, geringe Fensterflächen und geringen Energiebedarf aus, sondern durch eine sehr leichte Bauweise und die Tatsache, dass es mehr emissionsfreie Energie generiert, als es selbst oder die dazugehörigen Elektrofahrzeuge verbrauchen [10]. Solange dabei keine Emissionen entstehen, ist der Energieverbrauch eines Gebäudes also irrelevant.

Problemstellung

Der Energieverbrauch von Gebäuden lässt sich, solange er emissionsneutral ist, von der Liste der Probleme der Zukunft streichen – im Gegensatz zu der Tatsache, dass 50 % des weltweiten Ressourcenverbrauchs auf die gebaute Umwelt entfallen. Das bevorzugte Baumaterial der Gegenwart ist seit einigen Jahrzehnten Beton. Beton entwickelte sich zu dem meistverbrauchten Material [11] und ermöglicht durch seine vielfältige Anwendbarkeit den Gigantismus des Bauschaffens der Neuzeit. Der Verbrauch von Beton lässt sich überschlägig anhand des jährlichen Zementverbrauchs kalkulieren, da Zement im Wesentlichen für die Herstellung von Beton verwendet wird. Demnach hat sich die globale Betonproduktion seit 1990 vervierfacht, vor allem geschuldet durch den starken Anstieg des Verbrauchs in China. Bei einem angenommenen Anteil des Zements von 12,4 % an Beton wurden 2016 weltweit insgesamt 29.437.900.000 t Beton verbraucht [12]. Pro Sekunde entspricht das einem globalen Zuwachs

zum Bestand von 933,5 t. Bildlich dargestellt lässt sich mit dieser Betonmenge jedes Jahr eine Mauer um den Äquator herum bauen, die 27 m hoch und 27 m breit ist [13].

Zwar können Betonbauten, wie es die der Römer zeigen, viele hundert Jahre bestehen. Es muss jedoch damit gerechnet werden, dass aufgrund äußerer Einflüsse und minderwertiger Qualität ein Großteil der in den letzten Jahrzehnten erbauten Betonbauten nach 2030 ersetzt werden muss [14]. Allein für China wird die Menge der nach 2030 zu ersetzenden Betonmasse auf 100 Mrd. t geschätzt [14].

Der exzessive Gebrauch von Beton erweckt den Eindruck, als seien er und damit seine Komponenten, vor allem die mineralischen Aggregatstoffe Sand und Kies, unerschöpflich. Der jährliche Abbau von 40-50 Mrd. t Sand übersteigt jedoch jegliche planetarischen Grenzen, denn nur etwa die Hälfte dieser Menge entsteht jährlich auf natürlichem Wege und wird über die Flüsse transportiert und damit nachgeliefert [13]. Die Konsequenzen daraus sind in einigen Regionen der Welt deutlich zu spüren, denn dort verschwinden durch illegalen Sandabbau Strände und ganze Inseln. Da sich Wüstensand u.a. aufgrund seiner glatten Oberfläche und eher kugelförmigen Kornform ohne intensive und teure Maßnahmen bislang nicht als Zuschlagstoff für tragfähigen Beton eignet, importieren Wüstenstaaten ironischerweise Sand aus Australien [13]. Auch andere Baustoffe wie z.B. Eisenerz oder Bauxit sind in ihrer Abbaurate limitiert und voraussichtlich in den nächsten Jahren mit Engpasssituationen konfrontiert. Die Reserven für Bauxit beliefen sich im Jahr 2018 auf 30 Mrd. t bei einer Förderung im gleichen Jahr von 300 Mio. t [15]. Die Reichweite für Bauxit und damit für den Baustoff Aluminium wird bei gleichbleibender Förderung auf 100 Jahre geschätzt. Die Reserven von Roherz betrugen im selben Jahr 170 Mrd. t, die von eisenhaltigen Erzen 84 Mrd. t. Bei einer Förderungsmenge von aktuell 2,5 Mrd. t ist die statische Reichweite von Eisenerz und damit Stahl noch deutlich geringer als die von Aluminium [15]. Dieser Ressourcenengpass im Zusammenhang mit der Bevölkerungsentwicklung, dem Anstieg des BIP und damit verbunden der Ansprüche der Bewohner stellt die Baubranche vor eine Herausforderung sondergleichen.

Forschungen zum Ressourcenverbrauch von Gebäuden und urbanen Räumen sind zumindest im nachvollziehbaren deutsch- und englischsprachigen Raum sehr rar. Es ließ sich nur eine Ende 2018 veröffentlichte Studie ausmachen, die unmittelbar verwandte Inhalte der vorliegenden Dissertation behandelt und deren Ergebnisse sich teilweise als Grundlage eignen. Die Studie *Residensity* wurde 2018 von dem Architekturbüro Adrian Smith + Gordon Gill Architecture (ASGG) erstellt und betrachtet Wohndichten in Form von neun prototypischen Gebäudetypologien, wie in Abbildung 2 dargestellt [16].

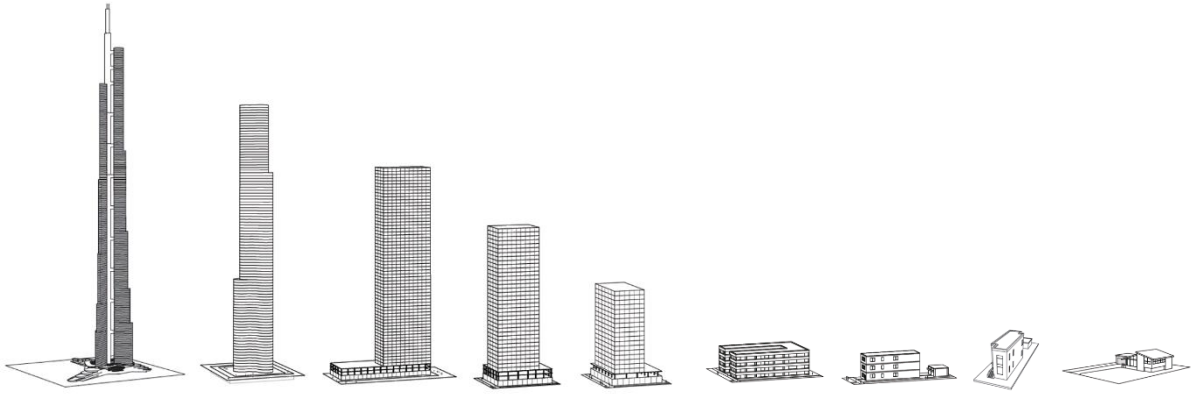


Abbildung 2: Untersuchungsobjekte der Studie *Residensity* [16]

Das vorrangige Ziel dieser Studie war die Abschätzung der Kohlenstoffemissionen während des Lebenszyklus unterschiedlicher Wohnbebauungstypologien. Dies geschah unter Betrachtung der Wohndichte im Zusammenhang mit dem Energie- und Flächenverbrauch, der Erschließung, den Emissionen für den Transport und den Emissionen, die während des Baus u.a. durch die verwendeten Materialien entstanden. Dazu wurden neun Prototypen entworfen, die in unterschiedlicher Form, Geschosshöhe und Materialität in den USA gängige Wohnbauten repräsentieren. Wie aus Abbildung 2 ersichtlich, erhielten alle Baukörper ein für die jeweilige Typologie entsprechend großes Grundstück mit Erschließungswegen. Für jeden dieser Prototypen wurde individuell auf Grundlage von Simulationen der spezifische Land- und Energieverbrauch kalkuliert. Zur Bestimmung der Kohlenstoffemissionen wurde für die Gebäudetypen ein Verbrauchsprofil erstellt, welches die Emissionen während des Betriebs, zur Errichtung der Gebäude sowie für die erschließende und versorgende Infrastruktur berücksichtigt. Weiterhin wurden die Emissionen miteinberechnet, die durch Müll- oder Postfahrzeuge entstehen.

Das Ergebnis lautet, dass das 60-geschossige Hochhaus mit 52 t CO_2 den geringsten Anteil pro Wohneinheit an *Embodied Carbon* – Kohlenstoff, der in den Baumaterialien eingespeichert ist – aufweisen kann. Die viergeschossige Typologie Courtyard, mit entsprechender Versorgungs- und Erschließungsinfrastruktur, schneidet jedoch bei der Betrachtung eines 40-jährigen Betriebs am besten ab. Dies resultiert u.a. aus gegenseitiger Verschattung und bezieht sich auf den Vergleich der grauen und operativen Energiemenge oder die Kohlenstoffemissionen.

Es wurde abschließend in der Studie aufgezeigt, welche Auswirkungen die Zusammensetzung des Strommixes auf die Amortisierung der grauen Energie in Betriebsenergiejahren hat. Für Courtyard Gebäude variiert die Anzahl der Jahre, bis die Betriebsenergie die anfänglich eingebaute graue Energie übersteigt, zwischen ca. 8 und 81 Jahren. Dieser Vergleich basiert auf den Emissionswerten für den aktuellen Energiemix in China (0,874 kg CO_2/kWh) und im kanadischen Quebec (0,002 kg CO_2/kWh) [16]. Dadurch zeigt sich sehr anschaulich, welch hohen Stellenwert die grauen Emissionen vor allem in Zukunft haben werden. Da der Anteil der fossilen Energieträger am Strommix kontinuierlich gesenkt werden soll, werden auch die Emissionswerte pro kWh reduziert. Die Studie *Residensity* stellt insgesamt wichtige Zusammenhänge auf, die für die Planung von urbanen Formen relevant sind, unterscheidet sich dennoch in der zu beantwortenden Fragestellung und der angewandten Methodik von der vorliegenden Dissertation.

Motivation und Fragestellung

Richard Buckminster Fuller war in den 1970er Jahren einer der einflussreichsten Vorreiter bzgl. Ressourcenverbrauch im Bauwesen und verlieh diesem Sachverhalt Nachdruck durch die Frage „How much does your building weigh?“ [17]. Fast ein halbes Jahrhundert später wissen nur die wenigsten Architekten, Ingenieure oder Bauherren ohne tiefgründige Recherche darauf eine Antwort. Sie stellt jedoch insbesondere im Hinblick auf die oben erwähnten Begleitumstände einen fundamentalen Aspekt einer zukunftsfähigen Bauindustrie dar.

Die Motivation für das Thema dieser Arbeit ergab sich aus eben dieser Fragestellung: W*ie kann ausreichend Wohnraum für die zunehmende Anzahl an Menschen geschaffen werden?* Das Wissen um die tatsächlich verbaute Masse der einzelnen Bestandteile der gebauten Umwelt ist stark begrenzt und daher ist es für Architekten und Planer im Vorfeld schwer abschätz-

bar, welche Auswirkungen ihre Entwürfe auf die Ressourcenbilanz haben und welche Entwurfsparameter diese Auswirkungen beeinflussen können. Die vorliegende Dissertation soll dazu beitragen, dass zum einen diese Wissenslücken geschlossen werden und darüber hinaus das Bewusstsein für die Ressourcennutzung im Bauwesen sensibilisiert wird.

Es ergeben sich folgende Forschungsfragen, die in dieser Arbeit zu beantworten sind:

- *Welche Parameter sind für eine ressourcenspezifische Betrachtung urbaner Strukturen relevant?*
- *Wie verändert sich in Abhängigkeit von der Bebauungsstruktur der Ressourcen- und Flächenverbrauch von Verkehrsanlagen und Gebäuden, bei einheitlicher baulicher Dichte?*
- *Wie verändern sich diese Ergebnisse bei veränderter baulicher Dichte?*

Zur Beantwortung der einzelnen Fragen werden jeweils unterschiedliche Methoden angewandt. So werden die relevanten Parameter mit Hilfe einer kognitiven Karte, die auf einer vorhergegangenen Literaturrecherche basiert, identifiziert und letztendlich deduktiv in Bezug zueinander gesetzt. Durch weiterführende Literaturrecherche können die Parameter für den vorliegenden Kontext auf ihre ressourcenspezifische Relevanz hin geprüft und anschließend quantifiziert werden. Mit Hilfe von gebildeten Szenarien werden anschließend diese Parameter in Relation gesetzt und ihre Auswirkungen anhand einer tabellarischen Auswertung bestimmt.

Ziel der Arbeit

Aus den bereits beschriebenen Forschungsfragen ergeben sich ergo nachfolgende Ziele. Ein erstes Ziel dieser Dissertation ist es, Parameter für einen ganzheitlich nachhaltigen Städtebau zu identifizieren und anschließend jene Faktoren, die für das Einsparen von Ressourcen im urbanen Kontext relevant sind, zu definieren und zu quantifizieren.

Ein weiteres Ziel ist es, dadurch Grundlagen dafür zu schaffen, dass Städteplaner, Architekten und Ingenieure in die Lage versetzt werden, die ressourcenspezifischen Auswirkungen unterschiedlich gewählter Bebauungsstrukturen und städtebaulicher Dichten zu erfassen. Es geht dabei nicht darum, einzelne Gebäude in Fallstudien zu bilanzieren oder eine optimale urbane Struktur zu entwerfen, sondern vielmehr darum, ein Verständnis für die Verwendung von begrenzt verfügbaren natürlichen Ressourcen zu schaffen.

Inhalt und Aufbau der Arbeit

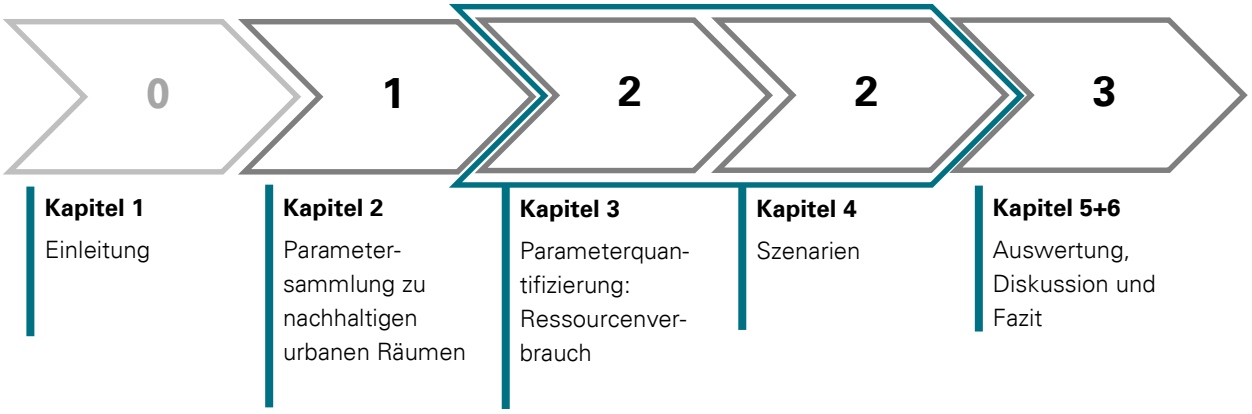


Abbildung 3: Inhaltlicher Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist nach diesem einleitenden Kapitel in drei Teile gegliedert. So widmet sich der erste Teil, in Kapitel 2, der Frage nach nachhaltigen, urbanen Strukturen, denn eine vorab theoretische Auseinandersetzung mit diesem komplexen Thema ist für die gesamte Arbeit von essentiellem Wert. Die Diskussion der einzelnen Parameter bildet die Grundlage für die weiteren Untersuchungen, die sich ab Kapitel 3 dem Verbrauch von natürlichen Ressourcen im urbanen Raum zuwenden. So werden zunächst die relevanten Parameter der Parameterstudie von Kapitel 2 identifiziert, anschließend quantifiziert und in Form von 15 unterschiedlichen Szenarien in Kapitel 4 in Bezug zueinander gesetzt.

Darauf folgend dient Kapitel 5 der komplexen Auswertung der Ressourcenverbrauchsangaben, deren Ergebnisse abschließend diskutiert werden.

2 Nachhaltige urbane Strukturen

Wie einleitend beschrieben, wird es eine der zentralen Fragen der Zukunft sein, wie bis 2050 die notwendigen Lebensräume für knapp 2,46 Mrd. zusätzliche Menschen mit den vorhandenen begrenzten Ressourcen errichtet werden können.

Ein signifikanter Anteil der Frage- und Problemstellungen der Zukunft wird sich folglich im städtischen Raum, das menschliche Habitat betreffend, abspielen. Dieses Kapitel widmet sich daher dem Thema Nachhaltigkeit von urbanen Strukturen. *Nachhaltigkeit* bezieht zunächst sowohl ökonomische, soziokulturelle als auch ökologische Faktoren mit ein. Dies geschieht kontextunabhängig und ungeachtet einer Gewichtung der jeweiligen Faktoren. Auf Basis der ermittelten Parameter werden diese in einem zweiten Schritt (siehe Kapitel 0) auf ihre Relevanz in Bezug auf eine ressourcenschonende gebaute Umwelt untersucht. Ziel ist es, daraus die relevanten Parameter für eine weiterführende Betrachtung des Ressourcenverbrauchs abzuleiten.

2.1 Parameteridentifikation

Um die Komplexität urbaner Strukturen und deren Nachhaltigkeitsparameter zu erfassen, bedarf es einer umfassenden Parameteranalyse. Aus zahlreichen, sich teilweise gegenseitig bedingenden Einzelaspekten bildet sich ein zusammenhängendes Gefüge. Das folgende Kapitel 2.1 widmet sich der Erfassung und Kategorisierung von nachhaltigkeitsrelevanten Parametern.

Eine ausführliche Recherche in bauspezifischer Fachliteratur ergab, dass für *nachhaltige urbane Strukturen* bisher keine Begriffshierarchien existieren. Für eine gewisse Strukturierung kann die 2. Auflage von FINDEX Bau (Facettenartiges Indexierungssystem für das Bauwesen, [18]) dienen, welche allerdings die Komplexität und die Zusammenhänge des zu strukturierenden Begriffes nicht im vollen Umfang abdeckt. Die Bildung der Kategorien erfolgte daher deduktiv und wurde vorab graphisch als kognitive Karte aufgearbeitet.

Als Unterbegriffe der ersten Hierarchiestufe für eine Nachhaltigkeit im städtischen Kontext werden die vier Hauptkategorien *Bewohner*, *gebaute Umwelt*, *Ökologie* und *Standort* definiert. Die zu erfüllenden Kriterien, die zur Auswahl der Parameter der ersten Hierarchie führen, lauten in Anlehnung an [19]:

- Sie decken Themen ab, die für nachhaltige urbane Strukturen relevant sind, indem sie Kontextinformationen liefern, Auswirkungen auf die Umwelt aufzeigen oder Parameter beinhalten, die indirekt oder direkt von jedem oder nur von einer Gruppe beeinflussbar sind.
- Sie liefern relevante Informationen, die nicht ausreichend in anderen Teilbereichen abrufbar sind.

Demnach stellen die *Bewohner* die Gruppe dar, die Einfluss auf jene Parameter verüben, die von jedem beeinflusst werden können, sei es unbewusst, bewusst, direkt oder indirekt. Aspekte des *Städtebaus* hingegen werden hauptsächlich von einer Gruppe vertreten, die gewisse weiterführende Parameter beeinflussen kann wie z.B. Architekten, Planer und politi-

sche Entscheidungsträger. *Ökologie* fasst die Aus- und Einwirkungen auf die Umwelt zusammen und *Standort* liefert die notwendigen Hintergrundinformationen zum Kontext der urbanen Struktur. Eine graphische Übersicht der erarbeiteten Unterbegriffe erster und zweiter Kategorie ist in Abbildung 4 dargestellt.

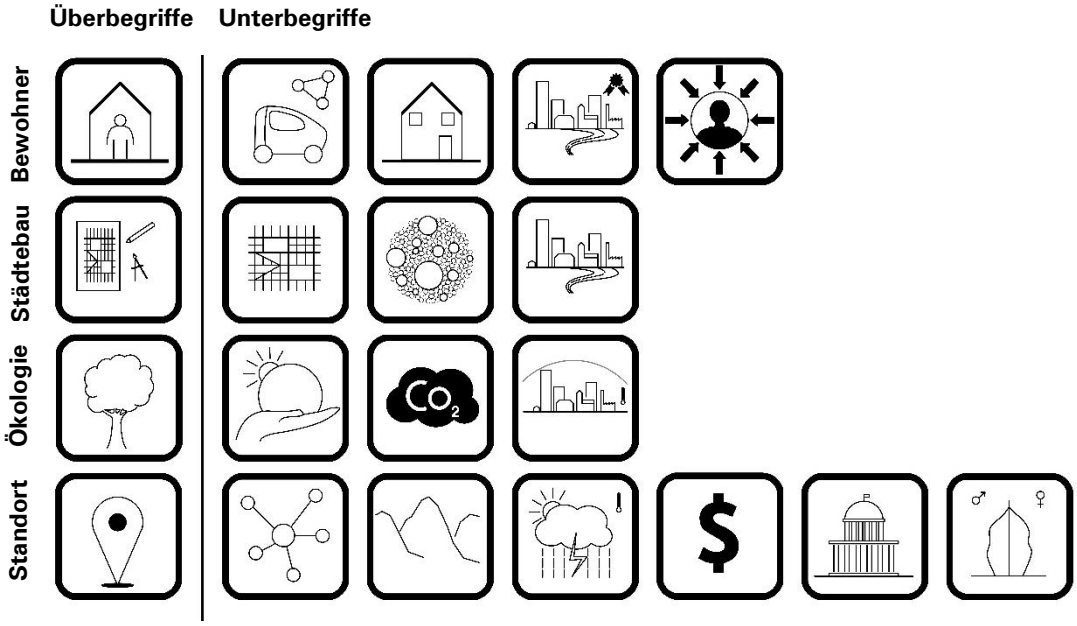


Abbildung 4: Graphische Übersicht der Parameter erster und zweiter Hierarchie

Es wird bewusst davon abgesehen, eine Systematisierung nach dem OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) Ansatz in Belastungsindikatoren, Zustandsindikatoren und Maßnahmenindikatoren vorzunehmen [20]. Die erarbeiteten Parameter sollen kein Indikatorensystem bilden, welches für eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung der Städte herangezogen werden soll bzw. politische Handlungsfelder aufweist, um eine entsprechende Nachhaltigkeit zu erreichen. Ziel dieser Parametersammlung ist es vielmehr, eine theoretische Auseinandersetzung mit dem Begriff *nachhaltige urbane Strukturen* zu erreichen und ihn mit all seinen wesentlichen Bestandteilen, Überbegriffen und deren Ableitungen zu erfassen. Hierzu gehören auch weiche Parameter, die nicht in Zahlen ausgedrückt werden können. Im Folgenden werden die einzelnen Parameter sowie deren Unterbegriffe definiert und ihre Relevanz in Bezug auf die Nachhaltigkeit urbaner Strukturen kurz umrissen. Der Fokus liegt dabei auf den ökologischen Auswirkungen, insbesondere auf dem Ressourcenverbrauch.

2.1.1 Bewohner

Einflüsse des Bewohners auf die Nachhaltigkeit eines Quartiers bzw. einer Stadt scheinen zunächst vor allem im Bereich der sozialen Nachhaltigkeit zu liegen. Es können aber auch andere Nachhaltigkeitsaspekte von den Bewohnern und Nutzern beeinflusst werden, u.a. durch ihr Verhalten. Dies kann bewusst, beispielsweise durch die entschiedene Wahl des Verkehrsmittels geschehen, aber auch unbewusst. Unbewusste Entscheidungen werden meist aufgrund von weichen Faktoren, wie z.B. dem Faktor Wohlfühlen getroffen oder basieren auf unbewussten Ansprüchen.

Die Kriterien, nach denen die Unterbegriffe zum Parameter Bewohner gewählt werden, lauten:

- Sie beschreiben Parameter, die Auswirkungen auf die gesamte urbane Struktur haben können und vom Bewohner ausgehen, bzw. von ihm direkt oder indirekt, bewusst oder unbewusst, beeinflusst werden.
- Sie liefern relevante Informationen, die nicht ausreichend aus anderen Teilbereichen verfügbar sind.

Die dadurch für den Einflussfaktor *Bewohner* erarbeiteten Unterbegriffe Mobilitätsverhalten, Wohnverhalten, Ansprüche und Verbraucherverhalten implizieren bereits einen breiten Grad an potentiellen Auswirkungen. Im Folgenden werden diese Unterbegriffe kurz umrissen und eine reduzierte Auswahl von relevanten Unterthemen vorgestellt. Dies stellt einen Auszug der vielzähligen Einzelaspekte dar, der zur Veranschaulichung der Parameter und ihrer Relevanz im Hinblick auf nachhaltige urbane Strukturen dient.

Mobilitätsverhalten

Gewohnheiten und Verhaltensweisen zur Mobilität des Einzelnen beeinflussen im Kollektiv das gesamte Quartier. Mobilität kann, neben der verkehrlichen, auch soziale oder wirtschaftliche Mobilität, Wohn- und Arbeitsplatzmobilität beschreiben [21]. Das Mobilitätsverhalten beschränkt sich in diesem Kontext auf verkehrliche Mobilität und damit u.a. auf die Art des Verkehrsmittels, die Frequenz und Dauer, mit der diese Verkehrsmittel genutzt werden sowie die dabei gewählte Art des Antriebs. Mobilität im digitalen Infrastrukturnetz des Internets wird in diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt. Wie folgende Beispiele zeigen, können die Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit von urbanen Räumen vor allem bzgl. ökologischer Aspekte wie Ressourcenverbrauch oder Emissionen bedeutsam sein.

Von 1976 bis 2015 hat sich laut Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur die Verkehrsleistung im Personenverkehr in Deutschland mehr als verdoppelt [22]. So wurden 1976 noch 600,3 Mrd. Personenkilometer verzeichnet, 2015 hingegen 1.251,3 Mrd. Hierbei beziffern Personenkilometer die Anzahl der Kilometer, die während eines Kalenderjahres auf bundesdeutschen Straßen bzw. im deutschen Luftraum zurückgelegt werden. Der Anteil des motorisierten Individualverkehrs (MIV) ist gravierend, jedoch in dem Zeitraum 1976-2015 mit ca. 75 % in etwa gleich geblieben – 445,9 Mrd. km im Jahr 1976 bzw. 945,7 Mrd. km im Jahr 2015. Eine wahrnehmbare Veränderung erfuhren zum einen der Luftverkehr, dessen Anteil

von 1,5 % auf 4,9 % anstieg und der Öffentliche Straßenpersonenverkehr (ÖSPV), welcher einen Rückgang von 11,5 % auf 6,2 % aufweist. Laut Umweltbundesamt (UBA) entstehen durchschnittlich 140 g Treibhausgase pro Personenkilometer bei einer PKW-Fahrt [23]. Entscheidend für die Menge der Emissionen ist die Antriebsart und das Gewicht des PKW. Dies zeigt, dass Bewohner durch ihr Mobilitätsverhalten die Emissionswerte aktiv beeinflussen. Ähnlich verhält es sich mit der aufzubringenden Infrastruktur, da eine zu hohe Auslastung einen Ausbau des Infrastrukturnetzes erforderlich macht und folglich den Ressourcenverbrauch erhöht. Neben Ressourcen für den Infrastrukturbau wird vor allem die Ressource Fläche durch Flächenneuinanspruchnahme verbraucht. Gemäß einem Umweltgutachten von 2012 des Sachverständigenrats für Umweltfragen benötigt fließender PKW-Verkehr etwa das Fünf- bis Zehnfache der Fläche, die der Fahrrad- bzw. Fußgängerverkehr beansprucht. Auch im ruhenden Zustand ist der Flächenbedarf für PKW um ein Fünffaches höher als beispielsweise für Fahrradfahrer [24]. Dabei könnten laut UBA bis zu 30 % der PKW-Fahrten durch das Fahrrad ersetzt werden [25]. Abbildung 5 zeigt, wie sich die unterschiedlichen Fortbewegungsarten im Tür-zu-Tür-Vergleich verhalten. Es wird deutlich, dass MIV im Stadtverkehr bei normalen Verkehrsaufkommen keine Zeitersparnis bedeutet und folglich durch alternative Fortbewegungsmittel ersetzt werden könnte.

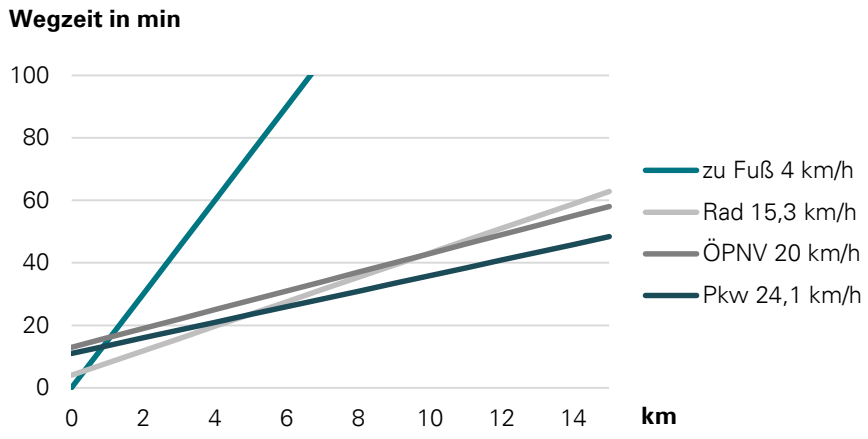


Abbildung 5: Vergleich der Wegzeiten, innerorts, erstellt nach [25]

Das Mobilitätsverhalten der Bewohner ist stets eng verbunden mit dem Standort des Wohn- und Arbeits- bzw. Ausbildungsortes. So weisen beispielsweise Bewohner von Trabantenstädten oder Vorstadtbezirken gänzlich andere Mobilitätsverhaltensweisen auf als zentrumsnah verortete Bewohner. Dies bestätigt eine Studie von Peng Du [26]. Hier wird u.a. das Mobilitätsverhalten von Bewohnern in Chicagos Stadtzentrum mit dem in einem Vorstadtviertel verglichen. Als Ergebnis der Analyse konnte festgestellt werden, dass sowohl aufgebrachte Zeit in Transportmitteln als auch gefahrene Kilometer pro Haushalt und Woche in dem Vorstadtviertel um 33 % bzw. 46 % größer ausfallen. Mit Nähe zum Stadtzentrum steigt hingegen die Nutzung von Fahrrad und Bus bzw. der Anteil der zu Fuß zurückgelegten Strecke an.

Wohnverhalten

Neben dem Mobilitätsverhalten können auch individuelle Gewohnheiten und Ansprüche sowie der durchschnittliche Lebensstandard Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit einer urbanen Struktur haben. Als bezeichnendes Beispiel kann das Wohnverhalten der Bewohner aufgeführt werden. In diesem Kontext bezieht der Parameter Wohnverhalten sowohl Haushaltsgrößen, Wohnfläche pro Person als auch Wohnstandard mit ein.

Die Quadratmeteranzahl Wohnraum pro Person stieg in Deutschland seit der Wiedervereinigung von 34,8 m² auf durchschnittlich 46,7 m² pro Person im Jahr 2019 an, wie aus Abbildung 6 ersichtlich [27]. Laut einer Studie von 2017 wird angenommen, dass die Pro-Kopf-Wohnfläche bis zum Jahr 2030 auf 55 m² in den neuen und 54 m² in den alten Bundesländern ansteigen wird [28]. In Deutschland hängt dies u.a. mit den sinkenden Haushaltsgrößen zusammen. So wächst der Anteil der Einpersonenhaushalte, während Haushalte mit mehr als drei Personen stetig zurückgehen [29].

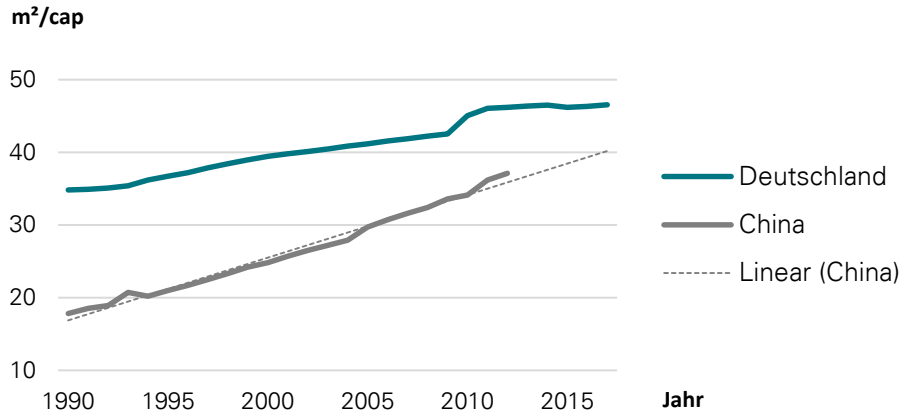


Abbildung 6: Entwicklung des Wohnraums pro Person von 1990-2016 in Deutschland und China auf Basis von [27], [31], grau gestrichelt: lineare Trendlinie China bis 2016

Ein weiterer Grund für den prognostizierten anhaltenden Anstieg der Wohnfläche pro Person könnte in einem erwarteten Bevölkerungsrückgang bis 2050 liegen, der vermehrten Leerstand und mehr verfügbare freie Wohnfläche pro Person fördert. Hinzu kommt, dass seit 1949 die Größe der Wohneinheiten in Wohngebäuden kontinuierlich zunimmt [30]. Für Ein- bzw. Zweifamilienhäuser bedeutet das einen Anstieg von 104 m² pro Wohneinheit im Jahr 1948 auf 140 m² für Gebäude der Jahre 2009 und später. Für alle Gebäudegrößen beläuft sich der Anstieg im selben Zeitraum von durchschnittlich 87 m² auf 116 m² pro Wohneinheit [30].

Bei der Betrachtung anderer Länder, vor allem jener, die zur Steigerung des Wohnraums pro Person auch einen enormen Bevölkerungszuwachs erfahren, ergeben sich noch deutlich gravierendere Unterschiede. Für die städtischen Gebiete Chinas entfielen laut National Bureau of Statistics of China im Jahr 2000 20,3 m² Wohnfläche auf eine Person und nur zwölf Jahre später bereits 32,9 m² mit steigender Tendenz [31]. Abbildung 6 stellt aufgrund der vollständigeren Datenlage die bisherige Entwicklung der Wohnfläche pro Person in Chinas ländlich geprägten Regionen dar. Sie fällt durchschnittlich 2-4 m² höher aus als die Werte für urbane Gegenden. Eine lineare Trendlinie deutet den weiteren Verlauf bis 2016 an. Prognosen zur Entwicklung bis 2050 zeigen, dass China mit den Industrienationen gleichziehen und ein durchschnittlicher Wohnbedarf von 46 m² pro Person erreichen wird [32]. Dies resultiert in einer Steigerung der Wohnfläche um 14 Mrd. m² im Zeitraum von 2012 bis 2050 auf letztendlich 62,9 Mrd. m² [32].

Der Anstieg der Wohnfläche mit zunehmender Industrialisierung Chinas lässt vermuten, dass sich das Wohnverhalten entsprechend der wirtschaftlichen Situation verändert. Isaac und van Vuuren stellten eine Korrelation zwischen BIP und Wohnfläche pro Person auf, die in Abbildung 7 abgebildet ist [33]. Durch diese Interdependenz ist besonders für Entwicklungs- und Schwellenländer, die in den nächsten Jahrzehnten wirtschaftlichen Aufschwung erfahren werden, ein Anstieg an Wohnfläche zu erwarten. Es werden nicht nur Wohnräume für die zukünftigen Bewohner dieser Länder benötigt, sondern auch für jene, die durch steigendes BIP mehr Wohnraum fordern werden. Dies zeigt auf, welch große Auswirkungen das Wohnverhalten der Bewohner auf den Ressourcenverbrauch und die Nachhaltigkeit der gesamten Struktur hat.

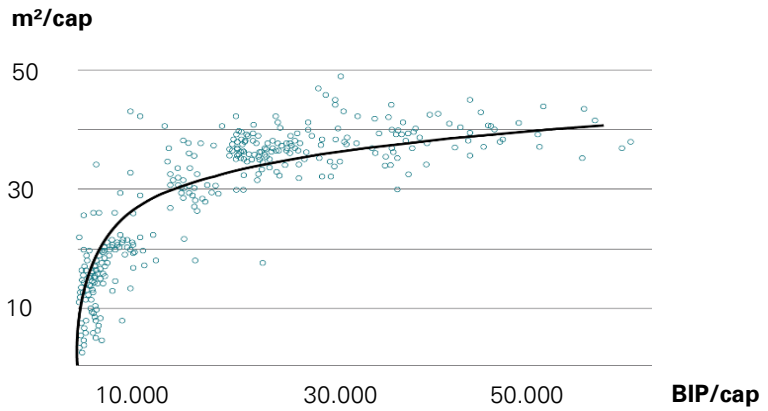


Abbildung 7: Korrelation m² Wohnfläche und BIP pro Person, erstellt nach [33]

Neben der Wohnfläche ergibt sich aus der Lage der Wohneinheit in urban oder ländlich geprägten Räumen ein weiterer Bestandteil des Wohnverhaltens. Während Mitte des vergangenen Jahrhunderts nur 29,6 % der globalen Bevölkerung in Städten lebten, ist seitdem ein kontinuierlicher Anstieg des urbanen Bevölkerungsanteils zu verzeichnen [2]. Teilweise bilden sich neue urbane Strukturen oder fügen sich in Agglomerationen aus mehreren benachbarten Städten zusammen. Seit 1950 hat sich die städtische Bevölkerung bereits mehr als verfünffacht. Sie wird sich bis 2035 sogar nochmals um 40 % erhöhen [2].

Abbildung 8 zeigt, wie sich die Bevölkerung in Städten unterschiedlicher Größe bis 2035 als mittelfristiges Szenario entwickelt. Aus dieser Grafik lässt sich erkennen, dass sich die urbane

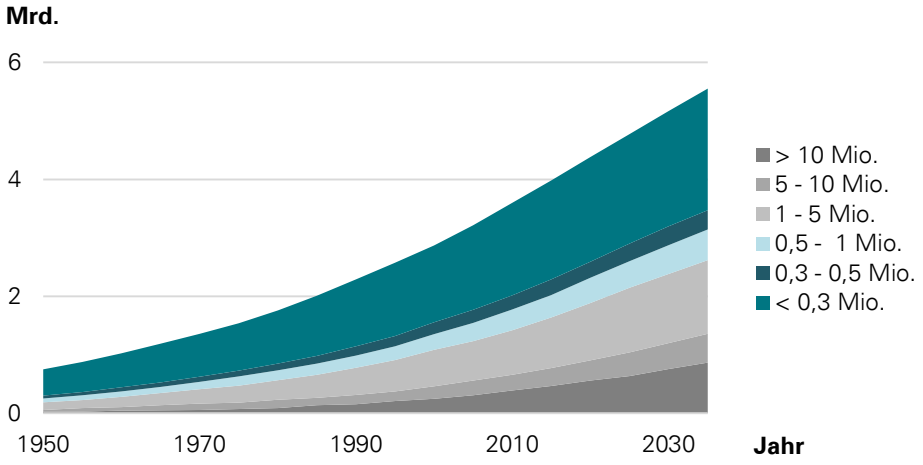


Abbildung 8: Bevölkerungsentwicklung in Städten weltweit seit 1950, Hochrechnung bis 2035, erstellt auf Grundlage der Daten aus [2]

Bevölkerung unterschiedlich stark auf die verschieden großen Städte oder Metropolen verteilt. Die Mehrheit der Menschen wird 2035 noch immer in kleineren Städten bis zu 300.000 Einwohnern wohnen, jedoch nehmen auch die kleineren Millionenstädte bis zu 5 Mio. Einwohnern einen signifikanten Anteil der Weltbevölkerung auf. Wie unter *Mobilitätsverhalten* bereits aufgezeigt, besteht hier ein enger Zusammenhang zwischen Wohn- und Mobilitätsverhalten in Abhängigkeit von der Größe der jeweils bewohnten urbanen Struktur. Aus dieser Interdependenz lassen sich weitere Aspekte einer nachhaltigen Stadtentwicklung ableiten.

Ansprüche

Bewohner erheben stets spezifische Ansprüche an das sie umgebende Umfeld. Für Bewohner urbaner Strukturen beziehen sich diese auf den unmittelbaren und größer gefassten urbanen Kontext. Die gestellten Ansprüche können quantitativ oder qualitativ ausfallen und sind für jeden Bewohner individuell abweichend, aber häufig dem Entwicklungsstand des Standorts und der jeweiligen Situation der Bewohner angepasst. Die Auswirkungen der Ansprüche äußern sich teilweise direkt im erhöhten Ressourcen- und Flächenverbrauch oder in veränderten Verhaltensweisen, die dann wiederum zu z.B. erhöhten Emissionswerten führen.

Als ein grundsätzlich bestehender, quantitativer Anspruch an das urbane Umfeld gilt der Bedarf nach ausreichend Wohnraum, der – wie bereits in *Wohnverhalten* beschrieben – stets im Zusammenhang mit entsprechendem Ressourcenaufwand steht. Neben einer geforderten Befriedigung der soziokulturellen Bedürfnisse nach Arbeit, Bildung und Kultur, Nahversorgungs- und Freizeiteinrichtungen bestehen Ansprüche an die Qualität der gebauten Umwelt. Auch hier werden fortlaufend durch Instandhaltungs- und Ausbaumaßnahmen Ressourcen zur Befriedigung von Ansprüchen reklamiert.

Freiräume gelten als qualitative Aufwertung urbaner Strukturen und beinhalten Bewegungsräume, Sport-, Wasser- und Erholungsflächen und andere unbebaute Grünflächen. Laut DGNB gelten 0,2 m²/BGF Wohnen und 0,1 m²/BGF Nicht-Wohnen als anzustrebende Richtwerte für Freiflächen von nachhaltigen Stadtquartiere [34]. Bei der Stadt München wird ein Grünflächenmindestbedarf von circa 17 m²/EW als Grundlage für Planungen herangezogen [35]. Hier wird eine maximale Entfernung bis 1 ha großen Freiflächen von 250 m zur Wohnung vorgeschlagen, bis 10 ha große Freiflächen sollten vom Wohngebiet max. 500 m entfernt sein, größere Freiflächen bis 40 ha und darüber sollten innerhalb eines Kilometers vom Stadtteil zu erreichen sein [35].

Ansprüche zu Maximaldistanzen und zur Quantität der Freiräume gehen einher mit dem Anspruch an die Qualität der Außenräume. Die Qualität kann neben der Aufenthaltsdauer im Außenraum auch unbewusst das Fortbewegen zu Fuß bzw. per Fahrrad beeinflussen. Hierbei bildet der thermische Komfort im Freien einen wesentlichen Bestandteil [36]. Entscheidend ist nicht nur die Lufttemperatur, sondern auch die Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit, die Sonneneinstrahlung und die Oberflächentemperatur der Umgebung. Diese Einflussfaktoren bilden abhängig voneinander einen Bereich, in dem sich zumindest eine Mehrheit der Bewohner wohlfühlt.

Weitere Ansprüche der Bewohner bestehen gegenüber der Lärm- und Schadstoffbelastung durch urbane Strukturen sowie gegenüber dem Einfluss durch andere Emissionen, wie z.B. Erschütterungen, Licht oder Strahlung. Wie das Beispiel der Lärmbelästigung zeigt, ist dies im urbanen Kontext nicht immer möglich. Hierauf wird unter *Emissionen* genauer eingegangen.

Verbraucherverhalten

Bewohner sind stets auch Konsumenten und damit Verbraucher von Ressourcen. Sie verbrauchen Energie, Wasser und andere Güter zur Aufrechterhaltung ihres Wohn- und Lebensstandards und konsumieren Nahrung. Durch sehr unterschiedliche Verhaltensweisen je nach Kultur oder Entwicklungsstand kann das Verbraucherverhalten der Bewohner einen großen Einfluss auf die Nachhaltigkeit der gesamten urbanen Struktur verüben.

In Deutschland basiert der Konsum der Bewohner auf natürlichen Ressourcen [37]. Welche Dimensionen der Rohstoffverbrauch in einer Industrienation wie Deutschland annimmt, zeigt eine Aufstellung in Abbildung 9.

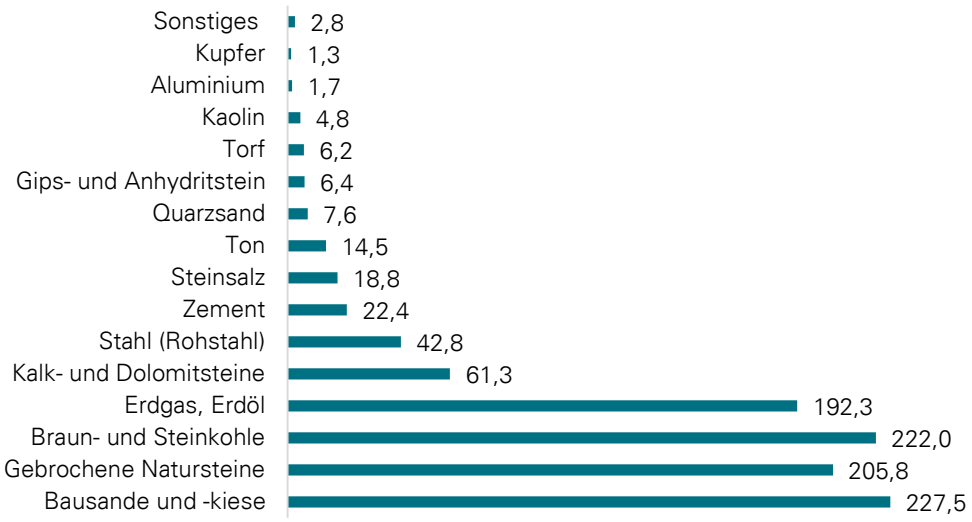


Abbildung 9: Durchschnittlicher Pro-Kopf-Rohstoffverbrauch im Leben eines Bundesbürgers im Jahr 2010 (in Tonnen), erstellt nach [38]

Insgesamt verbraucht jeder deutsche Bürger in durchschnittlich 80 Lebensjahren 1.038,2 t [38]. Den weitaus überwiegenden Anteil bilden die mineralischen Rohstoffe in der gebauten Umwelt und die Rohstoffe zur Energie- und Wärmegewinnung. Während der Rohstoffkonsum in den meisten Bereichen zwischen 1995 und 2011 zugenommen hat [37], ging der Verbrauch von Primärenergie in den letzten Jahren von 185,3 GJ pro Person in 1990 auf 157,7 GJ in 2016 leicht zurück [39].

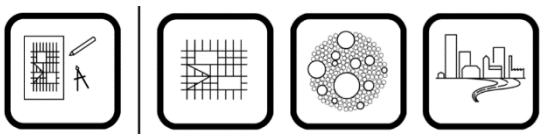
Global gesehen war in gleicher Zeitspanne jedoch ein Anstieg des Primärenergieverbrauchs von 69,6 GJ auf 77,6 GJ zu verzeichnen. Diese ansteigende Tendenz ist auch bei vielen anderen Industrienationen wahrnehmbar. Für die Länder der OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) ergab eine Analyse der Internationalen Energie Agentur im gleichen Zeitraum einen Anstieg des Primärenergieverbrauchs pro Person von 178,8 auf 193,7 GJ [39].

Im deutschlandweiten Vergleich des Endenergieverbrauchs stellen die Sektoren, die durch Bewohnerverhalten beeinflusst werden können, die deutliche Mehrheit dar. So verbrauchen Verkehr (30 %), Gewerbe/Handel/Dienstleistungen (16 %) und Privathaushalte (26 %) insgesamt 71 % der Endenergie, während auf die Industrie nur 29 % entfallen [30]. In Wohngebäuden von Privathaushalten wird die meiste Energie (63 %) für Raumwärme verwendet. Da derzeit der Energieverbrauch noch mit einem Emissionsaufkommen verbunden ist, ist dieser Faktor für eine Nachhaltigkeit im urbanen Raum aktuell noch nicht ganz irrelevant.

Ein weiterer beachtenswerter Faktor ist das Bewohnerverhalten in Bezug auf den Lebensmittelkonsum, da auch dieser Sektor große Auswirkungen auf die Umwelt hat. Je nach Ernährungsweise unterscheiden sich die dadurch verursachten CO_2-Emissionen markant. Die Unterschiede ergeben sich bei veganer, vegetarischer und konventioneller Ernährung wie auch durch den Bezug von ökologischen oder konventionellen Produkten [40]. Die Auswirkungen beziehen sich jedoch nicht nur auf die Emissionen oder den Wasserverbrauch, sondern auch auf die Ressource Fläche. Durch den globalen Anstieg der Weltbevölkerung reduzierte sich in den letzten Jahrzehnten die pro Kopf verfügbare landwirtschaftliche Fläche [24]. Ein gewisser Anteil kann durch gesteigerte Effizienz in der Landwirtschaft kompensiert werden. Dem steht jedoch entgegen, dass sich auch in den sog. Entwicklungs- und Schwellenländern die Essgewohnheiten denen der Industrienationen annähern und die Produktion dieser Ernährung deutlich mehr Fläche beansprucht [24]. Bruinsma erwartet z.B. einen Anstieg der landwirtschaftlichen Fläche für die Entwicklungs- und Schwellenländer im Zeitraum 2005 bis 2050 um 12,4 % [41]. In der gleichen Zeitspanne wird laut den Vereinten Nationen mit einem Anstieg der Bevölkerung in diesen Ländern um 58,6 % gerechnet [42]. Diese Zahlen zeigen ein gravierendes Ungleichgewicht auf. Damit die gewachsene Weltbevölkerung ausgewogen versorgt werden kann, müssen die Erträge pro Bezugsfläche deutlich ansteigen und die generelle Verteilung der Lebensmittel ausgeglichener werden oder es muss sich das globale Ernährungsverhalten maßgeblich verändern. Hochrechnungen der FAO zeigen jedoch, dass 70 % mehr Lebensmittel produziert werden müssen als noch 2013, um 9 Mrd. Menschen zu versorgen [43].

Insgesamt zeigt sich deutlich, dass das Verbraucherverhalten in vielerlei Hinsicht Auswirkungen auf die Ressourcen- und Flächenverbräuche hat und daher ein beachtenswerter Faktor bei der Betrachtung zur Zukunftsfähigkeit von Regionen ist.

2.1.2 Städtebau



FINDEX Bau setzt den Begriff Städtebau vor allem mit Planungsaspekten in Verbindung. Die aufgelisteten Unterkategorien lauten Bauleitplanung, Infrastrukturplanung, Nahbereichs- und Stadtplanung, Rahmenplanung und Siedlungswesen [18]. Im vorliegenden Kontext wird unter Städtebau jedoch nicht nur der planerische Aspekt der Stadtplanung in Form des Begriffs *Stadt- und Regionalentwicklung* berücksichtigt, sondern auch die Parameter *urbane Dichte* und *urbanes Umfeld*. Diese ganzheitlichere Auffassung von Städtebau reflektiert also auch die materielle Komponente der gebauten Umwelt, welche sämtliche Hoch- und Tiefbauten innerhalb der städtischen Grenzen miteinbezieht, die nicht Teil der natürlichen Umwelt sind. Hiervon ausgenommen sind bauliche Maßnahmen außerhalb der urbanen Zentren, die dennoch für die Versorgung der urbanen Strukturen notwendig sind.

Die Kriterien, die für die Auswahl dieser Unterbegriffe zutreffen, lauten:

- Sie beschreiben Aspekte der Begriffsdefinition von Städtebau und damit die räumliche und bauliche Gestaltung von Lebensbereichen in urbanen Strukturen zur Erfüllung menschlicher Bedürfnisse [44].
- Sie liefern relevante Informationen, die nicht ausreichend aus anderen Teilbereichen verfügbar sind.

Im Folgenden werden diese Unterbegriffe kurz umrissen und eine reduzierte Auswahl von relevanten Unterthemen vorgestellt. Dies stellt nur einen Auszug der zahllosen Einzelaspekte dar, der zur Veranschaulichung der Parameter und ihrer Relevanz im Hinblick auf nachhaltige urbane Strukturen dient.

Stadt- und Regionalentwicklung

Unter diesem Überbegriff werden Elemente des Städtebaus und der Stadtplanung verstanden, die während der Planung und Entwicklung von Städten und Regionen gesteuert und berücksichtigt werden können. Der Fokus liegt hier auf den einzelnen (Planungs-)Prozessen und der tatsächlichen praktischen Durchführung. Die Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit der Stadt bzw. Region können ökologischer, sozialer und ökonomischer Art sein.

Für eine nachhaltige Stadtentwicklung ist laut SOC 3.2 der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) z.B. ein gewisser Grad an sozialer und funktionaler Mischung notwendig. Soziale Mischung berücksichtigt dabei sowohl die demografische Struktur der Bewohner als auch Wohn- und Arbeitstypologien. Funktionale Mischung bezieht sich auf die Nutzungsart der geplanten Gebäude. Hierbei wird für die Planung eines Quartiers ein Anteil der Wohnnutzung zwischen 50,1 % und 70 % als optimal angesehen [45].

Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinwirkungen oder Einwirkungen aus dem sozialen bzw. ökonomischen Bereich wird unter dem Begriff *Resilienz* ebenfalls als ein bei der Stadt- und Regionalentwicklung zu berücksichtigender Faktor aufgelistet [46]. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) beschreibt Resilienz als die Fähigkeit eines Sozial- oder Ökosystems, bei Störungen Funktionsweisen und Grundstruktur aufrecht zu erhalten [47]. Die DGNB wendet diesen Begriff insofern auf urbane Strukturen an, als dass sich diese durch

einen hohen Grad an Flexibilität und Redundanz auszeichnen und damit widerstandsfähige Gebilde für eine zukunftsfähige Besiedlung darstellen. Hierbei werden Teilausfälle oder Störungen technischen, ökologischen und ökonomischen Ursprungs mit einbezogen [46]. Resilienz ist daher auch ein wesentlicher Bestandteil eines nachhaltigen urbanen Systems und muss bereits bei der Planung beachtet werden.

Weitergehend können Planungsprozesse Einfluss auf die Zukunftsfähigkeit der Stadt- und Regionalentwicklung ausüben. Eine integrale Planung mit interdisziplinären Planungstreffen aller beteiligten Fachbereiche spielt dabei eine große Rolle [48] sowie die Partizipation von und die Transparenz gegenüber Bürgern und späteren Bewohnern bzw. Nutzern [49]. Frühzeitiger Einbezug dieser beteiligten Gruppen kann zu einer Problemfrüherkennung führen, die sowohl die Planungsprozesse beschleunigt als auch die spätere Akzeptanz in der Bevölkerung begünstigt. Da während der Planung die Entscheidungen zu Gebäudeformationen und -kubaturen, infrastrukturellen Maßnahmen und Schutzabständen, Durchlüftung oder Verschattung getroffen werden, hat der Parameter *Planungsprozesse* auch einen wesentlichen Einfluss auf die Ressourcenverwendung. Damit können u.a. die Auswirkungen auf das Mikroklima Stadt und den Komfort der Bewohner gelenkt werden.

Die Rahmenbedingungen für die Handlungsprozesse in der Stadt- und Regionalentwicklung und der baulichen Umsetzungen werden durch Richtlinien gebildet. Die Entscheidungsebenen reichen von übergeordneten, internationalen Ebenen, wie etwa EU-bedingten Richtlinien, bis hin zur Bundes-, Landes-, Regional-, Kreis- und städtischen Ebene [21]. Für die Raumordnung ergeben sich nach der Europäischen Raumordnung noch sieben weitere Stufen der räumlichen Planung, die sich jeweils im Detaillierungsgrad unterscheiden [21]. Die jeweiligen Vorgaben können erhebliche Auswirkungen auf die Gestaltung, aber auch auf die Nachhaltigkeit von Städten, Quartieren und Gebäuden haben. Zum einen kann Art und Maß der baulichen Nutzung und damit im Wesentlichen die Dichte der Bebauung eines Quartiers festgelegt werden (Baunutzungsverordnung, BauNVO), zum anderen können Mindestabstände, Brach-, Frei- und Bebauungsflächen oder auch Naturschutzgebiete ausgewiesen werden.

Bestimmte Richtlinien auf Landesebene, wie z.B. die Landesbauordnung (LBO), regeln die Ausführung und die technischen bzw. rechtlichen Bestimmungen von baulichen Anlagen und Bauprodukten und haben dadurch großen Einfluss und Auswirkungen auf die urbanen Strukturen, auf die sie angewandt werden.

Bundesweit wirksam ist beispielsweise die Energieeinsparverordnung (EnEV), die 2002 die bis dahin gültige Wärmeschutzverordnung ablöste und seitdem die Anforderungen an eine Energieeinsparung in Gebäuden festlegt und damit den Energieverbrauch von Gebäuden restringiert [50].

In vielen deutschen und europäischen Städten gelten aktuell auch städtische Höhenrestriktionen, die eine vertikale Expansion der Städte begrenzen. Dies liegt in Europa meist darin begründet, dass historische Stadtbilder und die Blickbezüge darauf gewahrt werden sollen. Auch die Nähe zu Flughäfen bzw. Einflugschneisen können Höhenbegrenzungen in bestimmten Gebieten einer Stadt fordern. Außerhalb Europas und historischer Stadtkerne können ebenfalls städtebauliche Beschränkungen zur Höhenentwicklung gelten. So besteht seit 1916 und nach einer Reformation 1961 in New York City die *Zoning Resolution*, die für den gesamten Stadtbezirk Vorgaben macht, die die Gebäudehöhen bzw. -formen beeinflussen [51]. Die heute immer noch geltende Regelung besagt, dass Gebäude nur bis zu bestimmten Höhen die Straßen säumen dürfen und darüber zurückgesetzt werden müssen.

Aus den vorangegangenen Beispielen wird ersichtlich, dass Richtlinien sowie Planungsprozesse in der Stadt- und Regionalplanung gezielt Flächen- oder Energieverbräuche steuern können. Um auch den Ressourcenverbrauch zu regulieren, wäre eine Erweiterung der Richtlinien für den Bau von Gebäuden beispielsweise durch eine Begrenzung des Ressourcenaufwands oder verpflichtendes recyclinggerechtes Bauen notwendig.

Urbane Dichte

Bauliche Dichte stellt einen elementaren Charakter von Siedlungen dar. Sie entstand ursprünglich durch das Gruppieren von menschlichen Habitaten, dessen Bewohner von einem engen Zusammenleben und kurzen Distanzen profitierten. Es bedeutete sowohl Sicherheit gegenüber externen Bedrohungen als auch komfortablere Lebensbedingungen, da die Versorgung der Einzelnen auf mehrere Mitglieder der Gemeinschaft aufgeteilt werden konnte [1].

Dichte kann heute unterschiedlichste Verhältnisse beschreiben. Je nach Zusammenhang können damit Wohneinheiten oder Einwohner pro Referenzfläche gemeint sein oder die Grundflächenzahl (GRZ) bzw. Geschossflächenzahl (GFZ), die laut § 16 der BauNVO ein Maß der baulichen Nutzung beziffert. In [52] werden neben den genannten Einheiten auch die mittlere Anzahl der Haushalte oder die mittlere Geschoss-Nutzfläche pro Referenzfläche aufgeführt. Des Weiteren kann auch die mittlere Anzahl m² Verkehrsfläche bzw. versiegelter Grundfläche pro Referenzflächeneinheit als Dichte bezeichnet werden. Auch die Anschlussdichte von Versorgungsleitungen (z.B. Wasser, Wärme, Energie) stellt eine Auslegung von Dichte dar.

Die urbane Dichte übt dabei einen wesentlichen Einfluss auf die Menge an versiegelter Fläche aus. Je dichter eine urbane Struktur besiedelt ist, desto weniger der Ressource Fläche wird verbraucht. Global gesehen verteilen sich alle Menschen auf insgesamt 134 Mio. km² Landmasse [53]. Bei einer Weltbevölkerung von ca. 7,8 Mrd. Menschen bedeutet dies eine durchschnittliche Dichte auf jedem verfügbaren Quadratkilometer der Erde von 58 Einwohnern. Doch der Großteil der Landfläche ist durch Unland, Wald oder landwirtschaftlich genutzte Fläche belegt. Da sich die Angaben zur tatsächlichen, urban genutzten Fläche stark unterscheiden, existiert ein breiter Korridor für die globale Dichte je urbaner Fläche. Je nach Literaturquelle variieren die Angaben zur besiedelten Fläche zwischen 1,5-3 % der globalen Landmasse. Umgerechnet bedeutet dies 2 Mio. km² (Stand 2008, [53]) bis ca. 4 Mio. km² [54]. Laut Berechnungen der NASA beläuft sich die urbane Fläche auf 3,6 Mio. km² [55]. Je nach Datengrundlage fällt die tatsächliche, durchschnittliche Siedlungsdichte zwischen 1.950 und 3.900 EW/km² aus. Ein Grund für diese Unterschiede liegt in den verschiedenen Definitionen von urban genutzter Fläche. Liu et al. veröffentlichten 2014 dazu eine Zusammenstellung der unterschiedlichen Kalkulationsmethoden und -ergebnisse [56]. Hier wird z.B. die Gesamtfläche an versiegeltem Boden mit ca. 600.000 km^2 angegeben. Der gesamte Flächenverbrauch von Städten beinhaltet jedoch nicht nur versiegelte Siedlungs- und Verkehrsflächen, sondern auch Grünanlagen, landwirtschaftlich genutzte Flächen und Erholungsflächen.

Laut Walter Christaller gibt es eine gewisse Mindestdichte, die ursprünglich 1933 im Zentrale-Orte-Konzept festgehalten wurde. Hier setzt Christaller eine Gliederung in Oberzentren, Mittelzentren, Unter- und Kleinzentren als Grundlage für ein funktionierendes Stadtgefüge voraus, da nicht jedes einzelne Zentrum ein optimales und umfassendes Angebot für seine Bewohner bieten kann [57]. Durch Vergrößerung des Einzugsbereichs hingegen können diese Defizite im Kollektiv der Zentren ausgeglichen werden. Das Zentrale-Orte-Konzept wird immer noch

angewandt und war z.B. 2011, viele Jahrzehnte nach seiner Einführung, Grundlage der Einteilung ausgewiesener Orte in Deutschland des Bundesamts für Bauwesen und Raumordnung [58].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die urbane Dichte, die hier pauschalisierend als Einwohner pro Referenzfläche bezeichnet wird, Auswirkungen auf den Verbrauch der Ressource Fläche, aber auch auf den Verbrauch von natürlichen Ressourcen hat. Dies resultiert vor allem aus kürzeren Wegen und einer Erhöhung der gemeinschaftlichen Nutzung von Infrastruktur und Fläche.

Urbanes Umfeld

Dieser Parameter umfasst die gesamte gebaute Umwelt und damit sämtliche Verkehrs- und Versorgungsanlagen und Gebäude einer urbanen Struktur. Damit ist er ein sehr umfangreicher Parameter und lässt sich in zahllose Unterbegriffe untergliedern. Die Auswirkungen auf die urbane Nachhaltigkeit sind sehr vielschichtig, denn durch die jeweilige Nutzung eines Gebäudes kann auch die soziale Komponente beeinflusst werden. Ebenso können durch entsprechend integrierte Konzepte Emissionen und Ressourcenverbrauch von Bauwerken gesteuert werden.

Verkehrs- und Versorgungsanlagen sind ein elementarer Bestandteil von modernen Gesellschaften. Diese Infrastruktursysteme transportieren Stoffströme, Informationen und Güter, ermöglichen Mobilität, erschließen Räume und garantieren eine Verfügbarkeit von Umweltressourcen für eine Verwendung im urbanen Kontext [59]. Dadurch machen sie Ressourcen nicht nur nutzbar, sondern haben selbst einen großen Anteil am Ressourcenverbrauch durch ihre Errichtung, den Betrieb und die Instandhaltung. Neben dem Verbrauch von Energieressourcen bei Herstellung und Betrieb sind daher vor allem die Flächeninanspruchnahme und die Menge an verbauten Rohstoffen, darunter z.B. Sand, bei einer Verbrauchskalkulation zu berücksichtigen. Ausschlaggebend für die benötigte Infrastruktur ist das jeweilige Nutzeraufkommen, welches u.a. vom Mobilitäts- und Verbraucherverhalten der Bewohner abhängig ist (siehe dazu Kapitel 2.1.1).

Laut FINDEX Bau sind in der Kategorie der Verkehrsanlagen folgende Begriffe vermerkt: Flughäfen sowie alle damit verbundenen Bahnen und Gebäude, Fußgängerwege, Gleisanlagen sowie sämtliche Trassen und alle entsprechenden Hoch- bzw. Tiefbauten, Straßen und Wasserwege [18]. Unter Versorgungsanlagen werden darin sämtliche Anlagen zur Gewinnung bzw. Nutzung und weiteren Verteilung von Gas, Kälte, Öl, Strom, Wärme und Wasser aufgeführt. Da dieses Indexierungssystem aus dem Jahr 1985 stammt und der Begriff Internet damals noch keine Relevanz besaß, muss dieser den Versorgungsanlagen hinzugefügt werden. Auch hier tritt Ressourcenverbrauch auf, der in seinem Ausmaß stark von der Anzahl der Versorgungsanschlüsse und den Verbrauchswerten und damit wiederum von den Bewohnern abhängt.

Sensibilisiert für den Ressourcenverbrauch von technischen Infrastrukturen, erstellte das Umweltbundesamtes (UBA) im Jahr 2017 den Bericht „Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest“, der sich mit dem Ressourceneinsparungspotential von Infrastruktursystemen beschäftigt [59]. Ein Handlungsbedarf ergibt sich dem UBA zufolge nicht nur aus ökologischen Aspekten, sondern auch daraus, dass einige dieser Rohstoffe zunehmend knapper und damit teurer werden. Laut eines Berichts aus dem

Jahr 2011 umfasst der Materialbestand der Verkehrs-, (Ab-)Wasser- und Energieinfrastrukturanlagen in Deutschland ca. 11,1 Mrd. t [60]. Der größte Anteil davon fällt für die Straßeninfrastruktur an (7,2 Mrd. t). Markant dabei ist, dass fast 99 % des gesamten Materialbestandes aus mineralischen Rohstoffen wie Sand und Kies bestehen [60].

Ein weiterer, essentieller Bestandteil der bebauten Umwelt sind die Hochbauten. Gemäß einem Gebäudereport der Deutschen Energie-Agentur von 2016 existieren in Deutschland 18,7 Mio. Wohngebäude und ca. 2,7 Mio. Nichtwohngebäude (ohne Industrie) [30]. Auch diese Bauten beanspruchen natürliche Ressourcen und sollten daher Anforderungen erfüllen, die eine möglichst lange Lebensdauer und einen zukunftsfähigen, emissionsarmen Umgang mit Rohstoffen ermöglichen.

Eine den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes umfassende Vergleichsgröße stellen Angaben zum Verbrauch von sog. Grauer Energie dar. Graue Energie bezeichnet jeden Energieaufwand, der während der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung, Gebäudeerstellung, Instandhaltung und Modernisierung anfällt sowie die Energie, die für den Abbruch des Gebäudes notwendig wird [50]. Wie im einleitenden Kapitel beschrieben, verursacht die Graue Energie – je nach Strommix – einen ähnlich großen Energieverbrauch, wie die Betriebsenergie über mehrere Jahrzehnte hinweg. Es stellt sich folglich nicht nur die Frage wie viel Energie ein Gebäude für den Betrieb benötigt, sondern auch wie viele und welche Rohstoffe und Ressourcen wie miteinander verbunden und für den Bau des Gebäudes verwendet werden. Hierbei können Ökobilanzierungssysteme und -datenbanken wie z.B. Ökobaudat oder Materialflussanalysen eine Vorstellung zu diesem Aspekt der Nachhaltigkeit vermitteln. Zertifizierungssysteme, wie die von DGNB, LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) oder BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology) bieten zudem einen möglichst umfassenden Eindruck der Nachhaltigkeit von Gebäuden oder Vierteln.

Durch den Bau und die Erweiterung des urbanen Umfelds entstand in Deutschland ein immenses anthropogenes Lager. Die dabei verbauten Sekundärrohstoffe wurden 2015 vom UBA kartiert. Damit wurden die Grundlagen für ein dauerhaftes Monitoring dieser Materialflüsse geschaffen, um diese Rohstoffe langfristig verwendbar zu machen. Demnach häuften sich in Deutschland bis 2015 bereits ca. 28 Mrd. t Material an, wovon 26 Mrd. t mineralische Materialien wie Beton und Mauersteine ausmachen [61]. Die Materialmenge in Hochbauten ist mit 15,3 Mrd. t für über 50 % verantwortlich. Mit diesem enormen Bauvolumen einher geht die Frage nach dem Umgang mit dem (Bau-)Abfallaufkommen und seinem Volumen. Laut UBA sank zwar zwischen 2000 und 2015 das Netto-Abfallaufkommen um ca. 14 %, das Bruttoaufkommen stieg jedoch von 373 Mio. t in 2006 auf 402 Mio. t in 2015 an [62]. Den mit 52 % größten Anteil machten davon die Bau- und Abbruchabfälle aus.

Die Notwendigkeit eines Recyclings – bezogen auf Baustoffe – wurde in Deutschland bereits in den Nachkriegsjahren nach dem 2. Weltkrieg offenbar. Damals wurden die Gebäuderuinen als Rohstofflager genutzt und somit aktives Baustoffrecycling umgesetzt. In den 1980er Jahren wurde diese Vorgehensweise durch stationäre Recyclinganlagen noch weiter etabliert [63]. Ein großer Anteil der aktuellen Abfallmengen (2014: 202 Mio. t, [62]) wird zwar wiederverwertet, die tatsächliche Recyclingquote ist jedoch deutlich geringer und unterscheidet sich signifikant je nach Abfallart. Die unterschiedlichen Recyclingquoten können der Abbildung 10 entnommen werden.

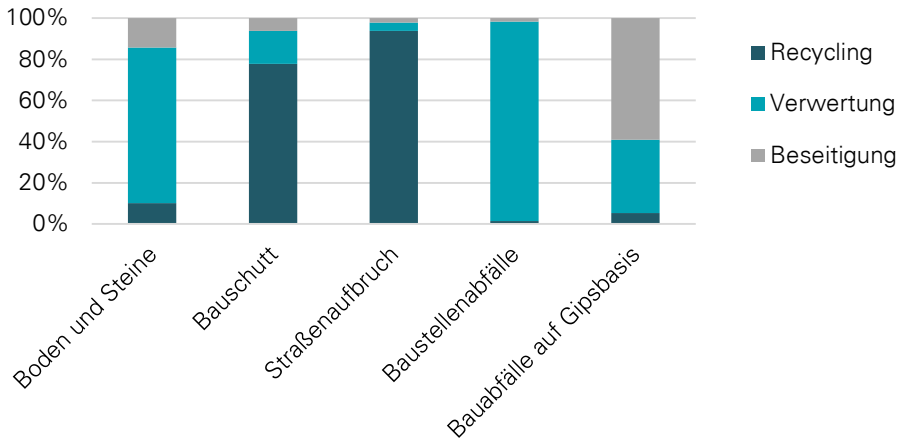


Abbildung 10: Recyclingquoten der deutschen Bauabfälle, erstellt nach [64]

Abbildung 10 zeigt deutlich die große Spannweite an tatsächlichem Recycling je nach Abfallart. Während Straßenaufbruch und Bauschutt durchaus einen hohen Rezyklierungsgrad aufweisen, sind vor allem Baustellenabfälle und Bauabfälle auf Gipsbasis kaum zu rezyklieren.

Im Jahr 2014 deckten Recycling-Baustoffe immerhin 12,3 % des Gesamtbedarfs an Gesteinskörnungen. Die Verwertungsmöglichkeiten aufgrund ihrer stofflichen Zusammensetzung sprechen allerdings oft eher für ein sog. Downcycling. So werden nur ca. 20,7 % der mineralischen Bauabfälle in der Asphalt- und Betonherstellung verwertet, 24,3 % im Erdbau und 52,5 % im Straßenbau. Die restlichen 2,5 % werden überwiegend im Deponiebau verwertet [64]. In absoluten Zahlen bedeutet das beispielsweise für Baden-Württemberg, dass von den jährlich anfallenden 36,3 Mio. t Bau- und Abbruchabfällen 9,4 Mio. t als Recycling-Baustoffgemische verwendet werden und davon wiederum nur 0,07 Mio. t und damit 0,2 % aller Bau- und Abbruchabfälle als Zuschlag für Recyclingbeton [65].

2.1.3 Ökologie

Ökologische Aspekte sind in der Definition des Begriffs Nachhaltigkeit ein fundamentaler Bestandteil. So liegt auch für die Nachhaltigkeit im städtischen Kontext der Fokus nicht nur auf der gebauten, sondern auch auf der natürlichen Umwelt. Im urbanen Rahmen bezieht sich Ökologie hier vor allem auf die Wechselbeziehung zwischen urbaner Struktur und natürlicher Umwelt. Präzisiert geht es um die Auswirkungen der urbanen Struktur auf die natürliche Umwelt und um die Einwirkungen der natürlichen Umwelt auf die urbane Struktur. Hierfür werden die Begriffe *Umgang mit natürlichen Ressourcen*, *Emissionen* und *Stadtklima* als zweite Hierarchiestufen vom Überbegriff Ökologie formuliert.

Die Kriterien, die für die Auswahl dieser Unterbegriffe zutreffen, lauten:

- Sie beschreiben Aspekte einer im urbanen Kontext stattfindenden Wechselbeziehung zwischen Bewohnern und ihrer Umwelt bzw. zwischen gebauter und natürlicher Umwelt.
- Sie liefern relevante Informationen, die nicht ausreichend aus anderen Teilbereichen verfügbar sind.

Im Folgenden werden diese Unterbegriffe kurz umrissen und eine Auswahl an relevanten Unterthemen zur Nachhaltigkeit vorgestellt. Dies stellt, wie bei den Parametern *Bewohner* und *Städtebau,* nur einen Auszug der vielzähligen Einzelaspekte dar, der zur Veranschaulichung der Parameter und ihrer Relevanz im Hinblick auf nachhaltige urbane Strukturen dient.

Umgang mit natürlichen Ressourcen

Das UBA definiert den Begriff *natürliche Ressourcen* prinzipiell als Bestandteil der Natur. Dies beinhaltet sowohl nicht erneuerbare als auch regenerative Primärrohstoffe, physischen Raum, Umweltmedien wie Wasser, Boden, Luft, strömende Ressourcen wie Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie sowie Biodiversität [66].

Die Verwendung globaler Ressourcen konzentriert sich auf urbane Räume. So endeten beispielsweise bereits 2005 ca. 75 % aller Energie- und Materialströme in Städten [67], weshalb die Betrachtung des Umgangs mit natürlichen Ressourcen einen äußerst wichtigen Aspekt nachhaltiger urbaner Strukturen darstellt. Die fortwährende Urbanisierung mit Zunahme der Stadtbevölkerung vergrößert den Einfluss der Städte in Bezug auf den Ressourcenverbrauch weiterhin.

Stoffstromindikatoren wie DMC (Domestic Material Consumption), TMC (Total Material Consumption) oder RMI (Raw Material Index) dienen dazu, die Menge an verbrauchten, exportierten oder importierten Ressourcen zu umfassen. Sie werden in der Einheit t/a angegeben und beziehen sich auf den Materialverbrauch und den Eingang von Materialien in ein ökonomisches System pro Jahr [66].

DMC ist der am besten bestimmbare Indikator. Er beschreibt den Konsum aller Materialien innerhalb eines Systems und schließt bereits sämtliche Materialexporte aus [66]. Für Städte ist der Indikator DMC jedoch fehlerbehaftet, da Städte häufig Produkte importieren, deren Materialströme außerhalb der städtischen Grenzen stattfinden [68]. Auch auf Länderebene

zeigen sich die Grenzen der Verlässlichkeit von DMC, da den extrahierenden und exportierenden Ländern der gesamte Umfang der Rohstoffförderung zugesprochen wird, obwohl sie unter Umständen nicht die Konsumenten dieser Rohstoffe sind [68].

Ein zutreffenderer Indikator im Vergleich zu DMC ist TMC. Hier werden alle direkten, indirekten und versteckten Materialströme einbezogen, in fester, flüssiger und gasförmiger Form, die zur weiteren Verarbeitung bzw. Verwendung in einen Wirtschaftskreislauf eingeführt werden [66], [68]. Da TMC jedoch äußerst aufwendig zu ermitteln ist, wird trotz der Einschränkungen meist DMC als Vergleichswert verwendet. Abbildung 11 zeigt die prognostizierte Entwicklung des DMC für urbane Räume nach Regionen. Hieraus wird deutlich erkennbar, welch enormer Anstieg vor allem für die urbanen Gebiete Afrikas zu erwarten ist, da diese Region bis 2050 nach Ostasien der größte Konsument von Rohstoffen sein wird. Global wird der urbane DMC von 41 Mrd. t pro Jahr auf ca. 89 Mrd. t ansteigen [68]. Auch der Anteil des urbanen DMC am globalen DMC wird von 50 % im Jahr 2010 auf über 60 % für 2050 ansteigen [68].

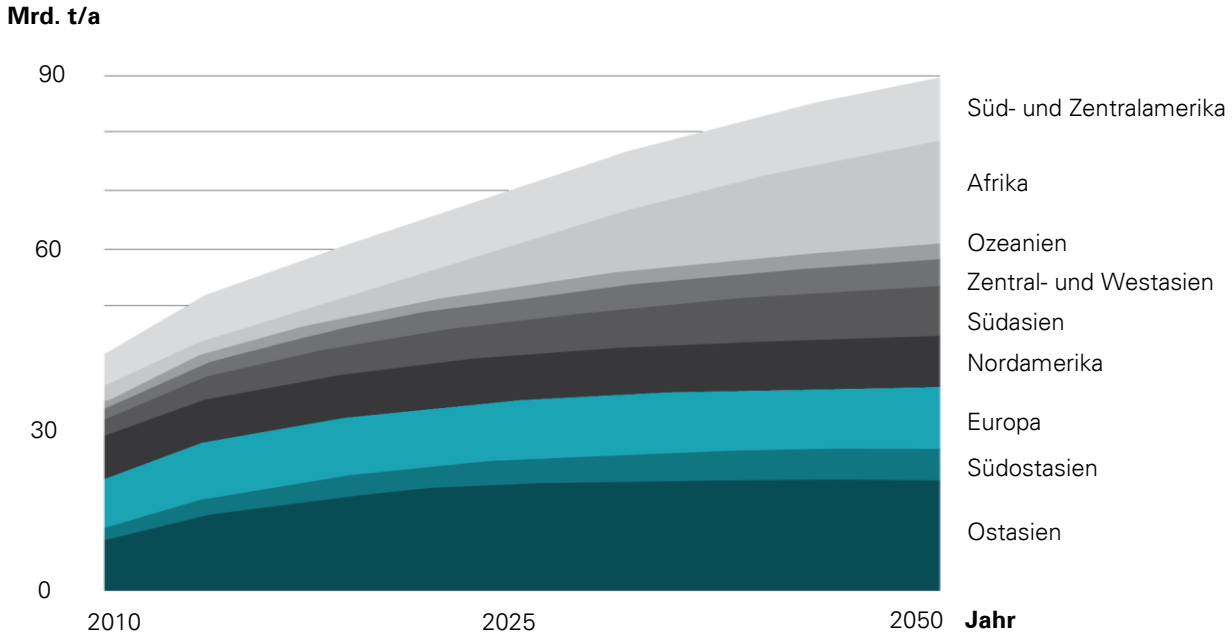


Abbildung 11: Materialverbrauch in urbanen Strukturen pro Jahr gegliedert nach Weltregionen [68]

Dem quantitativen Anstieg um ca. 116 % steht ein Anstieg der urbanen Bevölkerung im selben Zeitraum um nur 86 % von 3,595 Mrd. auf 6,680 Mrd. gegenüber [2]. Diese Diskrepanz erklärt sich möglicherweise daraus, dass ein Zusammenhang zwischen BIP und DMC besteht und dass mit zunehmendem Wohlstand mehr Rohstoffe konsumiert werden [69].

Im Jahr 2010 umfassten die Stoffströme der deutschen Bautätigkeit, die in den Wohnungs- und Nichtwohnungsbau einflossen, eine Summe von rund 121 Mio. t [70]. Davon entfallen 101 Mio. t auf mineralische Bauprodukte. Dem steht ein Output, bzw. eine Ausgangsmenge von 42 Mio. t gegenüber, die durch Abbruch oder Umbau von Hochbauten theoretisch für eine Sekundärrohstofferzeugung verfügbar wird [70]. Baumaßnahmen zur Infrastruktur sind bei dieser Kalkulation nicht mit eingeschlossen.

Neben dem Verbrauch an Primär- und Sekundärrohstoffen stellt auch der Verbrauch physischen Raumes bzw. die Flächenneuinanspruchnahme einen relevanten Umweltfaktor dar, da freie und nutzbare Fläche global begrenzt ist. Wie in *Urbane Dichte* bereits aufgeführt, fällt die Flächenbestimmung der Landmasse je nach Berechnungsmethode unterschiedlich aus. Eine

Aufgliederung der Landmasse, auf die sich auch das UBA bezieht, beschreibt die Verteilung der Fläche von den zur Verfügung stehenden 13,4 Mrd. ha in ca. 0,2 Mrd. ha Fläche für Städte und Infrastruktur, 5 Mrd. ha landwirtschaftlicher Nutz- und Agrarfläche, 3,9 Mrd. ha Wald und 4,3 Mrd. ha sogenanntes Unland, welches Wüsten und Gebirge mit einbezieht [43]. Diese Verteilung wird sich bis 2050 definitiv ändern. Prognosen zeigen, dass durch die anhaltende Desertifikation zur Mitte des Jahrhunderts bereits 4,74 Mrd. ha Unland bestehen werden [71]. Zudem wird sich laut FAO die bewirtschaftete Landfläche durch die Zunahme der Weltbevölkerung weiter intensivieren und ausdehnen [43]. Allein in Deutschland betrug die tägliche Flächenneuinanspruchnahme im Jahr 2017 58 ha, die zu Erholungs-, Verkehrs-, Gebäude- und Freiflächen umfunktioniert werden [72].

Die Nutzungsaufteilung der Flächen innerhalb einer urbanen Struktur lässt sich, wie Abbildung 12 zeigt, nur unzureichend pauschalisieren. Abgebildet ist die Verteilung unterschiedlicher Flächennutzungsarten in den vier deutschen Millionenstädten und zwei sehr dicht besiedelten europäischen Metropolen im Vergleich. Auffällig ist, dass die sehr dicht besiedelten Städte Paris und Barcelona auch den höchsten prozentualen Anteil für Bebauung aufweisen (ca. 60 %). Darüber hinaus sind jedoch keine direkten Übereinstimmungen zu erkennen [73].

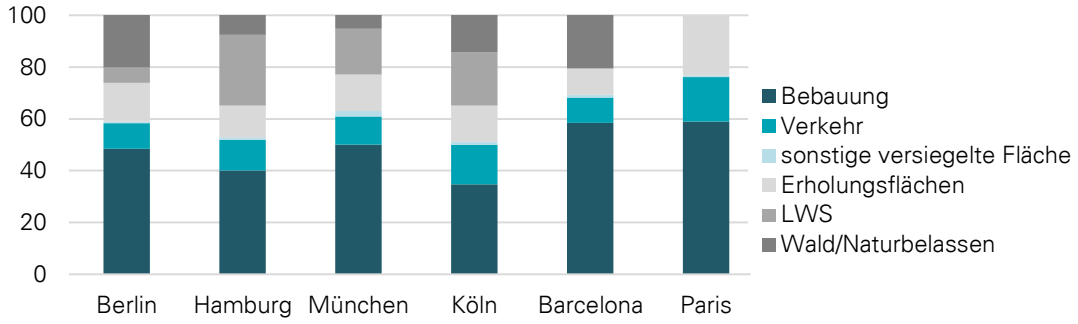


Abbildung 12: Flächennutzung von ausgewählten Städten, erstellt nach [73]

Emissionen

Emissionen im Sinne des Bundesimmissionsschutzgesetzes sind emittierte Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnliche Erscheinungen [74]. Für die Umwelt eine besondere Belastung wegen des Potentials zur globalen Erwärmung sind die sog. Treibhausgasemissionen, die als gasförmiger Abfall in die Atmosphäre gelangen und den natürlichen Treibhauseffekt verschärfen. Im Jahr 2010 hatte mit 76 % und damit über 37 Gt (Gigatonnen) den größten Anteil das farb- und geruchlose Gas CO_2 [75]. Die Berücksichtigung bzw. Reduzierung von Emissionen und deren Auswirkungen auf Mensch und natürliche Umwelt stellt ein wesentliches Kriterium für sozial und ökologisch zukunftsfähige urbane Strukturen dar.

Im Jahr 2010 stammten 18,4 % aller Treibhausgasemissionen von Gebäuden und deren Versorgung mit Heizung und Elektrizität [75]. In Deutschland konnte bei Haushalten ein Rückgang der durch Verbrennung fossiler Stoffe entstehenden CO_2-Emissionen von 129 Mio. t in 1995 auf 90 Mio. t 2016 verzeichnet werden [76]. Dieser Trend ist bei allen nationalen Hauptemittenten wahrnehmbar [77]. Da die klimarelevanten Emissionen von Gebäuden während der Nutzung, aber auch während des Baus von Gebäuden entstehen, ist eine Berücksichtigung dieser Faktoren für eine nachhaltig gebaute Umwelt unabdingbar.

Weitere Luftschadstoffe wie z.B. Feinstaub, Schwefeldioxid oder Ozon stellen eine Belastung der Außenluft dar, die sich auch auf die Gesundheit der Bewohner auswirken sowie zu Schäden an Tieren und Pflanzen führen kann. Gesundheitliche Beeinträchtigungen betreffen vor allem die Atemwege, aber auch auf die Blutgefäße [78]. Die Ursachen für das Auftreten von Luftschadstoffen liegen u.a. bei Verkehr, Kraft- und Fernheizwerken und bei privaten bzw. gewerblichen Heizungsanlagen [78].

Mit zunehmendem Verkehrsaufkommen steigt nicht nur der Schadstoffgehalt in der Luft, sondern auch die Lärmbelastung für die Bewohner. Seit 2002 gibt es daher die "Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und die Bekämpfung von Umgebungslärm" [79]. Laut der Europäischen Kommission sind innerhalb der 28 EU-Mitgliedsstaaten rund 100 Mio. Personen einer Lärmentwicklung von über 55 dB, verursacht durch Straßenverkehr, ausgesetzt. Die gesundheitlichen Auswirkungen dieser Exposition reichen von Schlafstörungen bis hin zum vorzeitigen Tod [80]. Mit Lärmaufkommen einher gehen oft auch Erschütterungen durch mechanische Schwingungen, die von Schienenfahrzeugen oder Lastkraftwagen erzeugt werden und je nach Frequenz, Stärke und Häufigkeit das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bewohner beeinflussen können [81].

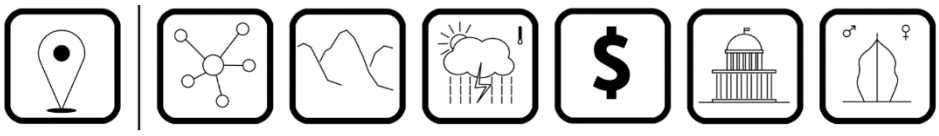
Stadtklima

Durch bauliche Eingriffe in die vormals natürliche Umgebung und anthropogene Emissionen entsteht in urbanen Strukturen gegenüber dem Umland ein Mesoklima [82]. Die klimatischen Rahmenbedingungen werden im Wesentlichen von den klimatischen Gegebenheiten des jeweiligen Standorts bestimmt (siehe Kapitel 2.1.4), jedoch erzeugen bauliche Maßnahmen klimatische Verhältnisse, die sich stark vom natürlichen Klima unterscheiden können. Dabei führen ein erhöhter Bodenversiegelungsgrad, fehlende Vegetation sowie Menge und Eigenschaften verbauter Materialien zu geringeren Windgeschwindigkeiten, höheren Schadstoffkonzentrationen und höheren Lufttemperaturen [82]. Dies kann große Auswirkungen auf das menschliche Wohlbefinden und die Ausführung von Gebäuden und damit auf die Nachhaltigkeit von urbanen Räumen haben [36]. Innerhalb der urbanen Bebauung führen die unterschiedlichen Strukturen und Materialien zu Mikroklimata, die punktuell Klimaänderungen generieren.

Ein eingeschränkter Luftaustausch, verbunden mit dem Wärmeinseleffekt durch die wärmespeichernde und -abstrahlende Funktion der Gebäudebaustoffe und damit einer eingeschränkten Nachtauskühlung, führen dazu, dass im Sommer vor allem bei Windstille und hoher Sonneneinstrahlung bis zu 10 °C Temperaturunterschied zwischen Stadt und Land herrschen können [83]. Das Fehlen ausreichender Vegetation und Versickerungsflächen schwächt zudem die Verdunstungskälte durch Niederschlagswasser [83].

Die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen innerhalb des urbanen Kontexts stellen ihrerseits Anforderungen an die Gebäude und an den Außenraum. Diese Anforderungen reichen von bauphysikalischen oder gebäudetechnischen Aspekten wie z.B. Dämmung, Entfeuchtung, Heizung, Lüftung, Kühlung bis hin zu Material- oder Bauteileigenschaften wie das Rückstrahlvermögen der Oberflächen oder die Wärmespeichereigenschaften der Materialien.

2.1.4 Standort



Die Zukunftsfähigkeit von urbanen Strukturen ist je nach Standort unterschiedlich zu bewerten. Geografische, demografische und klimatische Unterschiede geben jedem Standort einen individuellen Charakter und stellen verschiedene Anforderungen an die Nachhaltigkeitsaspekte.

Die Unterteilung des Überbegriffs Standort erfolgt anhand folgender Kriterien:

- Sie liefern Hintergrundinformationen zum übergeordneten Standort.
- Sie haben Auswirkungen auf die soziale, ökonomische oder ökologische Nachhaltigkeit der urbanen Struktur.
- Sie liefern relevante Informationen, die nicht ausreichend aus anderen Teilbereichen verfügbar sind.

Die für den Einflussfaktor *Standort* erarbeiteten Unterbegriffe zweiter Hierarchie lauten *Anbindung, Geologie, Klima, Ökonomie, politische Einflüsse* und *soziale Struktur.* Diese Unterbegriffe beschreiben den Kontext der urbanen Strukturen und sollten in jeder Nachhaltigkeitsbetrachtung berücksichtigt werden. Im Folgenden werden diese Unterbegriffe eingeführt und eine Auswahl an relevanten Unterthemen vorgestellt. Dieser Auszug an möglichen Einzelaspekten dient zur Veranschaulichung der Parameter und ihrer Relevanz im Hinblick auf nachhaltige urbane Strukturen.

Anbindung

Unter dem Begriff Anbindung ist in diesem Kontext nicht nur die Anbindung an das Straßen- und Verkehrsnetz, sondern auch an sämtliche Versorgungsleitungen für Elektrizität, Wärme, (Ab-)Wasser und Internet zu verstehen. Je besser die Anbindung und damit auch die Versorgung eines Zentrums, desto wertvoller und zukunftsfähiger ist ein Standort. Je enger die Vernetzung untereinander, desto mehr können einzelne Zentren voneinander profitieren. Dies

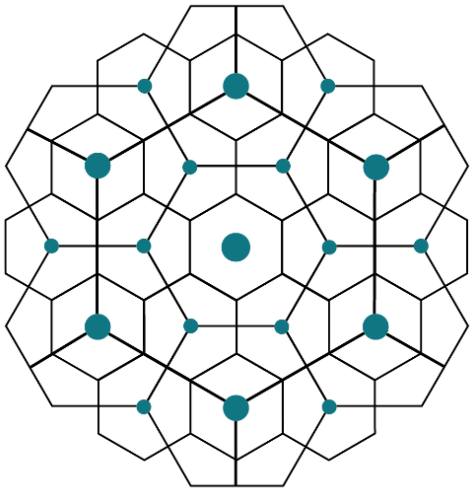


Abbildung 13: Anbindung gemäß Zentrale-Orte-Konzept nach Christaller, erstellt nach [57]

spiegelt auch das Zentrale-Orte-Konzept von Walter Christaller [57] (vgl. *Urbane Dichte*) wider. Abbildung 13 zeigt das dort beschriebene Anbindungskonzept. Dabei spielt Bevölkerungsdichte und -größe eine essentielle Rolle, denn ein ländliches Umfeld mit geringer Bebauungsdichte und größerer Entfernung zu Verteilerstandorten kann nur schwerlich und ausschließlich unter ökonomischen Mehraufwand, die gleiche Anbindungsqualität bieten wie innerstädtische Quartiere in Ballungsräumen.

Eine gute Anbindung an das ÖPNV- bzw. Bahnnetz ist eine wichtige Voraussetzung für eine ökologisch nachhaltige urbane Struktur. Dies gilt sowohl für innerstädtische als auch für regionale oder nationale Verbindungen. So lässt sich je nach Nutzerfrequenz der Individualverkehr stark reduzieren, wodurch Emissionen und Ressourcen eingespart werden können.

Geografie

Geografie beschreibt im vorliegenden Zusammenhang zunächst die Verortung des urbanen Standorts auf der global zur Verfügung stehenden Landmasse und die Beschaffenheit von dortigem Boden und Gelände. Geografische Besonderheiten, die sich z.B. durch die Lage in Erdbebengebieten oder nahe Vulkanen ergeben, schaffen örtliche Gegebenheiten und Klimabedingungen, die je nach Eigenschaften, die Nachhaltigkeit von urbanen Strukturen prägen. Die Bodenbeschaffenheit eines Standorts kann beispielsweise die Größe und Ausführung von Gebäudefundamenten beeinflussen oder spezielle Geländeformationen können die Durchlüftbarkeit einer Stadt fördern bzw. mindern. Welche Auswirkungen die Bodenbeschaffenheit auf den Ressourcenverbrauch haben kann, zeigt sich in [84]. Hier schneidet ein Hochhaus bzgl. des Grauen Energieverbrauchs bei einer ungünstigen Bodenbeschaffenheit besser ab als ein vergleichbarer Riegelbau. Bei veränderter Bodenbeschaffenheit fällt der Vergleich jedoch invers aus.

Ein weiterer Aspekt des Parameters Geografie ist das jeweilige lokale Vorkommen von Rohstoffen in Form von Ressourcen oder Reserven, die beispielsweise aus der Erdkruste gewonnen werden können. Als Reserven werden jene Rohstofflager bezeichnet, die mit aktueller Technik und unter ökologisch und ökonomisch vertretbaren Umständen abgebaut werden können [66]. Ressourcen hingegen bezeichnen im geologischen Sinn meist eine deutlich größere Menge an Rohstoffen, denn sie stellen die theoretisch zur Verfügung stehenden Rohstoffmengen dar – sowohl die bereits nachgewiesenen als auch die erwarteten Mengen [66]. Die Verteilung der Rohstoffe ist global sehr unterschiedlich. Staaten wie beispielsweise Deutschland, bei denen ein Großteil der Rohstoffe importiert wird, sind dadurch stark von den Lieferanten abhängig. Insgesamt stammten 2011 mehr als zwei Drittel der konsumierten Rohstoffe aus anderen Ländern, vor allem aus Asien bzw. China [37]. Im Einzelnen beliefen sich die Anteile der aus dem Ausland bezogenen Rohstoffe auf 70 % der Biomasse, 70 % der fossilen Energieträger, 67 % der Mineralien und 99,7 % der Metallerze [37]. Deshalb sollte auch der Aspekt der Rohstoffverfügbarkeit und -reichweite bei der Planung von zukunftsfähigen, urbanen Strukturen berücksichtigt und die Rohstoffverfügbarkeit entsprechend in die Planung integriert werden.

Klima

Im Gegensatz zum Parameter Stadtklima, welcher ein Meso- bzw. Mikroklima beschreibt, bezieht sich dieser Parameter auf die vorherrschenden klimatischen Rahmenbedingungen des jeweiligen Standorts. Je nach Klimazonenzugehörigkeit herrschen unterschiedliche Konditionen, die für eine zukunftsfähige urbane Struktur berücksichtigt werden müssen. So besitzen

tropische, subtropische, gemäßigte, subpolare und polare Zonen unterschiedliche Gegebenheiten an Maximal- und Durchschnittstemperaturen, Niederschlagsmengen, Windstärken und Sonnenstunden, die z.B. verstärkt Sonnenschutzmaßnahmen, Wärmedämmung oder Klimaanlagenausstattung notwendig machen. Dadurch erhöhen sich die Anforderungen an die gebaute Umwelt. Dies führt dazu, dass sämtliche baulichen Maßnahmen auf ihre Eignung in der jeweiligen Klimazone getestet werden müssen. Für den Städtebau im Allgemeinen sind vor allem die Variablen der Luftbewegungen (z.B. Hauptwindrichtung), die Maximaltemperaturen oder die Sonnenscheindauer und -intensität von Bedeutung [21].

Veränderungen des Klimas, wie etwa durch den Klimawandel, können zum einen durch Begleitfolgen, wie Erosionen oder Überschwemmungen, große Auswirkungen auf die gebaute Umwelt haben und die Grenzen der Resilienz von Gebäuden und urbanen Strukturen aufzeigen. Zum anderen können dadurch langfristig Stoffströme und Energieverbräuche beeinflusst werden, was sich u.a. anhand des prognostizierten Anstiegs der globalen Heiz- und Kühlenergie von Wohneinheiten um 179 % bis 2050, ausgehend von 2010, zeigt [85].

Ökonomie

Die ökonomischen Rahmenbedingungen prägen nicht nur die bauliche Infrastruktur, da sie deren Investitionssummen bestimmen, sondern auch die Art und Quantität der verfügbaren Ressourcen eines Standorts.

Eine messbare Konstante für die wirtschaftliche Stärke eines Landes oder einer Region stellt das BIP dar. Während Industrienationen mit einer stabilen Wirtschaft nur noch ein geringes jährliches Wachstum des BIP aufweisen, ist in den weniger entwickelten Ländern, wie z.B. Indien, bis zum Jahr 2050 ein Anstieg um das Vierfache im Vergleich zu 2015 zu erwarten [86]. Global entwickelt sich das BIP gemäß Prognosen der OECD im gleichen Zeitraum von 86 Billionen auf 218 Billionen US Dollar [86] und erfährt weiterhin einen starken Anstieg.

Von der wirtschaftlichen Situation der Bewohner und des Standorts können Parameter wie Wohn- und Verbraucherverhalten oder natürliche Ressourcen stark abhängig sein, wodurch auch die Nachhaltigkeit der gesamten urbanen Struktur durch den Faktor Ökonomie beeinflusst werden kann. Dies wird u.a. in *Wohnverhalten* durch den Zusammenhang zwischen Wohnfläche und BIP pro Person verdeutlicht (Abbildung 7). Eine Untersuchung aus dem Jahr 2010 stellt weitere Abhängigkeiten dar. Für 155 weltweit verteilte Städte wird darin eine Korrelation zwischen BIP und unterschiedlichen Vergleichsgrößen wie z.B. DMC oder dem Verbrauch von Wasser oder Baumineralien gebildet. So liegt stets ein hoher Verbrauch vor, wenn das BIP pro Person über 24.960 US-Dollar (Dollarwert aus dem Jahr 2000) bzw. im Falle des Wasserverbrauchs über 33.350 US-Dollar liegt [87]. Für darunter liegende BIP Werte reduziert sich auch der Verbrauch. Abbildung 14 stellt auf Grundlage der Auswertung der 155 Städte die Abhängigkeit zwischen dem urbanen Materialverbrauch pro Person (DMC/cap) und dem urbanen BIP pro Person dar [68]. Hier ist eine klar steigende Tendenz des Materialverbrauchs bei steigendem BIP zu erkennen.

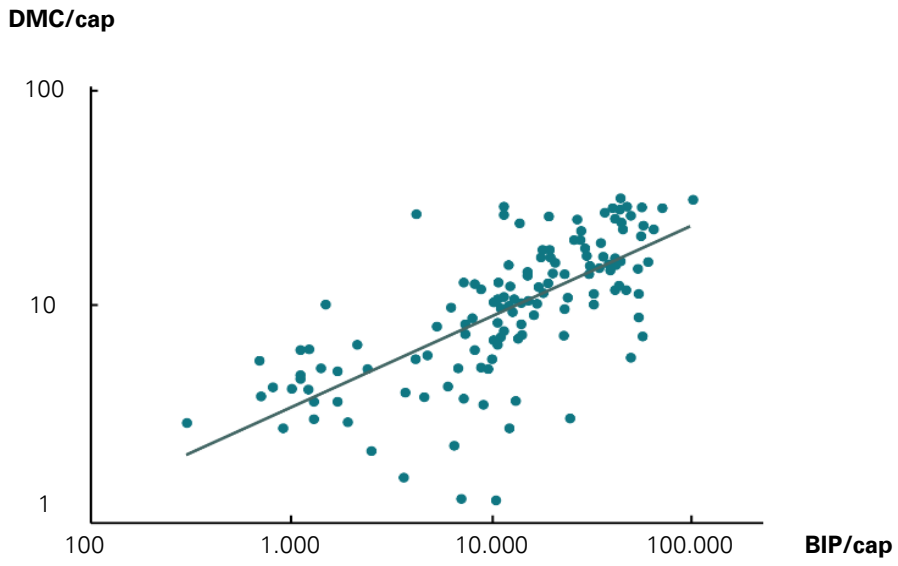


Abbildung 14: Korrelation urbanes DMC und BIP pro Person, erstellt nach [68]

Politische Einflüsse

Unter diesem Parameter werden politische Reichweiten jeglicher Ebenen (kommunal, national, international) einbezogen. Die Einflüsse der Politik und politischen Entscheidungen auf die Nachhaltigkeit von urbanen Räumen können sich auf unterschiedlichste Weise äußern und Aspekte der sozialen, ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit betreffen.

Wie unter *Geografie* bereits erwähnt, stellt die ungleichmäßige globale Verteilung der natürlichen Ressourcen eine große Diskrepanz dar, die zu internationalen Abhängigkeiten führen kann. Mit zunehmender Konkurrenz um die knapper werdenden Ressourcen steigt auch das Konfliktpotential [88]. Somit kann die gesamtpolitische Lage eines Standorts wesentlich die Import- und Exportströme beeinflussen. Dadurch kann es geschehen, dass durch politische Spannungen temporär oder längerfristig Rohstoffe nicht länger exportiert werden oder sich Liefer- bzw. Finanzierungsengpässe ergeben. Politischer Konsens und die dadurch erreichte langfristige Verlässlichkeit bilden die Grundlage für importabhängige Länder wie Deutschland. Politische Einflüsse ermöglichen jedoch auch die Schaffung von Anreizen und die Entwicklung von Strategien für einen schonenden Umgang mit den natürlichen Ressourcen [88]. Umweltpolitik vereint dadurch Themen der Politik, Wirtschaft und Gesellschaft.

Politische Strategien zur Nachhaltigkeit finden auf unterschiedlichen Ebenen statt. So existieren Konzepte auf internationaler Ebene, wie sie z.B. bei UN-Konferenzen erarbeitet werden, auf europäischer Ebene, wie z.B. *Europa 2020,* oder auf nationaler Ebene durch Programme wie z.B. *ProgRess* [88].

Soziale Struktur

Jeder Standort verfügt über eine soziale Struktur, die ebenfalls Auswirkungen auf den Nachhaltigkeitszustand des urbanen Umfelds, in der die soziale Struktur besteht, haben kann. Der Parameter *Soziale Struktur* bezieht in diesem Kontext sowohl demographische als auch Bildungs- und sozialgerechte Aspekte mit ein wie Bevölkerungsentwicklung, Migration, Alters-

schnitt, Geschlechterstrukturen und Fertilitätsrate. Die Fertilitätsrate ist ein wesentlicher Indikator für ein Bevölkerungswachstum oder einen Bevölkerungsrückgang. Fällt sie in Ländern mit niedriger Sterberate unter 2,1 Kinder pro Frau, ist diese Region mit Bevölkerungsrückgang und einer alternden Gesellschaft konfrontiert [89]. Migration kann dieses Verhältnis durch Zuzug relativieren oder durch Emigration verschärfen. Eine niedrigere Fertilitätsrate ist jedoch ausschlaggebend dafür, einen nachhaltigeren Umgang mit Ressourcen, Umweltbewusstsein und Wohlstand zu fördern [19]. Dies geht einher mit einer gesunden Bevölkerungsstruktur, geprägt durch symmetrische Geschlechterverteilung, eine erhaltende Fertilitätsrate und eine hohe Lebenserwartung, bedingt durch gute medizinische Versorgung.

Ein Bericht der UN aus dem Jahr 2007 beschreibt das Bildungsniveau der Bevölkerung als relevant für eine nachhaltige Entwicklung [19]. Hier stellt sowohl der Bildungsgrad als auch der Analphabetismus von Erwachsenen ein Kriterium dar. Laut dieses Berichts gilt der Bildungsstand als Humankapital und hat einen wesentlichen Einfluss auf das ökonomische Wachstum einer Region und das Konsumverhalten hinsichtlich des Energie- und Ressourcenverbrauchs [19].

Die soziale Struktur eines Standorts ist ausschlaggebend dafür, in welchem Umfang die Bevölkerung Zugang zu Ressourcen erhält und Umweltbelastungen ausgesetzt wird. Dies wird zusammenfassend als Umweltgerechtigkeit (engl. Environmental Justice) bezeichnet. Das Umweltbundesamt beschreibt in einem seiner Berichte Umweltgerechtigkeit als gleichmäßige sozialräumliche Verteilung gesundheitsrelevanter Umweltbelastungen und gerecht verteiltem Zugang zu Umweltressourcen, um bestmögliche umweltbezogene Gesundheitschancen zu gewährleisten [90]. Der Fokus liegt dabei vor allem auf der physischen Umwelt im städtischen Raum, kann sich allerdings auch auf die soziale Umwelt erstrecken. Es wird zwischen Verteilungs-, Zugangs- und Verfahrensgerechtigkeit unterschieden. Ziel ist es, sämtliche negativen Auswirkungen wie Umweltbelastungen, aber auch die Erreichbarkeit und Zugänglichkeit von Ressourcen auf alle Bevölkerungsgruppen gleich zu verteilen sowie jedem ein Recht auf die Beteiligung an Verfahren im Schadensfall zu verschaffen [90]. Grundlage ist die festgestellte Korrelation zwischen sozialer Lage und der Verfügbarkeit und Verteilung von Ressourcen bzw. sozialer Lage und Gesundheit. Soziale Lage bezeichnet hierbei Bildungs- und Einkommensstand sowie Geschlecht und Migrationshintergrund [90]. Für eine langfristig nachhaltige urbane Struktur auf sozialer Ebene ist der Faktor der Umweltgerechtigkeit dementsprechend sehr hoch anzusehen.

2.2 Parameterabhängigkeiten

Aus den Ausführungen in Kapitel 2.1 wird deutlich, dass die einzelnen, in Bezug auf nachhaltige urbane Strukturen relevanten Parameter, eng miteinander verwoben und, individuell betrachtet, nur begrenzt aussagekräftig sind. Die gegenseitigen Abhängigkeiten, abgeleitet aus den vorangegangenen Ausführungen, werden aus Tabelle 1 deutlich. Hier wird zusätzlich durch die Ziffern 1 und 0 eine Gewichtung des jeweiligen Einflusses vorgenommen. Die Tabelle ist zeilenbezogen zu lesen: eine 1 bescheinigt einen konkreten und starken Einfluss des Spaltenparameters auf die entsprechende Zeile, die 0 einen zweitrangigen, schwächeren Einfluss.

Ein Beispiel: Das Mobilitätsverhalten der Bewohner steht in direktem Zusammenhang mit der Anbindung des Standorts. Je größer die Distanzen oder je schlechter die Anbindung, desto höher das Mobilitätsaufkommen in Personenkilometern und aufgewendeten Stunden pro Person.

Die Übersicht in Tabelle 1 dient der Zusammenfassung und der Darstellung der komplexen Verflechtung der einzelnen Parameter untereinander. So können für die Planung von nachhaltigen urbanen Strukturen Abhängigkeiten und Einflüsse auf einen Blick erkannt und berücksichtigt werden. Klar zu erkennen ist die unterschiedliche Verteilung von gegenseitigen Einflüssen. Die Standort-Parameter beeinflussen beispielsweise viele der anderen Parameter, indem klimatische oder ökonomische Bedingungen Auswirkungen auf die unterschiedlichsten Bereiche haben. Umgekehrt hingegen lassen sich diese Parameter nur schwerlich durch externe Eingriffe beeinflussen, mit Ausnahme von *Anbindung*.

Tabelle 1: Parameterabhängigkeiten, 1= direkter Einfluss der Spalte auf die Zeile, 0= sekundärer, indirekter Einfluss

Parameter		Bewohner				Städtebau			Ökologie			Standort					
		Mobilitätsverhalten	Wohnverhalten	Ansprüche	Verbraucherverhalten	Stadt- und Regionalentw.	Urbane Dichte	Urbanes Umfeld	Umgang mit nat. Ress.	Emissionen	Stadtklima	Anbindung	Geografie	Klima	Ökonomie	Politische Einflüsse	Soziale Struktur
Bewohner	Mobilitätsverhalten	-	1	0	0	1		1				1	0	0	1	0	
	Wohnverhalten		-	1		1		0	0		0	0			1		0
	Ansprüche			-		0		1			0				1		1
	Verbraucherverhalten	1	1	1	-				0	0		0		1	1	0	0
Städtebau	Stadt- und Regionalentw.	1	1	1	0	-	1				0	1	1	1	0	1	1
	Urbane Dichte		1			1	-	1				0					
	Urbanes Umfeld	1	1	1	0	1	0	-			0	1	0	0	1	0	1
Ökologie	Umgang mit nat. Ress.	1	1	1	1	1	0	1	-			0	0	0	1	1	0
	Emissionen	1	1	1	1	0		1	1	-		1			0	0	
	Stadtklima	1	0		0	1	1	1	0	1	-	0		1		0	
Standort	Anbindung	0	0	0	0	1	1	0	0			-			1	0	
	Geografie												-				
	Klima												1	-			
	Ökonomie			0	1				0						-	0	0
	Politische Einflüsse			0					0	0					0	-	0
	Soziale Struktur					0									0	0	-

2.3 Parameterevaluierung

Die systematische, theoretische Auseinandersetzung mit der Thematik nachhaltiger urbaner Strukturen bildet die Grundlage zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage aus Kapitel 1:

Welche Parameter sind für eine ressourcenspezifische Betrachtung urbaner Strukturen relevant?

Zur Identifizierung und weiteren Untersuchung dieser Parameter liefert Tabelle 1 bereits einige Anhaltspunkte, die aus der Zeile *Umgang mit natürlichen Ressourcen* ausgelesen werden können. Die vier Überbegriffe erster Hierarchie (Bewohner, Städtebau, Ökologie und Standort) zusammen mit den insgesamt 16 Begriffen zweiter Hierarchie lassen sich wiederum in zahlreiche Einzelparameter dritter Hierarchie aufgliedern. Diese wurden vereinzelt bereits bei der inhaltsbezogenen Erläuterung der Parameter in Kapitel 2.1 aufgeführt.

Durch die Vielzahl an zu berücksichtigenden Einzelparametern, die immer noch weiter präzisiert werden können, lassen sich weitere potentielle Forschungsansätze ableiten. Korrelationen zwischen Einzelparametern wie z.B. dem Urbanisierungsgrad eines Standorts und der stadtklimatischen Situation oder dem Mobilitätsverhalten der Bewohner und dem Ressourcenverbrauch der Verkehrsanlagen bieten interessante Betrachtungszusammenhänge.

Es handelt sich bei vorliegender Fragestellung um ein Multiparameterproblem, welches aufgrund von Korrelationen und gegenseitigen Abhängigkeiten in seiner allumfassenden Komplexität nicht in einer Arbeit behandelt werden kann. Tabelle 2 führt daher für jeden der 16 Parameter zweiter Hierarchie eine Auswahl von vier weiterführenden Unterbegriffen auf. Diese 64 Unterbegriffe werden darin auf ihre Relevanz für ein ressourcenschonendes Bauen für möglichst viele Menschen geprüft. Die Auswahl hierfür erfolgte deduktiv. Diese Einzelparameter sind teilweise konkret bezifferbar und können mit Maßeinheiten versehen werden, wie z.B.

*Städtebau -> urbane Dichte -> Einwohnerdichte -> **[Capita/Referenzfläche]***

Andere Parameter hingegen entsprechen sog. weichen Parametern und sind nur verbal beschreibbar. Ein Beispiel hierfür lautet:

Städtebau -> Stadt- und Regionalentwicklung -> Planungsprozesse

Dieser Begriff lässt sich nur durch Adjektive wie *gut*, *schlecht*, *interdisziplinär* oder Ähnliches definieren oder müsste noch detaillierter untergliedert werden, bis eine bezifferbare Quantifizierung möglich wird.

Soweit möglich, werden in Tabelle 2 den Einzelparametern Maßeinheiten zugeordnet, mit denen sie bestimmt werden können. In einer weiteren Spalte wird zudem die Relevanz in Bezug auf den Ressourcenverbrauch in urbanen Strukturen abgefragt und bei einer festgestellten Bedeutsamkeit entsprechend markiert. Daraus ergibt sich die Beantwortung der ersten Forschungsfrage. Es wird deutlich, dass fast jeder Parameter direkte oder indirekte Auswirkungen auf den Verbrauch von natürlichen Ressourcen innerhalb urbaner Strukturen hat. Einzig für Emissionen und das Stadtklima kann keine entsprechende Korrelation identifiziert werden. Emissionen stellen vielmehr eine Folge von Ressourcenverbrauch dar, ohne dass sie selbst den Ressourcenverbrauch beeinflussen könnten. Ebenso wie das Stadtklima, welches zwar durch den Verbrauch von natürlichen Ressourcen beeinflusst werden kann, umgekehrt jedoch keinen direkten Einfluss auf den Ressourcenverbrauch hat.

Hervorzuheben ist an dieser Stelle noch einmal der wesentliche Aspekt der Betrachtungen: natürliche Ressourcen. So werden alle weiteren Aspekte, die zweifellos Teil einer nachhaltigen urbanen Struktur sind, nicht betrachtet. Ausgeschlossen werden somit u.a. CO_2- bzw.

Emissionsbilanzen, Betrachtungen zum grauen und operativen Energieverbrauch oder ökonomische Aspekte, wie etwa wirtschaftliche Bauweisen oder günstiger Wohnraum.

Tabelle 2: Parameteruntersuchung mit Zuordnung von Maßeinheiten; R = direkte oder indirekte Auswirkung auf den Verbrauch von natürlichen Ressourcen innerhalb urbaner Strukturen

Überbegriff	Parameter	Maßeinheit	R
Bewohner	**Mobilitätsverhalten**		
	Verkehrsvolumen	Pkm	x
	Private Fahrzeugbesitzer	Fahrzeuge/EW	x
	Nutzung Verkehrsmittel pro Jahr	h/a bzw. Pkm/a	x
	Emissionen	g/km	
	Wohnverhalten		
	Wohnfläche	m²/cap	x
	Haushaltsgröße	cap/WE	
	Wohnlage		
	Energiebedarf	kWh/m²	x
	Ansprüche		
	Qualität Verkehrsinfrastruktur		x
	Freiräume, Anteil	m²/cap	
	Wohnraum	m²/cap	x
	thermischer Komfort		
	Verbraucherverhalten		
	Nachhaltigkeit als Lifestyle		
	Konsumverhalten	% bezogen auf alle Konsumgüter	x
	DMC/cap	t/cap	x
	Private Konsumausgaben	€/cap	
Städtebau	**Stadt-und Regionalentwicklung**		
	Soziale und funktionale Mischung	Prozent bezogen auf den Mischgrad	
	Bebauungsstruktur		**x**
	Planungsprozesse		**x**
	GRZ, GFZ		x
	Urbane Dichte		
	Einwohnerdichte	cap/Referenzfläche	
	Wohnungsdichte	WE/Referenzfläche	
	Anteil versiegelter Fläche	% bezogen auf Referenzfläche	**x**
	Bauliche Dichte	umbautes Volumen/ Fläche, m³/m²	**x**
	Urbanes Umfeld		
	Ressourcenverbrauch Verkehrsanlagen	t/m²	**x**
	Bebaute Fläche	km²	**x**
	Ressourcenverbrauch Gebäude	t/m²	**x**
	Gebäudetypologie		**x**
Ökologie	**Umgang mit natürlichen Ressourcen**		
	Biodiversität	Anzahl Arten	
	Flächenneuinanspruchnahme	km² pro Zeitspanne	**x**
	Wasserverbrauch	l pro Zeitspanne	x
	Inländischer Materialverbrauch (DMC)	t/a	x
	Emissionen		
	Luftschadstoffe	t	
	Treibhausgase	t	
	Lärm	db	
	Licht	lux	
	Stadtklima		
	Reflexionsgrad	ρ	
	Windgeschwindigkeit	m/s	
	Oberflächentemperatur	°C	
	Luftqualität	Indexziffer	

Standort	**Anbindung**		
	Verkehrsnetz		x
	Entfernung zu Verteilerstandorten	km	x
	Entfernung zu Ober-/Mittelzentren	km	x
	Anteil der versorgten WE	% bezogen auf Gesamtanzahl der WE	
	Geografie		
	Topografie		
	Bodenbeschaffenheit		x
	Rohstoffvorkommen	Gt	x
	Rohstoffverfügbarkeit	Gt	x
	Klima		
	Klimazone		x
	Temperatur	°C	x
	Niederschlag	l/m²	
	Globalstrahlung	kWh/m²a	
	Ökonomie		
	BIP	€	x
	Zuwachsrate BIP	% bezogen auf Zeitspanne	x
	BIP pro Kopf	€/cap	x
	Importquote	Prozent bezogen auf BIP	
	Politische Einflüsse		
	Politische Regierungssystem		
	Gesetze zum Umgang mit nat. Ressourcen		x
	Politische Strategien zur Nachhaltigkeit		x
	Restriktionen/Strafzölle/Anreize		x
	Soziale Struktur		
	Urbanisierungsgrad	% bezogen auf Gesamtbevölkerung	x
	Bevölkerungswachstum	% bezogen auf Zeitspanne	x
	Gesamtbevölkerung	Mio. Personen	x
	Umweltgerechtigkeit		

Wie in Tabelle 2 erkennbar, ergibt sich eine Vielzahl an Parametern, die in unterschiedlicher Intensität bei einer ressourcenbezogenen Betrachtung einer urbanen Struktur relevant sind. Zur Beantwortung der Forschungsfragen 2 und 3 müssen die ermittelten Parameter weiter eingegrenzt werden, um eine konkrete Aussage treffen zu können. Die in Kapitel 1 gestellten Forschungsfragen lauten:

- *Wie verändert sich in Abhängigkeit von der Bebauungsstruktur der Ressourcen- und Flächenverbrauch von Verkehrsanlagen und Gebäuden, bei einheitlicher baulicher Dichte?*
- *Wie verändern sich diese Ergebnisse bei veränderter baulicher Dichte?*

All jene Parameter, die nicht von Planern und Architekten direkt beeinflusst werden können, werden für die weiteren Betrachtungen ausgeschlossen, da in dieser Arbeit letztendlich Grundlagen für diese Bezugsgruppe ermittelt werden sollen. Die Parameter, die von dieser Gruppe beeinflussbar sind, sind in Tabelle 2 hervorgehoben. Demnach verbleiben folgende Einzelparameter: *Bebauungsstruktur*, *Planungsprozesse, Anteil versiegelter Fläche, Bauliche Dichte, Gebäudetypologie, Ressourcenverbrauch Verkehrsanlagen, Ressourcenverbrauch Gebäude, Bebaute Fläche* und *Flächenneuinanspruchnahme.*

In einer nächsten Iterationsschleife werden diese neun Einzelparameter weiter reduziert und zusammengefasst.

Der Einzelparameter *Planungsprozesse* beeinflusst den Verbrauch natürlicher Ressourcen beispielsweise nur indirekt. So sind nur die realisierten Umsetzungen von Planungsprozessen für den tatsächlichen Verbrauch von natürlichen Ressourcen verantwortlich. Zwar ist die Unter-

suchung von Planungsprozessen im urbanen Kontext sowie die Evaluierung der entsprechenden Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit bzw. Ressourcenverwendung in einem urbanen System von wesentlicher Bedeutung, jedoch ist sie nicht Gegenstand dieser Untersuchung und wird daher nicht weiter untersucht.

Die Einzelparameter *Anteil versiegelter Fläche, Bebaute Fläche* sowie *Flächenneuinanspruchnahme* haben direkten Einfluss auf den Ressourcenverbrauch. Sie beziehen sich allesamt auf die natürliche Ressource Boden. Daher werden sie unter dem Begriff Flächenverbrauch zusammengefasst und im Folgenden nicht weiter getrennt betrachtet.

Zur Beantwortung der beiden verbliebenen Forschungsfragen dienen demnach folgende sechs Parameter, die in Kapitel 4 quantifiziert und innerhalb eines Bezugsrahmens in Relation gesetzt werden:

- Ressourcenverbrauch Gebäude, Ressourcenverbrauch Verkehrsanlagen und Flächenverbrauch als zu ermittelnde Größen
- Bauliche Dichte, Gebäudetypologie und Bebauungsstruktur als vergleichende Faktoren

3 Parameterquantifizierung

Dieses Kapitel widmet sich der Quantifizierung der in Kapitel 2 definierten Parameter. Um die Werte vergleichbar zu machen, werden zunächst konkrete Eingrenzungen des Betrachtungsrahmens vorgenommen. Diese Eingrenzungen werden im Folgenden in Kapitel 3.1 beschrieben.

Die zu untersuchenden Parameter Ressourcenverbrauch Gebäude und Verkehrsanlagen, Flächenverbrauch, Bebaute Dichte, Gebäudetypologie und Bebauungsstruktur werden in den Kapiteln 3.2 bis 3.6 quantifiziert bzw. definiert. Dies bildet die Grundlage für einen Vergleich unterschiedlicher Szenarien zur Beantwortung der Forschungsfragen 2 und 3. Es werden verschiedene urbane Dichten als Ausgangslage der Untersuchung gewählt und die entsprechenden Gebäudetypologien festgelegt, mit denen die urbanen Dichten erreicht werden sollen.

3.1 Rahmenbedingungen für die Quantifizierung

Nachfolgende Rahmenbedingungen werden als Grundlage für die Datenerhebung der Parameterquantifizierung und letztendlich auch der Ergebnisinterpretation verwendet. Diese Einschränkung ist notwendig, um den Betrachtungsrahmen in einen realisierbaren Umfang zu fassen und eine zuverlässige Vergleichbarkeit der Parameter zu gewährleisten.

Bewohner

Die Bewohner des urbanen Betrachtungsfeldes sollen in ihrem Wohnverhalten dem europäischen Mittel von 2011 ähnlich sein. Pro Person wurden in diesem Jahr im Durchschnitt in den EU28 Ländern 42,6 m² an Wohnraum aufgewendet [91]. Zur einfacheren Auslegung und Anwendbarkeit wird dieser Wert für die weiteren Untersuchungen auf 40 m² pro Person abgerundet. Diese Größe wird für alle zu untersuchenden Bauformen und Siedlungsdichten angenommen, unabhängig davon, ob aufgrund Verfügbarkeit und wirtschaftlicher Erschwinglichkeit die Wohnfläche in ländlichen Gebieten oder in Einfamilienhäusern oft größer ausfällt als in einer Stadt oder in Wohneinheiten in Geschosswohnungsbauten. Als Haushaltsgröße wird der Durchschnitt der EU-Staaten von 2,2 Personen pro Haushalt angesetzt [92].

Da das Mobilitätsverhalten der Bewohner in vorliegender Dissertation kein Gegenstand der Untersuchungen ist, sind die Faktoren durchschnittliche Anzahl an PKW pro Person sowie die Wahl und Nutzungsfrequenz von bevorzugten Verkehrsmitteln für die weiteren Betrachtungen irrelevant, ebenso wie das Verbraucherverhalten und etwaige Ansprüche. Verkehrsströme zur

Müllentsorgung oder Paketzulieferung werden im Gegensatz zur *Residensity* Studie ebenfalls nicht betrachtet.

Städtebau

Das Betrachtungsfeld, anhand dessen phänomenologisch der Ressourcenverbrauch von unterschiedlichen urbanen Strukturen ermittelt wird, ist ein quadratisches, absolut ebenes Gebiet in einem virtuellen Raum mit einer Kantenlänge von 1.000 m.

Da die größte Herausforderung des Bauwesens darin bestehen wird, mit den nur begrenzt zur Verfügung stehenden Ressourcen für möglichst viele Menschen insbesondere Wohnraum zu schaffen, wird im vorliegenden Kontext der Fokus der Untersuchung auf reinen Wohngebieten liegen. Ein weiterer Grund ist die Tatsache, dass in Deutschland der Anteil der Wohngebäude mit 87 % am gesamten Gebäudebestand, Industriebauten ausgenommen, deutlich gewichtiger ist als der Anteil der Nichtwohngebäude [30].

Für das gesamte Betrachtungsgebiet wird eine Erschließung der Gebäude sichergestellt. Die Verteilung der Verkehrsfläche erfolgt stets nach festgelegten Entwurfsparametern, die unter Kapitel 4.1 Szenarienerstellung eingeführt werden.

Es sind keine städtebaulich limitierenden Faktoren wie z.B. Höhenbegrenzung, Mindestabstände oder Geschossflächenzahlen vorgesehen, um die Bebauungsstrukturen nicht einzuschränken und Szenarien zu erstellen, welche vorerst auf einer abstrakten, phänomenologischen Ebene Bestand haben.

Standort

Der zu betrachtende Quadratkilometer befindet sich in der gemäßigten Klimazone mit entsprechenden klimatischen Unterschieden zwischen Sommer- und Winterzeit. Diese Festlegung begründet sich vor allem darin, dass in dieser Klimazone global die meisten Menschen leben und dass die Berücksichtigung der wechselhaften Außenbedingungen hohe Ansprüche an Gebäude und Baustruktur mit sich bringt. Die Bodenbeschaffenheit des vorhandenen Grundes am Untersuchungsgebiet wird nicht in die Betrachtungen mit einbezogen, auch wenn sich hieraus durchaus Unterschiede im Ressourcenverbrauch ergeben können, wie John et al. beim Vergleich von Hochhaus und Riegelbau darlegen [84]. Fundamente werden in der vorliegenden Untersuchung daher ausschließlich standardisiert betrachtet.

In vorliegender Arbeit wird das Hauptaugenmerk auf Industrienationen und damit auf jene Länder gelegt, die einen hohen Entwicklungsstand aufweisen. Als Maßstab hierfür kann die Kategorisierung der OECD angewandt werden. Eine Liste der Länder, die zum Stand 2018 der OECD angehören, ist dem Anhang dieser Arbeit zu entnehmen. Demographische Eigenschaften und Wirtschaftskraft entsprechen damit in etwa dem Standard der OECD Länder. Hinsichtlich der Bauweisen und -standards ist das Betrachtungsfeld aus Gründen der besseren Datenverfügbarkeit im deutschen Raum einzuordnen.

Für die vorliegende Betrachtung ist es irrelevant, wie das Untersuchungsgebiet in Relation zum nächstgelegenen Zentrum verortet ist, da sich die Ressourcenberechnungen auf das Untersuchungsgebiet begrenzen und nicht darüber hinaus im Kontext betrachtet werden. Es wird weder der erhöhte Ressourcenaufwand durch infrastrukturelle Anbindung an das Zentrum, noch differenzierte Mobilitäts- und Wohnverhaltensweisen der Bewohner von zentrumsnahen oder -fernen Standorten berücksichtigt.

3.2 Urbane Dichte

Für die weiteren Betrachtungen lautet nun eine wesentliche Frage, welche urbanen Dichten untersucht werden sollen. Ein Ansatzpunkt ist die Darstellung von Minimal- und Maximaldichten sowie einer mittleren urbanen Dichte. Im Folgenden werden die Schritte zur Festlegung der drei unterschiedlichen urbanen Dichten detaillierter erläutert.

3.2.1 Urbane Dichte 400

Das zu betrachtende Spektrum des Ressourcenverbrauchs sollte breitgefächert ausfallen, damit die Erkenntnisse aus der Ressourcenanalyse auf möglichst viele Standorte angewandt werden können. Daher wird eine Dichte betrachtet, die für dünn besiedelte Gebiete zutrifft, die sich im Übergang zwischen ländlich und urban geprägten Standorten befinden. Laut der United Nations Statistics Division gibt es keine global gültigen Vorgaben an die Mindestdichte für ländliche oder urbane Gebiete. Die Festlegung der Kriterien bleibt jedem Land selbst überlassen [93]. In den USA gilt beispielsweise seit 1990 eine Bevölkerungsgröße von 2.500 bei einer Dichte von mindestens 1.000 EW/mi² bzw. umgerechneten ca. 400 EW/km² als urbanisiertes Gebiet [94]. Diese Grenze von 400 EW/km² ergibt die erste zu betrachtende Dichte, die repräsentativ für sehr dünn besiedelte urbane Strukturen gesehen werden kann.

3.2.2 Urbane Dichte 4.000

Wie aus Abbildung 8 zu entnehmen, werden neben Städten einer Größe bis 300.000 Einwohnern auch mittelgroße Millionenstädte mit bis zu 5 Mio. Einwohnern bis 2035 Zuwachs erfahren. Eine Untersuchung der vier deutschen Millionenstädte Köln, München, Hamburg und Berlin, die sich in diesem Spektrum befinden, ergab eine durchschnittliche Dichte von 3.508 EW/km². Die einzelnen Werte variieren jedoch stark um bis zu 2.000 EW/km². Auch im Vergleich zu ähnlich großen Millionenstädten innerhalb Europas ist für Städte dieser Größenordnung keine einheitliche Dichte festzustellen. Wien oder Madrid mit 4.502 bzw. 5.330 EW/km² liegen eher im Bereich von München. Prag oder Rom hingegen sind mit 2.538 bzw. 2.236 EW/km² ähnlich dicht besiedelt wie Hamburg oder Köln. Eine Übersicht der jeweiligen Dichten ist Tabelle 3 zu entnehmen. Es ist jedoch hervorzuheben, dass grundsätzlich bei allen Städten die jeweilige Bevölkerungsdichte nicht homogen über die gesamte Stadt verteilt ist, sondern stets einzelne Bezirke dichter oder weniger dicht bebaut sind. Als mittleres Maß und zur einfacheren Handhabbarkeit wird eine Dichte von 4.000 EW/km² als nächste Untersuchungsgröße gewählt.

Tabelle 3: Einwohnerdichten pro km² der vier deutschen und weiterer europäischer Millionenstädte

Stadt	Berlin **2017** [95]	Hamburg **2017** [96]	Köln **2015** [97]	München **2017** [98]	Wien **2017** [99]	Madrid **2017** [100]	Prag 2014 [101]	Rom 2016 [102]
EW/km²	4.055	2.424,3	2.640,7	4.911,5	4.501,6	5.330,1	2.537,8	2.236

3.2.3 Urbane Dichte 20.000

Als Gegenpol zu einem dünn besiedelten Gebiet soll auch eine sehr hohe urbane Dichte Untersuchungsgegenstand sein. Innerhalb der EU-28 nehmen vor allem die Städte Paris mit 20.934,4 EW/km² [103] und Barcelona mit 15.944,9 EW/km² [104] eine Spitzenstellung ein. Vereinzelt werden Siedlungsdichten von über 20.000 EW/km² auch in Stadtteilen von deutschen Städten, z.B. in Stuttgart Rosenberg oder Rotebühl [105] erreicht, jedoch meist auf einer kleineren Fläche von wenigen Hektar. Dass auch deutlich dichtere Strukturen möglich sind, beweist z.B. die philippinische Stadt Manila, die laut Kalkulationen des philippinischen Amts für Statistik eine Siedlungsdichte von über 70.000 EW/km² erreicht [106]. Da die vorliegende Untersuchung nicht auf solche Extremwerte abzielt, wird eine Dichte von 20.000 EW/km² als repräsentativ für sehr dichte urbane Strukturen gewählt.

3.3 Bebauungsstruktur und Gebäudetypologien

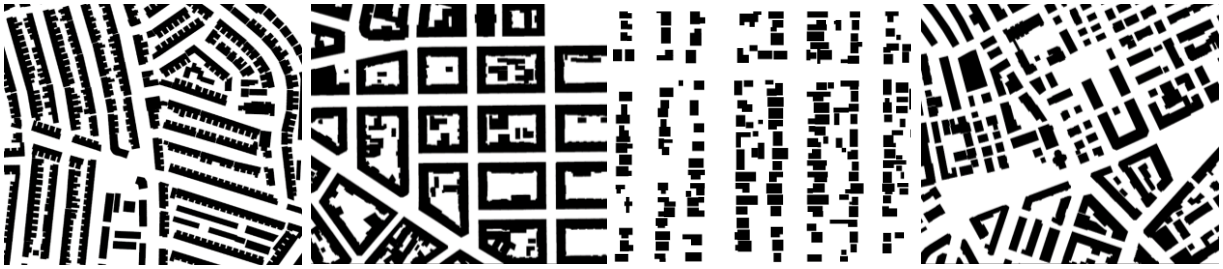


Abbildung 15: Unterschiedliche Bebauungsstrukturen; von links nach rechts: London, Prag, Los Angeles, Bern; Zeichnungen der Verfasserin, erstellt auf Grundlage von Google maps

Gebäudetypologien und deren Baukörper formen im Zusammenspiel durch Addition oder Kombination eine Bebauungsstruktur. Sie stellt letztendlich das optische Erscheinungsbild der urbanen Struktur dar. Die unterschiedlichen Bebauungsstrukturen in einem Quartier können entweder *sortenrein* vorkommen, also durch Addition eines Gebäudetypen oder aber durchmischt durch Kombination mehrerer verschiedener Bebauungstypen. Abbildung 15 zeigt unterschiedliche Strukturen an den Beispielen Los Angeles (Punktbebauung), London (Reihe) und Prag (Block) oder, wie rechts abgebildet, die Stadt Bern mit einer durchmischten Bebauung. Grundsätzlich kann im Schwarzplan anschaulich zwischen alleinstehenden Punkthäusern (Solitären), linear angeordneten Bebauungen (Reihen bzw. Zeilen) und Blockrandbebauungen unterschieden werden [107]. Höfe oder Cluster beschreiben weitere Bebauungsstrukturen [108]. Reihen, Zeilen, Baublöcke, Höfe oder Cluster können zusätzlich variieren und in unterschiedlicher Ausführung, wie z.B. offener oder geschlossener Bauweise, vorkommen.

Für die weiteren Betrachtungen werden, wie in Abbildung 16 abstrahiert dargestellt, aus der Anzahl der möglichen Bebauungsstrukturen Punktbauten, geschlossene Baublöcke und Zeilenformationen untersucht. Da die vorliegende Untersuchung einer phänomenologischen Betrachtung dient, werden stadtplanerische Aspekte, wie beispielsweise kritische Ecksituationen bei geschlossener Blockrandbebauung oder eine Wohnnutzung der Erdgeschossebene von Hochhäusern, nicht berücksichtigt.

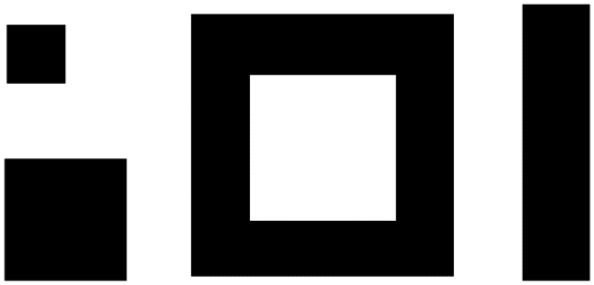


Abbildung 16: Bebauungsstrukturen: Punkt, Baublock, Zeile

Die potentiellen (Wohn-)Gebäudetypologien für die jeweiligen Bebauungsstrukturen werden von M. Korda in die Überkategorien Einfamilienhäuser (EFH), Mehrfamilienhäuser (MFH), Geschosswohnungsbauten und Sonderformen unterteilt [21]. Diese sind in Abbildung 17 zusammenfassend dargestellt. Ferner können manche dieser Typologien in unterschiedliche, spezi-

fische Gebäudeformen aufgegliedert werden: Einfamilienhäuser werden in Freistehende Einfamilienhäuser, Doppelhäuser, Gartenhofhäuser, Reihenhäuser oder Kettenhäuser unterteilt und Geschosswohnungsbauten in Freistehendes Vielwohnungshaus oder Freistehendes Hochhaus bzw. Außen- oder Innenganghaus. Zu den Sonderformen gehören neben Terrassenhäusern auch Wohnhügel oder Wohntürme [21].

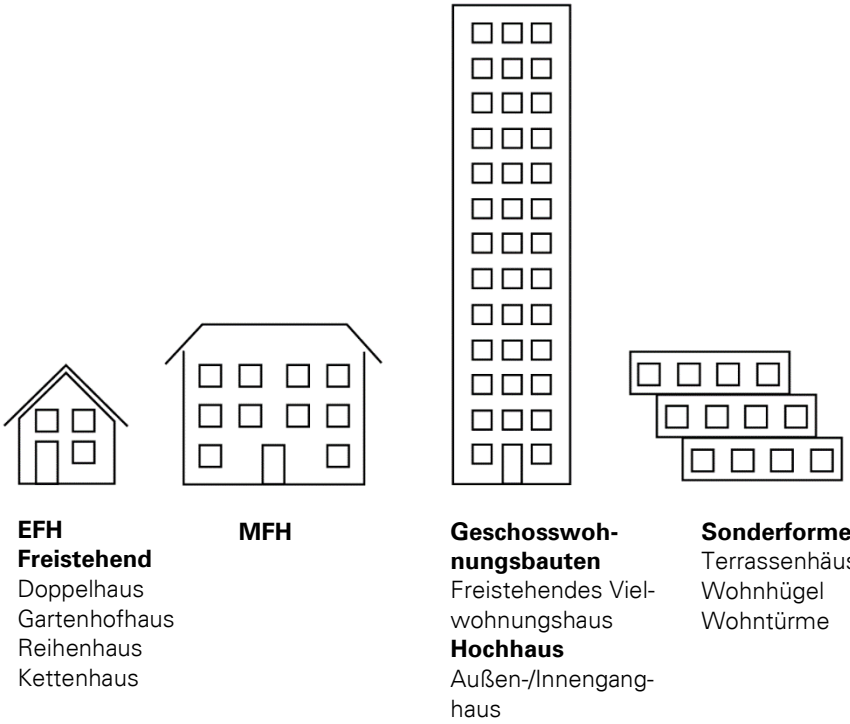


Abbildung 17: Gebäudetypologien nach M. Korda [21]

Die gewählten Bebauungsstrukturen (Punkt, Zeile, Block) implizieren bereits jeweils die Verwendung einer entsprechenden Gebäudetypologie. Aus den möglichen Gebäudetypologien wird das Einfamilienhaus als freistehendes Einfamilienhaus sowie das freistehende Hochhaus als Vertreter des Geschosswohnungsbaus für eine Punktbebauung festgelegt und das Mehrfamilienhaus mit unterschiedlicher Geschossigkeit für die Blockrand- und Zeilenbebauung verwendet. Sonderformen werden aufgrund ihres geringeren Vorkommens nicht berücksichtigt. Abbildung 18 zeigt die in vorliegender Arbeit zu untersuchenden drei Gebäudetypologien in unterschiedlicher Ausführung: EFH, MFH als Zeile und Baublock und zwei Hochhäuser unterschiedlicher Geschossigkeit.

Für eine umfassende Untersuchung werden den Bebauungsstrukturen und den jeweiligen Gebäudetypologien unterschiedliche Gebäudehöhen bei gleichbleibender Geschosshöhe zugeordnet. Die Geschosshöhe beträgt für sämtliche Gebäudetypologien 3,50 m.

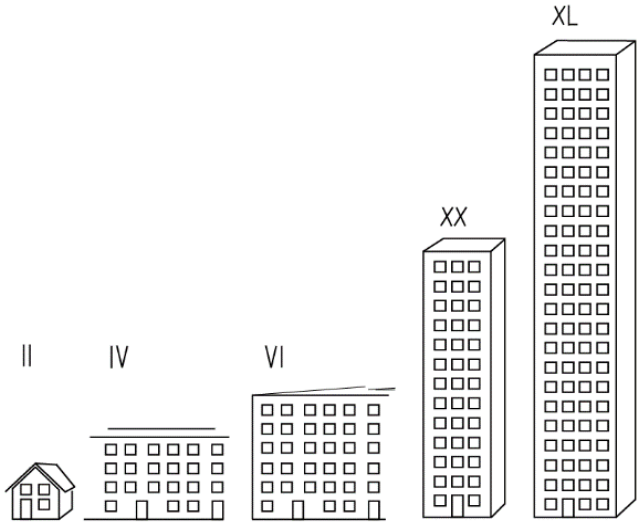


Abbildung 18: Schematische Darstellung der gewählten Bebauungsstrukturen mit entsprechenden Gebäudetypologien

Einfamilienhäuser erhalten einen zweigeschossigen Aufbau, Hochhausbauten werden unterteilt in Hochhäuser mit 20 Geschossen bei einer Gebäudehöhe von 70 m und in Gebäude mit 40 Geschossen und entsprechend 140 m Höhe. Zeilenbauten wird eine viergeschossige Bauhöhe zugeteilt und Blockrandbebauungen werden sechsgeschossig ausgeführt.

Jeder dieser fünf urbanen Baukörper weist unterschiedliche Charakteristiken auf, die das urbane Umfeld, in dem sie gewöhnlich vertreten sind, beeinflussen bzw. bedingen. Tabelle 4 verschafft einen Überblick über die wesentlichen Eigenschaften der Untersuchungsgegenstände.

Tabelle 4: Eigenschaften der Bebauungstypologien

	EFH	Zeilenbebauung	Blockrand-bebauung	Wohnhochhaus 20	Wohnhochhaus 40
Urbane Lage	Umland, Randzone	Randzone, Verstädterte Zone	Ergänzungsgebiet, Stadtkern	Trabant, Ergänzungsgebiet, Verstädterte Zone	
max. Dichte	3.000 – 7.500 EW/km² [21]	22.000 [109] - 40.000 EW/km² [110]	45.000 [110] – 76.000 EW/km² [109]	45.000 [110] – 106.000 EW/km² [109]	
				Abhängig von entsprechend limitierenden Mindestabständen	
Erschließung	Einseitig	Einseitig	Allseitig von Straße umschlossen	Je nach Gebäudebreite ein-, zwei- oder allseitig; hier: einseitig	
Wohnfläche je WE*	140 m²	80 m²	69 m²	69 m²	

*Die Angaben zur Wohnfläche in Gebäuden stammen aus einer Zensus-Umfrage von 2011 und beziehen sich auf Gebäude, die seit 2009 gebaut wurden. Hier wurde die durchschnittliche Wohnfläche für Gebäude mit 1-2 WE, 3-6 WE, 7-12 WE oder mehr als 13 WE ermittelt [30]. Die Werte der Tabelle sind entsprechend Gebäuden mit 1-2 WE für EFH, 7-12 WE für Zeilenbebauung und mehr als 13 WE für die drei verbliebenen Typologien zuzuordnen.

Aus der Verbindung der in Kapitel 3.2 definierten drei urbanen Dichten und den in Kapitel 3.3 festgelegten fünf Baukörpern entstehen somit insgesamt 15 Szenarien, die in Kapitel 4 gebildet und untersucht werden.

3.4 Flächenverbrauch

Der Verbrauch der natürlichen Ressource Boden (*hier:* Flächenverbrauch) ist zwar nicht direkt mit dem Verbrauch von Rohstoffen verrechenbar, jedoch nicht minder bedeutsam. Flächenverbrauch im urbanen Kontext spielt eine wichtige Rolle bei einem nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen, da auch die Ressource Boden nur endlich verfügbar ist. Ende 2016 betrug in Deutschland laut Statistischem Bundesamt der Anteil der Siedlungsfläche an der gesamten Bodenfläche 9,2 % und damit 32.770 km². Hieran haben Wohnbauflächen mit 13.669 km² und Verkehrsflächen mit 18.029 km² den größten Anteil [6].

Urbane Struktur

Würden die hier zu untersuchenden Dichten von 400, 4.000 und 20.000 Personen/km² auf die gesamte zukünftige Weltbevölkerung hochgerechnet werden, ergäben sich sehr unterschiedliche Flächenverbräuche. Ein von den Vereinten Nationen prognostizierter Nettoanstieg der Weltbevölkerung um 2,06 Mrd. Menschen zwischen 2019 und 2050 [2] würde bei einer ländlich geprägten Dichte von 400 Einwohnern/km² einen Zuwachs an notwendiger urbaner Fläche von 5,15 Mio. km² bedeuten. Bei der zehnfachen Dichte von 4.000 EW/km² beträgt der benötigte Flächenverbrauch für urbane Strukturen bereits nur noch 515.000 km², während er bei der größten zu untersuchenden Dichte von 20.000 EW/km² bei insgesamt 103.000 km² liegt. Anzumerken ist, dass bei dieser Kalkulation sowohl Gebäude für Wohn- als auch für Nichtwohnzwecke sowie entsprechende Erschließungs- und Erholungsflächen mit einbezogen sind.

Im vorliegenden Untersuchungsrahmen besteht der Flächenverbrauch der urbanen Struktur lediglich aus dem Anteil der versiegelten Fläche durch Wohngebäude und entsprechende Erschließungsstraßen, die Bebauungsdichte wäre in einem realen, mischgenutzten Gebiet also höher.

Gebäude

Unterschiedliche Gebäudetypologien beanspruchen, bedingt durch ihre jeweilige Größe und Erschließungsart, unterschiedlich viel Grundfläche. Eine Ausbreitung in die Vertikale und damit Stapelung von Geschossflächen übereinander führt beispielsweise zu einer höheren Geschossflächenzahl oder auch Ausnutzungsziffer. Von Korda wird die Geschossflächenzahl als Verhältnis der Geschossflächen sämtlicher Stockwerke zum Nettobauland des Baugrundstücks beschrieben [21]. Je größer die Geschossflächenzahl, desto intensiver wird das Grundstück genutzt. Wie Magnago Lampugnani zeigt, kann in sehr dichten Gebieten mit vielen Hochhausstrukturen wie z.B. Hongkong oder Downtown New York City eine Geschossflächenzahl von 12,9 bzw. 17 erreicht werden [52]. Dies hängt stets mit den notwendigen Abstands- und Erschließungsflächen zusammen, welche die durch Gebäude überbaubare Fläche begrenzen. Da die Geschossflächenzahl jedoch weder einen Rückschluss auf die Anzahl der Bewohner zulässt, noch die Erschließungsfläche einbezieht, werden im Folgenden zunächst für jede zu untersuchende Gebäudetypologie die Flächenverbräuche einer Wohneinheit ermittelt und anschließend der Flächenverbrauch des gesamten Baukörpers bestimmt.

3.4.1 Flächenverbrauch Wohneinheit

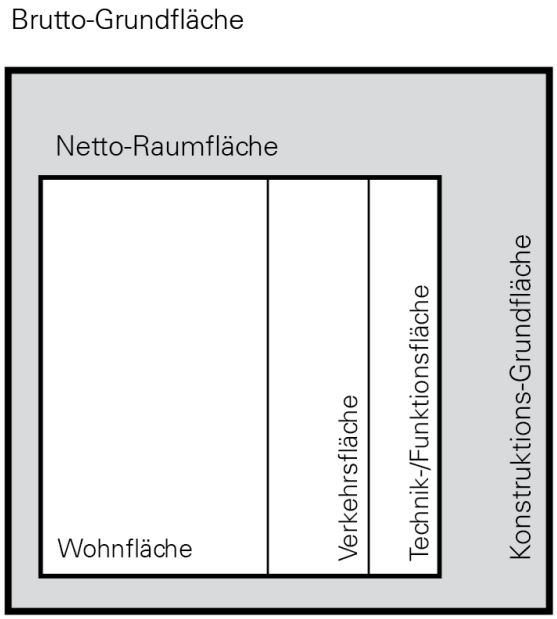


Abbildung 19: BGF auf Grundlage von DIN 277-1:2016-01

Eine Wohneinheit (WE) wird hier, wie in Kapitel 3.1 festgelegt, von 2,2 Einwohnern (EW) bewohnt. Dies resultiert in einer durchschnittlichen Wohnfläche von 88 m²/WE auf Grundlage des festgelegten Wohnflächendurchschnitts von 40 m² pro Person. Diese Quadratmeteranzahl entspricht allerdings nicht der Brutto-Grundfläche (BGF), die für einen repräsentativen Vergleich verwendet werden muss. Abbildung 19 zeigt die Zusammensetzung der Brutto-Grundfläche nach DIN 277-1:2016 [111]. Die BGF ergibt sich zum einen aus der Netto-Raumfläche (NRF), die sich wiederum aus der ehemaligen Nutzfläche, jetzt Nutzungsfläche (NUF), *hier:* Wohnfläche und einem variierenden Anteil an Verkehrs- und Technikfläche zusammensetzt, und zum anderen aus der benötigten Konstruktions-Grundfläche (KGF). Die Konstruktions-Grundfläche beinhaltet sowohl Außen- als auch Innenwände und nichttragende Trennwände sowie Installationsschächte unter 1 m² Grundfläche [111].

Die prozentualen Anteile der Konstruktions-Grundfläche und der Verkehrs- und Technikfläche variieren mit der jeweiligen Gebäudehöhe. Der Bruttoflächenbedarf einer Wohneinheit in einem Einfamilienhaus unterscheidet sich entsprechend von dem Flächenbedarf einer Wohneinheit in einem Mehrfamilien- oder Hochhaus. Somit gilt es, zunächst für die unterschiedlichen Gebäudetypologien einen Richtwert der Brutto-Grundfläche für die weiteren Berechnungen festzulegen.

Davis Langdon & Everest stellten 1997 im Rahmen einer Kostenanalyse eine Relation zwischen Gebäudehöhe und Verhältnis Netto- zu Brutto-Grundfläche (net/gross floor area) für Bürobauten auf (vgl. Tabelle 5). Im Jahr 2002 folgte eine Ermittlung der Gebäudeeffizienz von Bürogebäuden. Die Effizienz bezog sich dabei auf das Verhältnis zwischen vermietbarer Fläche (lettable area) und Brutto-Grundfläche (gross floor area), wie in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 5: Verhältnis Netto-/Bruttofläche [112]

Anzahl Stockwerke	NFA/GFA (in %)
2 – 4	83 – 86
5 – 9	79 – 83
10 – 19	72 – 80
20 – 29	70 – 78
30 – 39	69 – 75
> 40	68 – 73

Tabelle 6: Gebäudeeffizienz (vermietbare Fläche/BGF) [113]

Anzahl Stockwerke	Effizienz (in %)
2 – 4	88 – 91
5 – 9	84 – 88
10 – 19	77 – 85
20 – 29	75 – 83
30 – 39	74 – 79
> 40	72 – 77

Im Vergleich der beiden Tabellen ist auffällig, dass die Effizienz der Gebäude wohl höher ausfällt als das NFA/GFA-Verhältnis, was dadurch zu erklären ist, dass mehr Fläche als vermietbar gilt als netto zur Verfügung steht.

Problematisch bei der Interpretation dieser Angaben ist, dass zum einen aus den Aufstellungen nicht hervorgeht, welche Flächen in die jeweiligen Berechnungen zu NFA (net floor area) oder LA (lettable area) einbezogen werden. Zum anderen gibt es keine international gültige Definition oder Regelung zur Berechnung von vermietbarer Fläche und Netto-Grundfläche, so wie es beispielsweise in Deutschland mit der DIN 277-1 der Fall ist. Dadurch resultieren je nach Standort bzw. Berechnungsmethode unterschiedliche Flächenberechnungsergebnisse. International angewandt werden derzeit u.a. die Standards von BOMA (Building Owners and Managers Association) oder IPMS (International Property Measurement Standards), die jeweils andere Ansätze verfolgen.

Eine weitere Fehlerquelle stellen die zahlreichen, englischsprachigen Fachbegriffe wie rentable, lettable, sellable oder leasable floor area dar, die wörtlich übersetzt das gleiche bedeuten, aber im Englischen unterschiedlich interpretiert werden können. Je nach Kalkulationsansatz können Abweichungen der Flächenangaben von bis zu 27 % auftreten [114]. Hier zeigt sich die Notwendigkeit einer allgemein gültigen Berechnungsmethode, an der beispielsweise der CTBUH (Council on Tall Buildings and Urban Habitat) in Kooperation mit IPMS bereits arbeitet.

Aufgrund der nicht klar nachvollziehbaren Kalkulationen und Definitionen von Davis Langdon & Everest können die Prozentsätze nicht ohne Weiteres übernommen werden. Zum Abgleich wird auf Basis vorhandener Daten des Baukosteninformationszentrums (BKI) für 2- bis 6-geschossige Gebäude ein Durchschnittswert für die Flächenberechnungen ermittelt. Hierfür wird das Verhältnis zwischen Nutzungsfläche (NUF) bzw. Netto-Grundfläche (NGF) und Brutto-Grundfläche (BGF) untersucht. Ein Abgleich zwischen der Datenbank vor der Neuerung der DIN 277 im Jahre 2016 und den heute verfügbaren, aktuellen Daten zeigt, dass das BKI in seinen Aufstellungen NGF und NRF gleichsetzt.

Die Daten zu EFH und MFH stammen aus einer Auswertung unterschiedlicher Wohnbauprojekte aus der Datenbank des BKI. Eine Tabelle mit den für den Mittelwert verwendeten Gebäudedaten ist dem Anhang 2 zu entnehmen. Hier zeigt sich zunächst ein ähnlicher Prozentsatz wie in Tabelle 5, sofern die deutsche NGF mit dem englischen NFA gleichgesetzt werden kann.

Bei den Vergleichsobjekten mit den Kalkulationen des BKI ist die durchweg absteigende Effizienz bei zunehmender Höhe nicht von Anfang an wahrnehmbar. EFH mit zweigeschossiger Bauweise schneiden hier hinsichtlich des Verhältnisses von NGF zu BGF schlechter ab als 3-7 geschossige MFH. Diese Abweichung zu den Gebäuden aus der Studie von Davis Langdon & Everest könnte u.a. aus einer massiveren Bauweise der deutschen Vergleichsobjekte resultieren oder darin begründet liegen, dass Wohngebäude tendenziell schlechter abschneiden als Bürobauten, welche die Grundlage der Werte aus Tabelle 5 darstellen.

In [112] wird zudem explizit darauf hingewiesen, dass Gebäudeeffizienzen in Deutschland nur zwischen 60-70 % liegen, da zur natürlichen Belichtung geringe Gebäudetiefen vorherrschen. Niedrigere Effizienzen gelten demnach vor allem für höhere Gebäude und betreffen auch Wohnbauten, die mit zunehmender Gebäudetiefe schwerer vermietbar sind.

Für 20- bzw. 40-geschossige Hochhäuser sind weder umfangreiche Datenangaben noch ausreichend detaillierte Grundrisse für eigene Kalkulationen öffentlich zugänglich oder auf Nachfrag bei Planungsbüros erhältlich. Vom BKI ist ein Wohnhochhaus erfasst worden, welches eine NGF von 87,3 % und eine NUF von 62,3 % aufweist [115]. Es handelt sich hier allerdings um einen Gebäudekomplex mit partiell unterschiedlicher Geschossigkeit, der nicht als repräsentativ für innerstädtische Wohnhochhäuser verwendet werden kann. Ein Regelgrundriss dieses Gebäudes ist in Abbildung 20, links dargestellt. Weiterhin liegen Daten zweier Bürogebäude vor, deren NUF bei 57,4 % bzw. 65 % und NGF bei 78,9 % bzw. 87,3 % liegt.

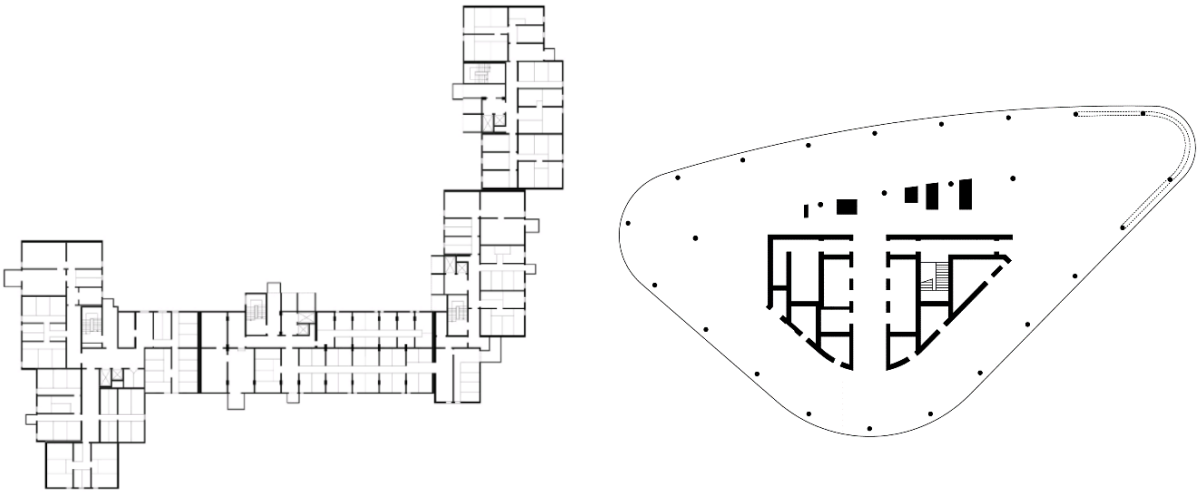


Abbildung 20: Grundrisse (maßstabslos) zweier Hochhäuser, links: Vergleichsgebäude 6100/0537 BKI [115], 19 Geschosse; rechts: ADAC Zentrale, 24 Geschosse [116]

Ein weiteres Wohnhochhaus weist bei 18 Geschossen einen Nutzungsflächenanteil von 56,6 % der BGF auf [116]. Diese Werte sind in Tabelle 7 zur Übersicht zusammengefasst. Da bei diesen Vergleichsobjekten nur die NGF, nicht jedoch die NRF angegeben ist, wird im Folgenden die NGF als Bezugsgröße betrachtet, auch wenn hier im Gegensatz zur NRF die Grundfläche von nichttragenden Wänden mit einbezogen wird.

Tabelle 7: Untersuchte Hochhäuser mit verfügbaren Flächenangaben

Hochhaus	NUF (in % von BGF)	NGF (in % von BGF)
BKI 6100-0537 [115]	62,3	87,3
ADAC Zentrale* - 24 [116]	57,4	82,7
Lörrach - 18 [116]	56,6	Keine Angabe
UN Campus Bonn - 17 [116]	65	87,3

*Diese Werte gelten nur für den Hochhausabschnitt, die Sockelgeschosse der ADAC Zentrale sind davon ausgenommen.

Aufbauend auf der Betrachtung der Beispielgebäude und unter Berücksichtigung der Daten von Davis Langdon & Everest können Mittelwerte der Effizienz von 20- bzw. 40-geschossigen Hochhäusern interpoliert werden. Hier lässt sich feststellen, dass bei Davis Langdon & Everest zwischen 5- bis 9-geschossiger Bebauung und 10- bis 19-geschossiger Bebauung eine mittlere Differenz des Verhältnisses NFA/GFA von 5 % auftritt und je zehn weitere Geschosse

die Differenz um weitere 2 % zunimmt. Diesem Abgleich folgend, ergeben sich für das Verhältnis NGF zu BGF für die beiden Hochhäuser folgende Werte:

$$NGF_{20}/BGF = 83\ \% - 5\ \% = 78\ \%$$
$$NGF_{40}/BGF = NGF_{20} - 2*2\ \% = 74\ \%$$

Die Verkehrsfläche sowie die Technikfläche, die hier noch in die NGF einbezogen werden, erfahren durch erhöhte Anforderungen an den Brandschutz und an die Lüftungstechnik einen leichten Anstieg, können für Wohnhochhäuser bis zu 40 Geschossen jedoch zu ähnlichen Anteilen wie bei MFH festgelegt werden, sodass sich für die Nutzungsfläche folgendes Verhältnis zur BGF darstellt:

$$NUF_{20}/BGF = 60\ \%$$
$$NUF_{40}/BGF = 56\ \%$$

Die geringe Anteilssteigerung der Verkehrsfläche liegt auch darin begründet, dass Hochhäuser erst ab ca. 200 m Gebäudehöhe durch Verteilergeschosse, sog. Skylobbies, erschlossen werden und dass die Wartezeit auf eine Aufzugskabine bei Wohnhochhäusern mit 40-100 s deutlich über der tolerierbaren Wartezeit bei Bürogebäuden mit 25-30 s liegt [117]. Damit vergrößert sich der Flächenbedarf für die Erschließungsfläche zwischen 20 und 40 Geschossen kaum.

Die endgültig festgelegten und für die weiteren Untersuchungen verwendeten Angaben zur Effizienz und die daraus resultierenden, ganzzahlig gerundeten Angaben zur BGF bei einer Nutzungsfläche von 88 m² sind aus Tabelle 8 ersichtlich.

Tabelle 8: Angaben zu NUF und NGF für die weiteren Untersuchungen (Mittelwerte); Angaben zu NUF und NGF in % von der jeweiligen BGF

Gebäudetyp (Geschosse)	NUF/BGF in %	NGF in %	BGF WE [m²]
EFH (2)	67	79	131
MFH (4)	70	84	126
MFH (6)	68	83	129
Hochhaus (20)	60	78	147
Hochhaus (40)	56	74	157

Abbildung 21 zeigt den festgelegten Datenverlauf und vergleicht die mittleren Werte von Davis Langdon & Everest mit den hier angesetzten Prozentsätzen. Daraus wird ersichtlich, dass alle Kurven die gleiche Tendenz aufweisen und mit zunehmender Höhe eine abfallende Effizienz aufzeigen. Die einzige Abweichung besteht in einem hier festgestellten Anstieg der Effizienz bei 4-6-geschossigen Gebäuden.

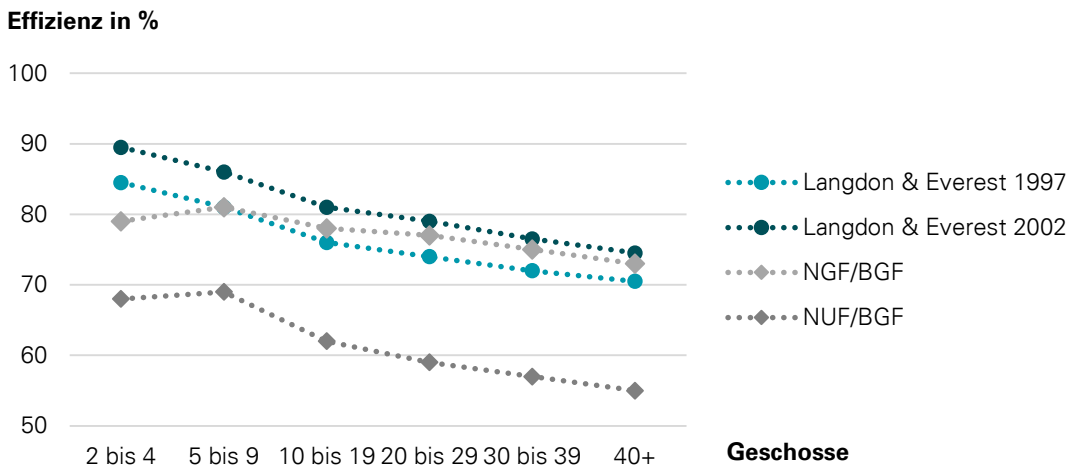


Abbildung 21: Vergleich der Effizienzangaben, Werte von Davis Langdon & Everest auf Basis von [112] und [113]; gemittelte Datenpunkte mit interpolierten Linien

3.4.2 Flächenverbrauch Bebauungsstruktur

Durch die Festlegung der Brutto-Grundfläche einer Wohneinheit in Kapitel 3.4.1 ist die Grundlage für die Flächenverbrauchskalkulationen geschaffen. Mit Ausnahme des Einfamilienhauses enthalten alle Baukörper mehrere Wohneinheiten. Deren Anzahl ist wesentlich von den Dimensionen der Baukörper abhängig. In Summe führen die Wohneinheiten zu der Brutto-Grundfläche des gesamten Gebäudes, die wiederum ein um die Anzahl der Geschosse Vielfaches größer als die bebaute Fläche ist.

Zur Ermittlung des Verbrauchs von physischem Raum bzw. Fläche werden im Folgenden die einzelnen Baukörper genauer definiert und die Flächen berechnet.

EFH

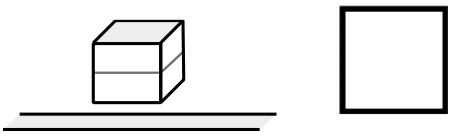


Abbildung 22: EFH - links: Baukörper, rechts: Grundriss (maßstabslos)

Einfamilienhäuser werden in vorliegender Untersuchung als zweigeschossige Baukörper ausgeführt – die Brutto-Grundfläche einer Wohneinheit wird ergo halbiert, um die überbaute Fläche zu erhalten. Wie in Abbildung 16 dargestellt, besitzen alle Punktbauten in dieser Untersuchung einen quadratischen Grundriss, so auch die EFH. Bei einer erforderlichen BGF von 131 m² für eine Wohneinheit ergibt sich eine Grundfläche von 65,5 m². Die überbaute Fläche pro Person liegt für diese Gebäudetypologie damit bei ca. 29,8 m². Dies führt zu einer Gebäudekantenlänge je EFH von ca. 8,1 m. Eine Zusammenfassung der weiteren Kennzahlen kann Tabelle 9 entnommen werden.

Tabelle 9: Kennzahlen eines EFH aus vorliegender Untersuchung

EFH	Einzelgebäude	Breite	Tiefe	Grundfläche	BGF	EW	WE
2 Geschosse	1	8,1 m	8,1 m	65,5* m²	131 m²	2,2	1

* Dieser Wert entspricht $BGF_{EFH}/2$ und weicht daher von der Fläche der gerundeten Kantenlängen leicht ab.

Zeile

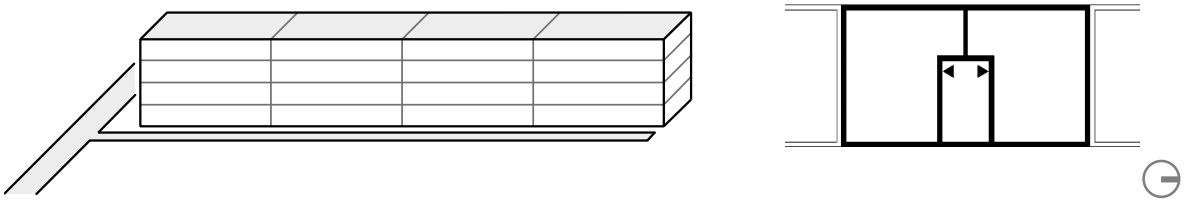


Abbildung 23: Zeile - links: schematische Darstellung des Baukörpers, rechts: exemplarischer Grundriss eines Einzelgebäudes (maßstabslos)

Eine Zeile besteht aus vier aneinandergereihten 4-geschossigen MFH. Diese wiederum werden hier als 2-Spänner ausgebildet. Ein Einzelgebäude einer Zeile verfügt damit über eine Grundfläche von 2*126 m² = 252 m². Bei einer für Zeilenbauten sinnvollen Gebäudetiefe von 12,0 m ergibt sich für diese Grundfläche eine Gebäudebreite von 21,0 m. Abbildung 23 zeigt einen exemplarischen Regelgeschossgrundriss einer Zeileneinheit dieser Untersuchung. Die Erschließung einer Zeile erfolgt hier über die Ost- bzw. Westseite. Ein Bewohner einer derartigen Zeile beansprucht durch die 4-geschossige Ausführung 14,3 m² überbaute Fläche für sich.

Die Maße einer Zeile ergeben sich letztlich aus der Addition der 4 MFH und werden in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Kennzahlen einer Zeile aus vorliegender Untersuchung

Zeile	Einzel-gebäude	Breite	Tiefe	Grundfläche Zeile	BGF Zeile	EW	WE
4 Geschosse	4	84,0 m	12,0 m	1.008 m²	4.032 m²	70,4	32

Baublock

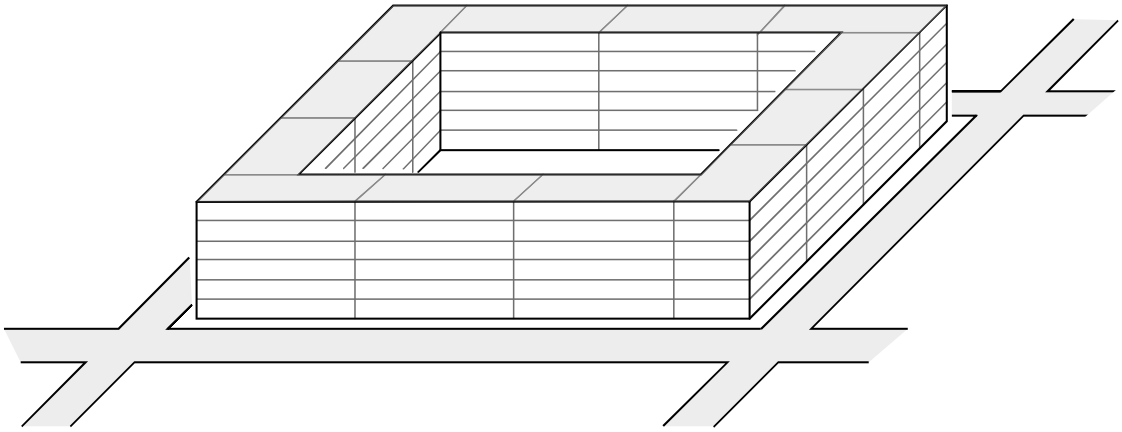


Abbildung 24: Schematische Darstellung eines Baublocks (maßstabslos)

Der hier festgelegte Baublock umfasst insgesamt zwölf 6-geschossige MFH, die zusammen einen geschlossenen Block formen. Die MFH sind jeweils als 3-Spänner ausgebildet und besitzen eine Grundfläche von 3*129 m² = 387 m². Die Gebäudetiefe wird unabhängig von ihrer Orientierung S-N bzw. O-W für alle Einzelgebäude des Baublocks auf 14,0 m festgelegt, woraus sich eine Einzelgebäudebreite von 27,6 m ergibt. Abbildung 24 zeigt die Anordnung der zwölf Einzelgebäude, die im Kollektiv einen Baublock ergeben. Die Kantenlänge des quadratischen Baublocks ist gemäß dieser Anordnung, 96,8 m.

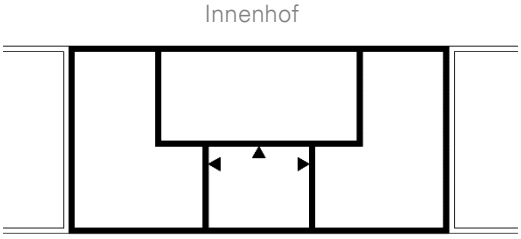


Abbildung 25: Exemplarischer Grundriss eines 3-Spänners (maßstabslos)

Die Wohneinheiten des Blocks orientieren sich zum Innenhof und werden von der umlaufenden Straße erschlossen. Ein Baublock wird in dieser Betrachtung nicht zusätzlich im Innenhofbereich nachverdichtet und stellt eine in sich geschlossene Baustruktur dar. Die in Abbildung 25 dargestellte Grundrissverteilung eines MFH des Baublocks ist stellvertretend für mögliche Grundrissausführungen eines 3-Spänners in Blockrandbebauung zu sehen.

Tabelle 11 fasst die wesentlichen Kennzahlen eines Baublocks zusammen. Für Baublockbewohner dieser Abmessungen fallen 9,8 m² Grundfläche an. Der Anteil für den unbebauten, aber nur halböffentlichen oder privaten 4.733,44 m² großen Innenhofbereich bleibt davon unberücksichtigt.

Tabelle 11: Kennzahlen eines Baublocks aus vorliegender Untersuchung

Baublock	Einzelgebäude	Breite	Tiefe	Grundfläche Block	BGF	EW	WE
6 Geschosse	12	96,8 m	14,0 m	4.644* m²	27.864 m²	475,2	216

* Dieser Wert entspricht 12*3*$BGF_{WE(BLOCK)}$ und weicht daher von der Fläche der gerundeten Kantenlängen leicht ab.

Hochhaus

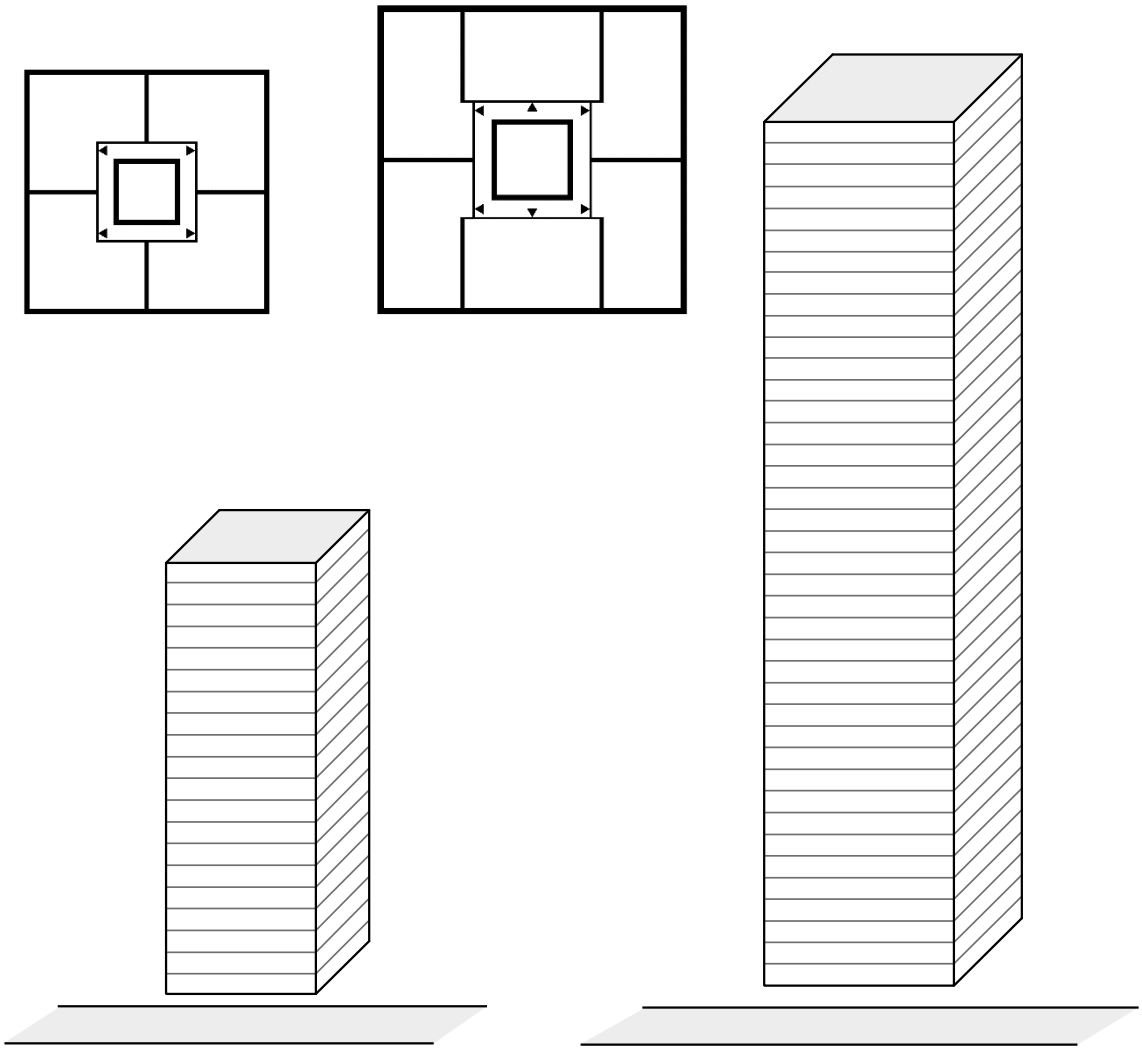


Abbildung 26: 20- und 40-geschossiges Hochhaus, oben links: exemplarische Grundrissaufteilung eines Regelgeschosses mit identisch großen Wohneinheiten, unten: schematische Darstellung der Baukörper

Laut König und Liphardt liegen die Geschossflächen von Hochhäusern für Büronutzung zwischen 900-1600 m². Bei quadratischem Grundriss wird für Bürogebäude deshalb eine Kantenlänge von 32-40 m als Grundlage angenommen, um eine sinnvolle Grundrissaufteilung zu ermöglichen [118]. Für Wohngebäude liegen die Längen und Flächen tendenziell noch darunter [118].

Übliche Schlankheitsgrade von Hochhäusern erreichen typischerweise Werte zwischen 1:5 und 1:8 im Verhältnis Gebäudebreite zu Gebäudehöhe. Um sowohl die möglichen Gebäudebreiten auszunutzen, als auch eine sinnvolle Schlankheit zu erreichen, werden die Gebäudekantenlängen der quadratischen Gebäude auf 24,25 m für das 20-geschossige Hochhaus und auf 30,7 m für das 40-geschossige Hochhaus festgelegt. Damit ergeben sich Schlankheiten von 1:3 bzw. 1:5.

Abbildung 26 zeigt oben links eine exemplarische Grundrissaufteilung für die beiden Wohntürme mit vier bzw. sechs Wohneinheiten pro Regelgeschoss. Hierbei ist zu beachten, dass die Grundrissaufteilung rein schematisch zu verstehen ist und sich daraus keine Aussage über das Trag- bzw. Aussteifungssystem der Hochhäuser ableiten lässt.

Aufgrund der hohen Grundflächenausnutzung für diese Gebäudetypologie müssen bei 20 Geschossen nur 3,3 m² Boden pro Bewohner aufgebracht werden, bei 40 Geschossen sogar nur 1,8 m². Die wesentlichen Kennzahlen der beiden Hochhausstrukturen in dieser Untersuchung sind aus Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 12: Kennzahlen eines 20- und 40-geschossigen Hochhauses aus vorliegender Untersuchung

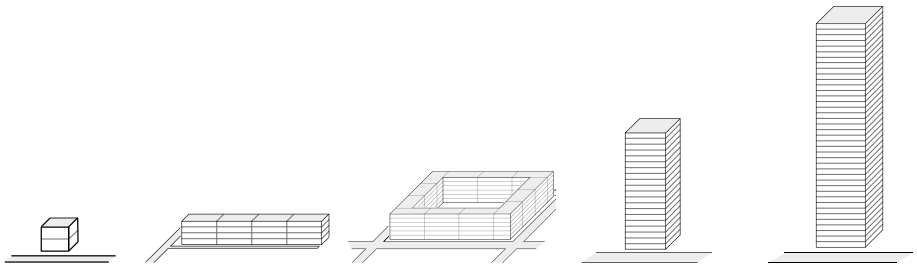
Hochhaus	Einzelgebäude	Breite [m]	Tiefe [m]	Grundfläche	BGF	EW	WE
20 Geschosse	1	24,25	24,25	588* m²	11.760 m²	176	80
40 Geschosse	1	30,7	30,7	942* m²	37.680** m²	528	240

* Dieser Wert entspricht 4 x BGF_{WEH20} bzw. 6 x BGF_{WEH40} und weicht daher von der Fläche der gerundeten Kantenlängen leicht ab.

** Dieser Wert entspricht der BGF_{WE} für 240 WE mit je 157 m² BGF und weicht daher von der Fläche der gerundeten Kantenlängen leicht ab.

Abschließend können die festgelegten Werte der fünf Baukörper in Tabelle 13 zusammengefasst werden.

Tabelle 13: Zusammenfassung der relevanten Kennzahlen für die fünf unterschiedlichen Baukörper (BK)



Geschosse	2	4	6	20	40
WE/BK	1	32	216	80	240
EW/BK	2,2	70,4	475,2	176	528
BGF/WE	131 m²	126 m²	129 m²	147 m²	157 m²
Bebaute Fläche/BK	65,5 m²	1.008 m²	4.644 m²	588 m²	942 m²
Bebaute Fläche/EW	29,8 m²	14,3 m²	9,8 m²	3,3 m²	1,8 m²

3.4.3 Flächenverbrauch Verkehrsanlagen

Zu den Verkehrsanlagen zählen in vorliegendem Kontext zunächst nur Straßenanlagen für den fließenden Verkehr. Sämtliche Straßen Deutschlands erreichten im Jahr 2007 eine Gesamtfläche von 4.431,57 km² [60], bei einem erfassten täglichen Zuwachs der Verkehrsfläche zwischen 2007-2015 von 9,8-24,0 ha/Tag [72]. Den größten Anteil der Gesamtfläche machen inner- und außerorts verlaufende Gemeindestraßen aus. Bei einer Länge von ca. 460.000 km und durchschnittlicher Breite von 5,5 m umfassen die Gemeindestraßen eine Fläche von 2.530 km² [60]. Folglich lässt sich errechnen, dass bei einer Bevölkerungsgröße von angenommenen 82 Mio. Menschen im Durchschnitt jeder Deutsche 30,9 m² Gemeindestraßen beansprucht. Hinzu kommen ca. 23,2 m² an überörtlichen Straßen.

Wie viel Fläche oder auch Straßenlänge jeder Bewohner tatsächlich beansprucht, ist u.a. abhängig von der Dichte der urbanen Struktur. Während einem Bürger einer ländlichen Gegend eine Länge von ca. 28,5 m Straße innerhalb des direkten Einzugsgebiets zugeteilt werden kann, sind es bei Stadtbewohnern wie beispielsweise in München nur 0,7 m.[1] Bei einer pauschal angenommenen Breite von 5,5 m ergeben sich 156,75 m² für Bewohner ländlicher Gegenden und 3,85 m² für einen Stadtbewohner.

Tabelle 14 vermittelt einen ersten Überblick über den Flächenverbrauch des fließenden Verkehrs je nach Einwohnerdichte eines Wohngebiets in m²/EW. Diese Angaben dienen im Anschluss zur Einzelfallbetrachtung der Verifizierung der in Kapitel 4.1 ermittelten Verkehrsflächen. Dies gilt allerdings nur für die Dichten 4.000 und 20.000 EW/km², da 5.000 EW/km² die geringste Dichte in Tabelle 14 darstellt und sich keine verlässliche Aussage über 400 EW/km² treffen lässt.

Vorab lässt sich jedoch aus Tabelle 14 klar erkennen, dass auch hier mit zunehmender urbaner Dichte die Verkehrsfläche pro Person stark abnimmt.

Tabelle 14: Flächenbedarf in m²/EW für fließenden Verkehr in Wohngebieten; erstellt auf Basis von [21]

Einwohner/km²	m²/EW
5.000	24,0
10.000	13,0
15.000 – 20.000	9,3-5,6
30.000 – 35.000	4,8-4,3
40.000	4,0

Die Ausbildung von innerstädtischen Straßen fällt unter die Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen (RASt). Aufbauend auf dieses Regelwerk erfolgt die Einteilung der einzelnen Erschließungsstraßen innerhalb des Betrachtungsfeldes in Wohnwege und -straßen, Sammelstraßen und Quartiersstraßen. Flächen für den ruhenden Verkehr werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Dies liegt u.a. darin begründet, dass in dieser systematischen Vorgehensweise

[1] Die Berechnung erfolgte auf Grundlage der Straßenkilometerangaben des ländlich geprägten Landkreises Cham (Opf.) [119] und der Angaben der Stadt München [120], [121].

stets die gleiche Anzahl an Parkplatzflächen pro Bewohner addiert werden müsste. Da dies für alle Dichten und alle Bebauungsstrukturen in gleichem Umfang gilt, ergeben sich daraus im Vergleich der Szenarien untereinander keinerlei Auswirkungen.

Zur phänomenologischen Untersuchung werden je nach urbanen Anforderungen und Verkehrsstärke für die jeweiligen Gebäudetypologien und urbanen Strukturen vier verschiedene Straßentypologien gewählt, denen auf Grundlage der RASt unterschiedliche Querschnittsbreiten zugeordnet werden können.

Im Folgenden werden die vier herausgearbeiteten Typologien entsprechend RASt 06 [122] genauer beschrieben und ihre jeweils angenommene Breite festgelegt. Ergänzend stellt Abbildung 27 die verwendeten Straßentypologien schematisch dar.

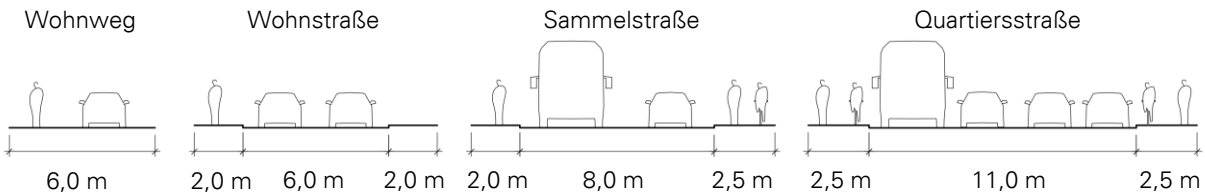


Abbildung 27: Exemplarische Querschnitte der vier Straßentypologien; Zeichnungen maßstablos

Wohnweg (ES V)

In der vorliegenden Betrachtung dienen Wohnwege ausschließlich zur Erschließung der Zeilenbebauung. Diese Straßentypologie zeichnet sich gemäß RASt durch eine geringe Länge (bis zu 100 m) und einer Verkehrsstärke unter 150 Kfz/h ohne ÖPNV-Verkehr aus. Die Straßenbreite variiert für Wohnwege zwischen 4,5 m und über 10,0 m. Um einen ungehinderten Verkehr und beidseitige Zeilenerschließung zu ermöglichen, wird hier eine Breite von 6,0 m angenommen.

Wohnstraße (ES V)

Die direkten Erschließungsstraßen in diesem Untersuchungsrahmen fallen unter die Typologie Wohnstraße. Sie wird angewandt für Verkehrsstärken unter 400 Kfz/h und Längenentwicklungen von bis ca. 300 m. Der Querschnitt dieser Straßentypologie variiert zwischen 9 und über 16,5 m, je nachdem ob ÖPNV-Nutzung in Form von Linienbusverkehr stattfindet oder nicht. Die Straßenbreite wird hier auf 10,0 m festgelegt. Diese setzt sich zusammen aus 6,0 m reiner Fahrbahnbreite und beidseitig verlaufenden 2,0 m breiten Gehwegen.

Sammelstraße (ES IV)

Die vorangegangene Straßentypologie mündet in einer Sammelstraße, die prinzipiell als Erschließungsstraße für unterschiedliche Bebauungsformen dient. Typischerweise beläuft sich die Verkehrsstärke auf 400-800 Kfz/h. Die Länge einer Sammelstraße erreicht 300 bis 1.000 m. Der Straßenquerschnitt fällt je nach ÖPNV-Nutzung und Parkplatzflächen zwischen 11,5 m und über 26,7 m aus. Um einen Linienbusverkehr zu ermöglichen, wird eine Gesamtbreite von 12,5 m angenommen, bestehend aus 8,0 m Fahrbahn und einen 2,0 m breiten Gehweg und einen 2,5 m breiten Gehweg mit Radverkehr.

Quartiersstraße (ES IV, HS IV)

Diese Straßentypologie ist sowohl Erschließungs- als auch Hauptverkehrsstraße, wie sie vorrangig bei dichten Bebauungen und Verkehrsstärken bis zu 1.000 Kfz/h vorkommen. Der Querschnitt einer Sammelstraße variiert je nach Aufwand für Parkplatzflächen und ÖPNV zwischen 12,0 m und über 20,7 m. Für den vorliegenden Betrachtungsrahmen wird eine Fahrbahnbreite von 11,0 m gewählt, wodurch zweispuriger Begegnungsverkehr von Kfz und ÖPNV-Fahrzeugen ermöglicht wird. Mit einem beidseitig verlaufenden 2,5 m breiten Gehweg mit Radverkehr wird eine Gesamtbreite von 16,0 m erreicht.

3.5 Ressourcenverbrauch Gebäude

Das deutsche Baustofflager für den Bereich Wohnen umfasste gemäß einer 2010 verfassten Studie des UBA bereits 10,1 Mrd. t [123]. Dies bezieht sämtliche Gebäude, die Wohnzwecken dienen, mit ein, schließt allerdings Infrastruktur und anders genutzte Hochbauten aus.

Wie viele Ressourcen tatsächlich in einzelnen Wohngebäuden verbaut sind, wird nur selten publiziert. Für die hier gewählten unterschiedlichen Gebäudetypologien gibt es daher in der Literatur bisher keine umfänglichen Angaben zum Ressourcenverbrauch. Demzufolge werden auf Basis der verfügbaren Daten phänomenologische Tendenzen ermittelt. Diese Angaben sind mit einer gewissen Unschärfe behaftet, die nur durch zahlreiche Fallstudien ausgleichbar ist.

In vorliegender Untersuchung werden folgende tragwerksrelevante und umschließende Gebäudeelemente berücksichtigt:

- Fundament
- Bodenplatte
- Horizontale Tragelemente (Decken, Unter-, Überzüge)
- Vertikale Tragelemente (Stützen, Wände, Aussteifungselemente)
- Dach
- Fassade

Weitere ressourcenverbrauchende Aspekte wie z.B. Innenausbau oder haustechnische Ausstattung werden nicht betrachtet.

Der Anteil von Holzkonstruktionen an neu errichteten Wohngebäuden in Deutschland lag im Zeitraum 2010-2013 bei nur 15 % [124]. Aus diesem Grund und weil Holz als nachwachsender Rohstoff (noch) nicht mit akutem Verfügbarkeitsengpass konfrontiert ist, werden Holzkonstruktionen nicht weiter betrachtet. Ein weiterer Grund ist, dass es bislang keine 20- bzw. 40-geschossigen Hochhäuser gibt, die mit Holz als primärem Konstruktionsmaterial ausgeführt wurden.

Untersucht werden hier ausschließlich Gebäude, die in Massivbauweise (mit z.B. Ziegel, Stahlbeton, Kalksandstein als primären Konstruktionsmaterial) ausgeführt werden, da diese Konstruktionsweise mit 74 % aller Wohnbauten zwischen 2010 und 2013 die deutliche Mehrheit bildet [124].

Ausgeschlossen werden neben Holzbauten auch Sonderkonstruktionen wie beispielsweise der Forschungsbau B10, der mit einem durchschnittlichen Gewicht von 500 kg/m² BGF eine sehr leichte Konstruktion darstellt.

3.5.1 Ein- und Mehrfamilienhäuser

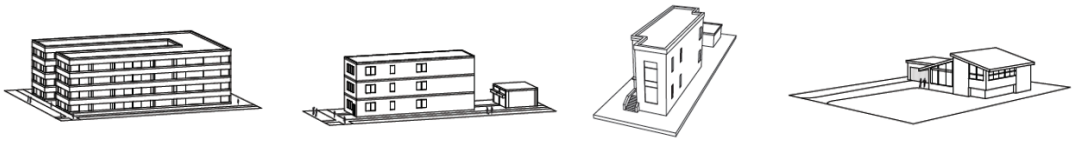


Abbildung 28: Vier der insgesamt neun Untersuchungsgebäude aus der Studie *Residensity* [16]

Für eine Aufstellung der in Ein- und Mehrfamilienhäusern verwendeten Ressourcen gibt es nur wenige Publikationen, die für eine überschlägige Massenangabe verwendet werden können. Auch hier zeigt sich die geringe Informationslage zur Ressourcenaufwendung im Bauwesen. Lehmann und Stanetzky untersuchten 2002 die Materialbestandteile dreier unterschiedlicher Haustypen der Baujahre 1969-1977. Die Ergebnisse zeigen einen durchschnittlichen Materialverbrauch von 2,2 t/m² BGF für 1,5-geschossige Einfamilienhäuser mit Schrägdach, 1,5 t/m² für 2,5-geschossige Reihenhäuser und 1,2 t/m² für viergeschossige Mehrfamilienhäuser [125]. Die Tendenz, dass EFH mehr Ressourcen verbrauchen als MFH kann auch durch die Betrachtung der Bauschuttmenge bei Gebäudeabbruch bestätigt werden. Gemessen in t pro m³ Bruttorauminhalt (BRI) liegt die Bauschuttmenge von EFH im Schnitt bei 0,60 t/m³, die von MFH bei ca. 0,48-0,4 t/m³ [126]. Bei einer einheitlichen Geschosshöhe von 3,50 m ergeben sich daraus 2,10 t/m² bzw. 1,68-1,40 t/m². Die pro m³ oder m² anfallende Bauschuttmenge bei Wohngebäuden in Massivbauweise nimmt ergo mit zunehmendem BRI ab. Einen weiteren Beleg für eine abnehmende Tendenz der Gebäudemasse im Vergleich EFH – MFH liefert das UBA in [123]. Das Gesamtgewicht pro Wohneinheit eines EFH-Neubaus wird darin mit 290 t beziffert, für MFH-Neubauten fallen lediglich 215 t an.

In der Studie *Residensity* des Architekturbüros Adrian Smith Gordon Gill (ASGG) aus dem Jahr 2018 [16] entwarfen die Architekten auf Grundlage ihrer praktischen Erfahrung neun stereotypische Gebäude, um damit unter bestimmten Vorgaben Simulationen zum aufgewandten Energieverbrauch vorzunehmen. Abbildung 28 gibt einen Überblick zu den darin untersuchten 2- bis 4-geschossigen Gebäudetypologien. Als Entwurfsgrundlage wurden die ASHRAE 90.1/90.2 Energiestandards angesetzt. Durch Summieren der darin angegebenen Materialien für die beiden Einfamilienhäuser der Studie ergeben sich 1,20 bzw. 1,33 t verbaute Gebäudemassen für Tragstruktur, Fassade und Fundament je m² BGF. Die Werte für 3- bis 4-geschossige MFH wurden mit 1,85 bzw. 1,56 t/m² BGF deutlich darüber angesetzt. Eine Aufstellung der Massenangaben, die Grundlage dieser Kalkulationen waren, befindet sich in Anhang 4 dieser Arbeit. Ein derart geringes Eigengewicht der EFH im Vergleich zu den beiden vorangegangenen Werten kann durch die unterschiedliche Bauweise der jeweiligen Gebäude erklärt werden. Die Häuser der ASGG-Studie entsprechen dem nordamerikanischen Standard und sind geprägt von leichten und dünnen Grobspan- und Gipsplatten, während sich die anderen beiden Referenzen aus dem deutschsprachigen Raum auf Massivbauten beziehen. Da in vorliegender Arbeit der Fokus auf dieser Bauweise liegt, können auf Grundlage der Angaben zu Gebäuden in Massivbauweise Mittelwerte gebildet werden, die in Tabelle 15 zusammengefasst sind.

Tabelle 15: Gewicht in t/m² BGF für EFH und MFH in vorliegender Untersuchung

Wohngebäude (Geschosse)	EFH (2)	MFH (4)	MFH (6)
Festgelegtes Gewicht	2,0 t/m²	1,5 t/m²	1,3 t/m²

Die festgelegten Mittelwerte sind in Abbildung 29 graphisch dargestellt. Für 3- und 5-geschossige Gebäude, die nicht explizit Teil dieser Untersuchung sind, werden Durchschnittswerte von 1,6 und 1,4 t/m² angenommen. Hier ist der Einbruch der aufzuwendenden Tonnage pro m² BGF bei über zwei Geschossen deutlich erkennbar. Dies ergibt sich aus den von Lehmann und Stanetzky ermittelten Werten für 2,5-geschossige Reihenhäuser im Vergleich zu 1,5-geschossigen EFH und der reduzierten Bauschuttmenge bei mehrgeschossigen MFH nach A. Müller [125], [126]. Nach dem Knick im Verlauf des Graphs ab drei Geschosse wird jedoch für 3- bis 6-geschossige Gebäude ein linearer Verlauf mit abnehmender Tendenz angenommen.

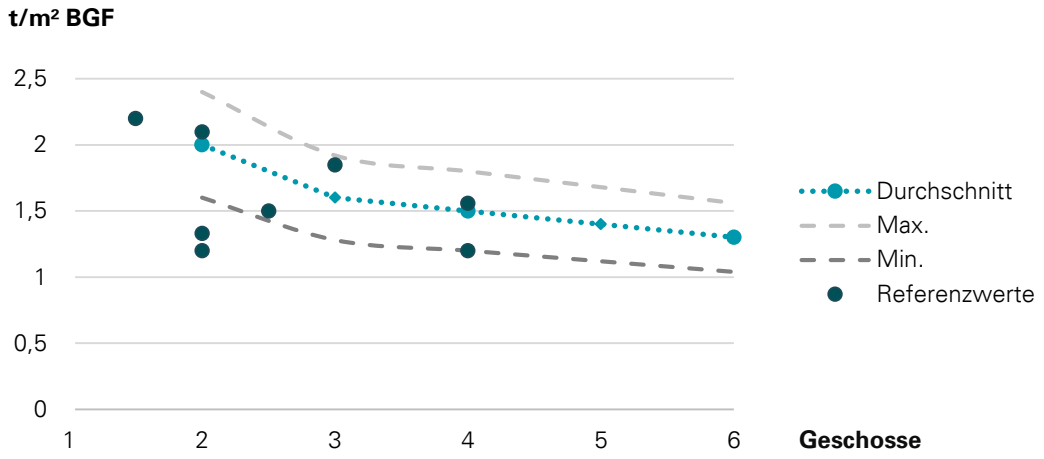


Abbildung 29: Korridor für EFH und MFH 2-6 Geschosse ±20 % von den festgelegten Ausgangswerten

In einem Bereich um ±20 % zum Mittelwert spannt sich ein Korridor auf, der in Abbildung 29 in Form zweier grau gestrichelter Linien dargestellt ist und die Tendenz der Ressourcenreduzierung bei mehrgeschossigen MFH widerspiegelt. In dieser Abbildung als Einzelwerte eingetragen sind die aus oben genannten Quellen entnommenen Werte für die Tonnage je m² BGF von EFH bzw. MFH. Es wird deutlich, dass die meisten Referenzwerte innerhalb des Korridors liegen, einzig die beiden EFH der *Residensity* Studie, die eine andere Bauweise verkörpern, liegen unterhalb.

Durch neue Werkstoffe und Werkstoffverbünde im Bauwesen wird auch die Anzahl der eingesetzten Materialien zahlreicher. Die von Lehmann und Stanetzky untersuchten Gebäude bestehen bereits aus 13 Materialgruppen. Eine entsprechende Aufstellung der Materialien ist dem Anhang 5 zu entnehmen.

Die Materialzusammensetzung für Wohngebäude, die zwischen 1978-1999 errichtet wurden, kann nach A. Müller vereinfacht, wie in Tabelle 16 dargestellt, aufgeteilt werden.

Tabelle 16: Materialzusammensetzung von EFH/MFH Bauzeit 1978-1999 nach [126]

Beton	Mauerwerk	Holz	Metalle	Restabfall
57,0 %	34,9 %	3,5 %	1,9 %	2,7 %

Die Überkategorie Restabfall wird in der referenzierten Quelle nicht weiter definiert. Nach Auskunft der Autorin ist darin ein Glasanteil am Gesamtvolumen von 0,1 % bis 1 % bei neueren Bauten enthalten [127]. Generell spielt Glas sowie Dämmmaterial nur eine untergeordnete Rolle. Diese Aussage bestätigt ein Vergleich mit den Aufstellungen des 3- und des 4-geschossigen Gebäudes der *Residensity* Studie: hier haben Fenster und Rahmen einen Anteil von 0,1 % und Dämmmaterial von nur 0,01 - 0,02 % [16].

Für die weiteren Untersuchungen wird, in Anlehnung an Tabelle 16, eine Materialzusammensetzung von EFH und MFH, wie in Tabelle 17 vermerkt, angenommen. Der Prozentsatz für die verwendeten Metalle wird nach einem Abgleich mit den Materialauflistungen aus [125] und [16] leicht erhöht. Da keine verlässliche Aussage über die spezifische Zusammensetzung des Restabfalls getroffen werden kann, wird dieser nicht weiter untergliedert und fortan als *Sonstiges* betitelt.

Tabelle 17: Materialzusammensetzung EFH/MFH

Beton	Mauerwerk	Holz	Metalle	Sonstiges
57,0 %	34,9 %	3,5 %	2,2 %	2,4 %

3.5.2 Hochhäuser

Hochhäuser unterscheiden sich generell in vielerlei Hinsicht von niedrigeren Gebäuden wie z.B. Mehrfamilienhäusern. Die Unterschiede reichen von umfänglicheren Planungsprozessen bis hin zu erhöhten Anforderungen an den Brandschutz und die vertikale Erschließung. Auch die Auslegung des Tragwerks wird durch die größere Höhe des Gebäudes komplexer.

Durch ihre Gebäudehöhe sind Hochhäuser als vertikale Kragträger nicht nur Normalkräften, sondern im Vergleich zu niedrigeren Gebäuden auch einer deutlich größeren Querkraftbelastung durch Wind oder Erdbeben ausgesetzt [118].

Premium for Height

Als erster beschrieb Fazlur Khan das einleitend erwähnte Phänomen mit der These *Premium for height* [128]. Hierbei bezog er sich auf die seinerzeit vorherrschende Tragwerksart der biegesteifen Rahmenkonstruktionen. Das Prinzip seiner These ist in Abbildung 30 dargestellt. *Premium for height* besagt, dass wenn ein Gebäude nur sein Eigengewicht und gegebenenfalls zusätzliche Verkehrslasten zu tragen hätte, die Ausbildung des Tragwerks, hier mit dem durchschnittlichen Gewicht der Stahlkonstruktion pro m² beschrieben, lediglich einem linearen Verlauf folgen würde. Da sich Hochhäuser allerdings nicht unter einer großen, windabweisenden Kuppel befinden, muss die Querkraftbelastung bei der Auslegung des Tragwerks besonders berücksichtig werden. Insbesondere, da deren Einfluss auf den Momentenkraftverlauf mit der Gebäudehöhe überproportional zunimmt [118]. Somit ist es nicht mehr ausreichend, von einer linearen (Stahl-)Gewichtszunahme auszugehen, denn es ergibt sich ein exponentieller Anstieg des Gewichts. Aufgrund dieses Sachverhalts entwickelte Khan auf Basis der Arbeiten von Myron Goldsmith je nach Gebäudehöhe unterschiedliche, effizientere Tragstrukturen, die diesen Effekt des *Premium for height* mindern sollten [128]. Als Weiterentwicklung hieraus entstanden u.a. Röhrentragwerksysteme.

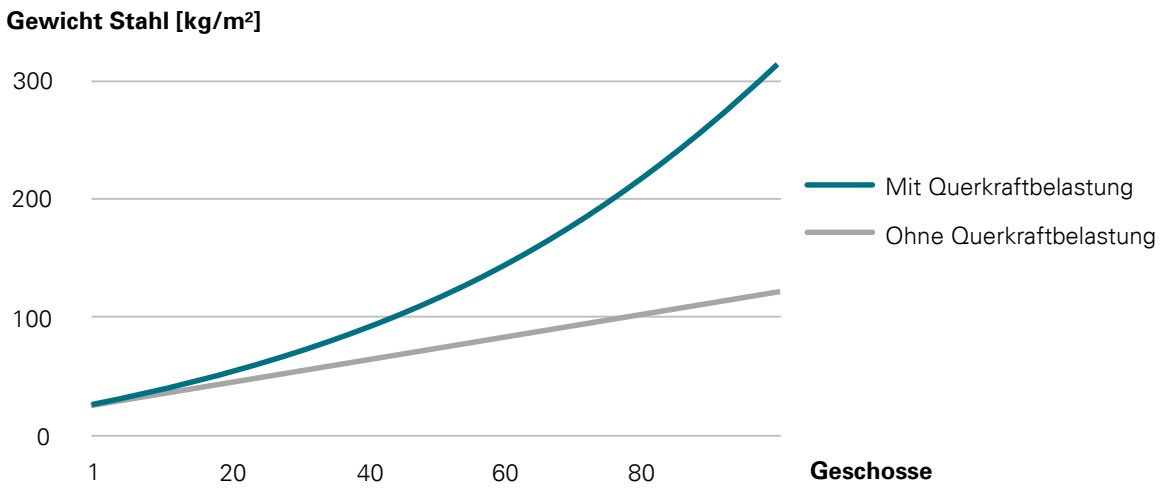


Abbildung 30: Premium for height, erstellt nach Fazlur Khan [128]

DAR's Formula

Aus der Theorie *Premium for height* lässt sich bereits eine steigende Tendenz des Gesamtgewichtsverlaufs von Rahmenkonstruktionen je m² BGF ableiten. Das durchschnittliche Gewicht von komplexen Gebäuden wie Hochhäusern ist jedoch nur schwerlich verallgemeinerbar und lässt keine allgemeingültigen Werte zu. Zu groß sind die Abhängigkeiten des Ressourcenaufwands von z.B. Konstruktionsmaterialwahl, Aussteifungskonzept, Bodenbeschaffenheit, Schlankheit oder Ausführung der Decken.

Das vorherrschende Konstruktionsmaterial von Wohnhochhäusern weltweit und auch in europäischen Ländern ist Stahlbeton. Der CTBUH erfasst in seiner Datenbank *Skyscrapercenter* für Europa 1.211 Wohnhochhäuser, die zwischen 1980-2019 fertiggestellt wurden. Von dieser Gesamtanzahl an europäischen Wohnhochhäusern wurden 865 Gebäude und damit die deutliche Mehrheit in Stahlbeton erstellt [129]. Aus diesem Grund wird in vorliegender Arbeit der Fokus der Untersuchungen von Wohnhochhäusern auf der Materialität Stahlbeton liegen. Eine ähnliche Tendenz zu Fazlur Khans *Premium for Height* lässt sich laut Dar Al Handasah auch für Hochhäuser aus Stahlbeton feststellen. Er formulierte diese These mit der sog. *DAR's Formula* [130]. Darin steigt der Betonverbrauch mit zunehmender Höhe an, wie aus Abbildung 31 ersichtlich.

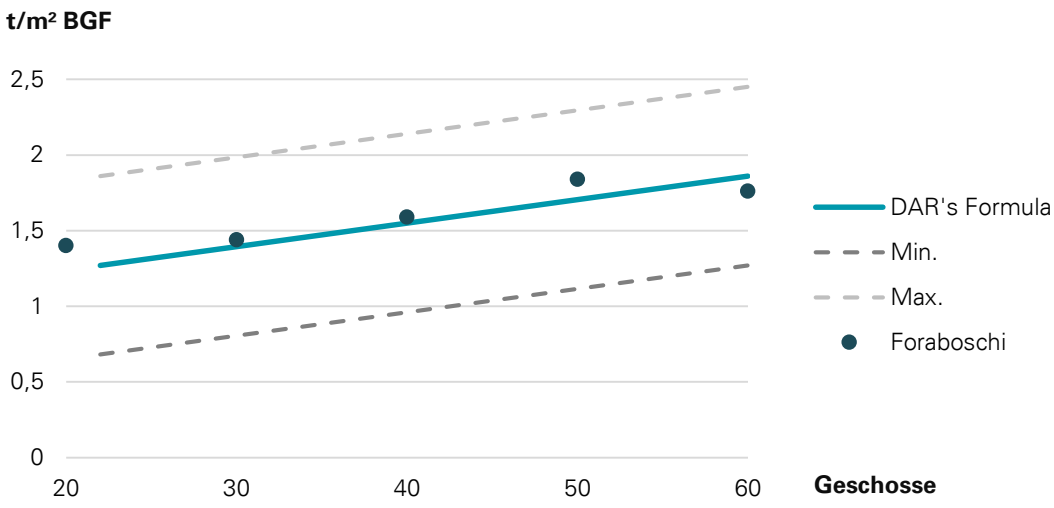


Abbildung 31: DAR's Formula mit gestrichelt dargestelltem Korridor, angewandt auf 22-60 geschossige Hochhäuser [130], Datenpunkte aus Foraboschi et al. [131]

Der Anstieg geschieht nicht nur in den horizontalen Tragwerkselementen, sondern auch in den vertikalen wie etwa Stützen oder Wänden. Hierbei wird allerdings von einem linearen Verlauf ausgegangen, der im Grundsatz gemäß folgender Formel verläuft:

$$G\ [t/m^2] = 2{,}5*(37{,}2+0{,}62n)\ /100$$

G beschreibt die aufgewandte Stahlbetonmenge in t/m² bei einem angenommenen Eigengewicht des Stahlbetons von 2,5 t/m³ und *n* die Anzahl der Geschosse.

Wie in Abbildung 31 dargestellt, wird für diese Formel ein Korridor aufgezeigt, der ±0,6 t/m² um den Mittelwert verläuft [130]. Dies ist jedoch laut Autor nur für Hochhäuser mit einer Geschossanzahl zwischen 22-85 anwendbar [130].

Massenermittlung

Trotz der Einschränkungen auf 22-85 Geschosse liefert DAR's Formel einen Richtwert zum Gewicht von Stahlbetonhochhäusern. Hier ist ergänzend anzumerken, dass dieses Gewicht zwar sämtliche horizontale und vertikale Konstruktionselemente mit einbezieht, nicht jedoch Fundament und Fassade.

Eine Verifizierung des Korridors aus Abbildung 31 kann durch die Gewichtskalkulation von Foraboschi et al. erreicht werden [131]. Hier wird mit dem Ziel der Ermittlung des grauen Energieaufwands von 20- bis 70-geschossigen Hochhäusern das Gesamtgewicht der tragstrukturellen Komponenten in kN angegeben. Ungerechnet in Tonnen durch den Faktor 0,102 ergeben sich daraus die in blau eingezeichneten Datenpunkte der Abbildung 31.

Auch bei den Aufstellungen von Foraboschi et al. sind Fundament und Fassade nicht in die Kalkulation mit einbezogen. Die Werte verlaufen allerdings deutlich innerhalb des Korridors von DAR's Formula und bestätigen damit die vorangegangenen Gewichtsannahmen.

Das Fundament eines Hochhauses ist wesentlich von der Bodenbeschaffenheit und der Tragfähigkeit des Untergrunds abhängig. So kann es z.B. eine Rolle spielen, wie viele Untergeschosse vorgesehen sind, da sich dadurch die Fundamentebene bereits näher an der tragenden Schicht befindet. Folglich variiert auch der gewichtsmäßige Anteil des Fundaments eines Gebäudes laut [132] zwischen 5-10 % des Gesamtbetonbedarfs. Ein Abgleich mit 20- bis 40-geschossigen Hochhäusern zeigt, dass hier die Anteile für das Fundament eher zwischen 15-20 % liegen [16], [84]. Der Anteil der Fassade hingegen ist wesentlich von ihrer Massivität abhängig. Während sie in [84], bedingt durch die massive Ausführung als gedämmte Außenwand, einen Anteil von etwa 9 % an der Gesamtkonstruktion hat, liegt dieser in [16] nur bei ca. 1 %. Die Auflistung der Materialien und ihre prozentuale Verteilung von [84] befindet sich im Anhang 6.

Für eine überschlägige Massenermittlung wird ein Anteil des Fundaments von 15 % und der Fassade von 1,5 % angenommen, da sich dieser Prozentsatz lediglich auf die transparenten Fassadenbereiche bezieht und nicht auf tragende Außenwände. Dies führt zu einem quantitativ veränderten Gewichtsverlauf. In Abbildung 32 vergleichend eingetragen, sind zum einen die beiden 20- und 38-geschossigen Hochhäuser der *Residensity* Studie mit 1,34 und 1,12 t/m² BGF [16] und zum anderen ein 22-geschossiges Hochhaus aus [84] mit 1,6 t/m².

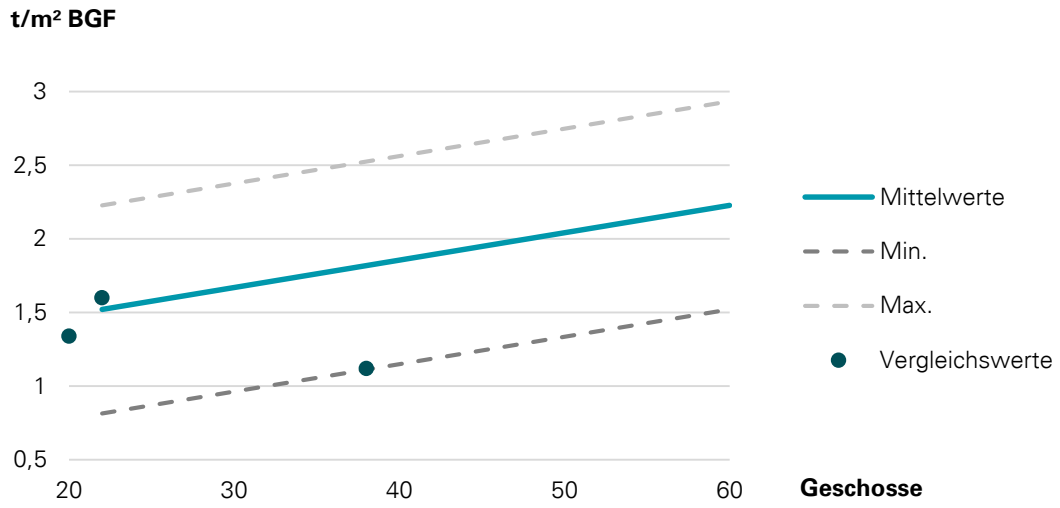


Abbildung 32: Gesamtgewichtsverlauf für Hochhäuser in t/m² BGF; Vergleichswerte aus [16] und [84]

Diese drei Vergleichswerte liegen innerhalb des aufgespannten Korridors und bestätigen damit dessen Gültigkeit.

Für die beiden Hochhäuser der vorliegenden Untersuchung ergibt sich, abgeleitet aus Abbildung 32, eine Gewichtsverteilung von 1,5 t/m² für das 20-geschossige Hochhaus (H20) und 1,9 t/m² für das 40-geschossige Hochhaus (H40). Das festgelegte Gewicht der Hochhäuser wird in Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Gewicht in t/m² für 20- und 40-geschossigen Wohnhochhäuser in dieser Untersuchung

Hochhaus	H20	H40
Festgelegtes Gewicht	1,5 t/m²	1,9 t/m²

Die Verteilung der verbauten Materialien bei Hochhäusern aus Stahlbeton beschränkt sich im Wesentlichen auf einen hohen Betonanteil. Beton als Hauptbestandteil der lastabtragenden Elemente beansprucht laut [16] für das 20- und 38-geschossige Hochhaus jeweils ca. 96,5 % der Gesamtmasse und ca. 93 % gemäß [84] für ein 22-geschossiges Gebäude. Der Stahlanteil durch Bewehrung beläuft sich auf 2,7-2,6 % bzw. 5,0 %. Die verbliebenen Prozent werden von Fassadenmaterialien und in sehr geringem Ausmaß von Dämmmaterialien oder Gipskartonplatten beansprucht.

Als Durchschnitt ergibt sich folgende, in Tabelle 19 aufgeführte Aufstellung zu den verbauten Massen für die in vorliegender Dissertation zu untersuchenden 20- und 40-geschossigen Hochhäuser.

Tabelle 19: Materialaufstellung 20- und 40-geschossiges Hochhaus

Beton	Stahl	Sonstiges
94,5 %	3,5 %	2,0 %

3.5.3 Zusammenfassung Materialverbräuche

Auf Basis der in den vorangegangenen Kapiteln ermittelten Angaben kann nun eine Aufstellung des Ressourcenverbrauchs, je nach zu untersuchenden Baukörpern, erfolgen. Dafür wird das jeweilige Gewicht pro m² BGF mit der entsprechenden BGF des gesamten Gebäudekomplexes multipliziert und eine Einzelaufstellung der Materialien gemäß den in Kapitel 3.5.1 und 3.5.2 festgelegten Werten generiert. Die folgenden tabellarischen Aufstellungen bieten einen Vergleich der Gebäudemasse je Einwohner, Wohneinheit und Quadratmeter Nutzungsfläche. Sie stellen die Grundlage für die Ressourcenberechnungen der Szenarien in Kapitel 4 dar. Eine ausführliche Diskussion dieser Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5.

Tabelle 20: Materialverbrauch EFH gesamt, je WE, EW und m² NUF

Angaben in t	Gewicht	Beton	Mauerwerk	Holz	Metalle	Sonstiges
Gesamt	262,00	149,34	91,44	9,17	5,76	6,29
Pro WE	262,00	149,34	91,44	9,17	5,76	6,29
Pro EW	119,09	67,88	41,56	4,17	2,62	2,86
Pro m² NUF	2,98	1,7	1,04	0,10	0,07	0,07

Tabelle 21: Materialverbrauch vier MFH (4) in Zeilenstruktur gesamt, je WE, EW und m² NUF

Angaben in t	Gewicht	Beton	Mauerwerk	Holz	Metalle	Sonstiges
Gesamt	6.048,00	3.447,36	2.110,75	211,68	133,06	145,15
Pro WE	198,00	107,73	65,96	6,62	4,16	4,54
Pro EW	85,91	48,97	29,98	3,01	1,89	2,06
Pro m² NUF	2,15	1,22	0,75	0,08	0,05	0,05

Tabelle 22: Materialverbrauch 12 MFH (6) in Blockrandbebauung gesamt, je WE, EW und m² NUF

Angaben in t	Gewicht	Beton	Mauerwerk	Holz	Metalle	Sonstiges
Gesamt	36.223,20	20.647,22	12.641,90	1.267,81	796,91	869,36
Pro WE	167,70	95,59	58,53	5,87	3,69	4,02
Pro EW	76,23	43,45	26,60	2,67	1,68	1,83
Pro m² NUF	1,91	1,09	0,67	0,07	0,04	0,05

Tabelle 23: Materialverbrauch 20-geschossiges Hochhaus gesamt, je WE, EW und m² NUF

Angaben in t	Gewicht	Beton	Stahl	Sonstiges
Gesamt	17.640,00	16.669,80	617,40	352,80
Pro WE	220,50	208,37	7,72	4,41
Pro EW	100,23	94,71	3,51	2,00
Pro m² NUF	2,51	2,37	0,09	0,05

Tabelle 24: Materialverbrauch 40-geschossiges Hochhaus gesamt, je WE, EW und m² NUF

Angaben in t	Gewicht	Beton	Stahl	Sonstiges
Gesamt	71.592,00	67.654,44	2.505,72	1.431,84
Pro WE	298,30	281,89	10,44	5,97
Pro EW	135,59	128,13	4,75	2,71
Pro m² NUF	3,39	3,20	0,12	0,07

Abschließend werden die ermittelten Werte der fünf Baukörper in Abbildung 33 nach Baustoffart graphisch zusammengefasst. Die Angaben entsprechen dem Verbrauch pro Bewohner bei 40 m²/cap Wohnfläche. Hieraus lässt sich bereits gut erkennen, welch große Diskrepanzen zwischen den jeweiligen Gebäudetypologien bestehen und wie hoch der Verbrauch von mineralischen Rohstoffen am Gesamtverbrauch ist. Die Bebauung im Baublock schneidet aufgrund des geringen Gewichts von MFH (6) pro m² BGF am besten ab.

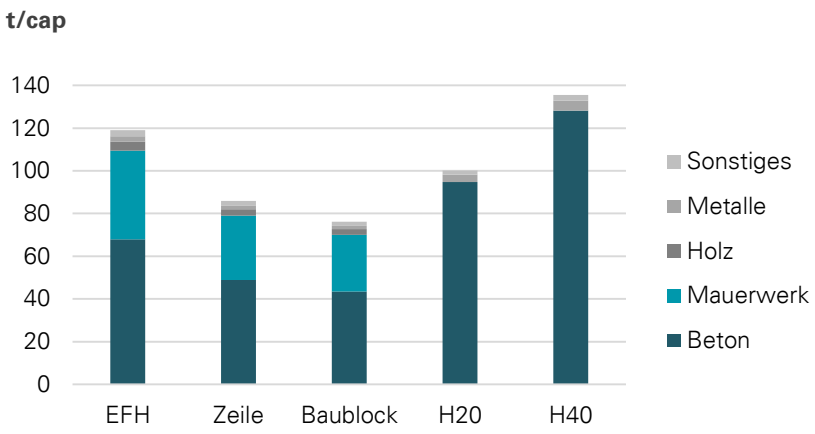


Abbildung 33: Ressourcenverbrauch der fünf untersuchten Bebauungstypologien pro Person

3.5.4 Baustoffzusammensetzung

Die Materialien, die unter Kapitel 3.5.1 und Kapitel 3.5.2 aufgelistet sind, stellen verarbeitete Baustoffe dar, die aus mehreren Einzelkomponenten in unterschiedlichen Herstellungsprozessen zusammengesetzt werden. In Tabelle 25 sind die einzelnen Baustoffbestandteile, wie sie in vorliegender Untersuchung angesetzt werden, mit entsprechenden Anteilen festgehalten.

Tabelle 25: Aufstellung der Baustoffbestandteile

Baustoff	Bestandteile	Massen-Anteile [M.-%]	Rohdichte gesamt [kg/m³]	Quelle
Beton (EFH/MFH) C25/30	Zement, davon:	12,4	2.000-2.600; *hier: 2.400*	[133] [134]
	- Portlandzementklinker	74		
	- Hüttensand	15		
	- Kalkstein	5		
	- Flugasche	0,5		
	- Gebrannter Schiefer	0,5		
	- Gips/Anhydrit	5		
	Zusatzstoffe	2,5		
	Wasser	7,5		
	Gesteinskörnung	77,5		
	Zusatzmittel	0,1		
Mauerwerk	Ton/Lehm	96	550-2.000; *hier: 575*	[135]
	Mineralische Zuschlagstoffe	4		
Holz	Holz – *hier:* Fichte	100	430-470; *hier: 450*	[136]
Metalle[2]	Stahl, davon	95	7.850	[137]
	- Eisen	99,4-<100; *99,8*		
	- Kohlenstoff	>0-0,6; *0,2*		
	Aluminium (EN AW-5005), davon	5	2.700	[138]
	- Legierung	2,2-2,8; *2,5*		
Beton (Hochhaus) C45/55	Zement, davon:	14,8-16,5; *15,4*	2.000-2.600; *hier: 2.500*	[139]; [134]
	- Portlandzementklinker	74		
	- Hüttensand	15		
	- Kalkstein	5		
	- Flugasche	0,5		
	- Gebrannter Schiefer	0,5		
	- Gips/Anhydrit	5		
	Zusatzstoffe	1,8-2,5; *2*		
	Wasser	6,4-6,7; *6,5*		
	Gesteinskörnung	74,3-76,8; *76,0*		
	Zusatzmittel	0,1-0,2; *0,1*		
Stahl (Baustahl) nicht-legiert	Eisen	99,4- <100; *99,8*	7.850	[137]
	Kohlenstoff	>0-0,6; *0, 2*		

[2] Die jeweiligen Anteile der Materialien werden in Anlehnung an das Verhältnis Stahl/Aluminium der *Residensity* Studie festgelegt.

3.6 Ressourcenverbrauch Verkehrsanlagen

Die Verkehrsanlagen im vorliegenden Kontext begrenzen sich auf Straßen zur infrastrukturellen Erschließung der einzelnen urbanen Baukörper. In Deutschland werden vorwiegend drei unterschiedliche Deckschichten als Straßenoberfläche verwendet: Asphalt-, Beton- und Pflasterdecken. Betondecken werden nur zu sehr geringem Anteil und hauptsächlich für Straßen des außerstädtischen Verkehrs verwendet [140] und bleiben daher in dieser Betrachtung unberücksichtigt. Pflasterbeläge finden ihre Anwendung zwar im Wesentlichen im innerstädtischen Bereich, stellen jedoch ebenfalls nur einen geringen Anteil von ca. 22 % der Gemeindestraßen [140], weshalb im Folgenden ausschließlich Deckschichten auf Asphaltbasis untersucht werden.

Für den Betrachtungsrahmen wird die Frostempfindlichkeitsklasse F2 in Zone I angesetzt, woraus sich die Stärke des frostsicheren Oberbaus ableiten lässt. Dies entspricht der Frosteinwirkungszone von Westdeutschland [141]. Aus den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO) können die entsprechenden Bauklassen für die jeweiligen, hier zur Verwendung kommenden Straßentypen abgeleitet werden [141]. Daraus ergeben sich die in Tabelle 26 zusammengefassten Angaben mit den entsprechenden Dickenangaben des frostsicheren Oberbaus. Es handelt sich um Mindestdicken, ohne erhöhte Ansprüche an die Witterungsresistenz oder Belastbarkeit, welche eine Steigerung des frostsicheren Straßenaufbaus erfordern.

Tabelle 26: Bauklassen und Oberbaueigenschaften je Straßentyp [141]

Straßentyp	Bauklasse	Frostsicherer Oberbau in Zone I
Quartiersstraße	$Bk_{3,2}$	50 cm Gesamtdicke
Sammelstraße	$Bk_{1,8}$	50 cm Gesamtdicke
Wohnstraße	$Bk_{1,3}$	50 cm Gesamtdicke
Wohnweg	$Bk_{0,3}$	40 cm Gesamtdicke

Abbildung 34 zeigt ergänzend den entsprechenden Ausschnitt der RStO, woraus die jeweiligen Dicken der Asphaltdeck- und -tragschichten abgelesen werden können. Je nach Bauklasse und der damit einhergehenden Belastung für die Straße variiert die Dicke beider Schichten zwischen 14 cm und 22 cm.

(Dickenangaben in cm; ▼ E_{v2}-Mindestwerte in MN/m²)

Zeile	Bauklasse	Bk_{100}				Bk_{32}				Bk_{10}				$Bk_{3,2}$				$Bk_{1,8}$				$Bk_{1,0}$				$Bk_{0,3}$			
	B [Mio]	> 32				> 10 - 32				> 3,2 - 10				> 1,8 - 3,2				> 1,0 - 1,8				> 0,3 - 1,0				≤ 0,3			
	Dicke des frostsich. Oberbaues[1]	55	65	75	85	55	65	75	85	55	65	75	85	45	55	65	75	45	55	65	75	35	45	55	65	35	45	55	65
1	**Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht**																												
	Asphaltdecke	12				12				12				10				4				4				4			
	Asphalttragschicht	▼120 22 Σ34				▼120 18 Σ30				▼120 14 Σ26				▼120 12 Σ22				▼120 16 Σ20				▼120 14 Σ18				▼100 10 Σ14			
	Frostschutzschicht	▼ 45				▼ 45				▼ 45				▼ 45				▼ 45				▼ 45				▼ 45			
	Dicke der Frostschutzschicht	-	31[2]	41	51	25[3]	35	45	55	29[3]	39	49	59	-	33[2]	43	53	25[3]	35	45	55	17[2]	27	37	47	21	31	41	51

Abbildung 34: Ausschnitt aus RStO-12 [141] mit zutreffenden Bauklassen und angenommenen Schichten

Laut den zusätzlichen technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB 07) werden für Asphalttrag- und Asphaltdeckschichten Gesteinskörnungen abgestufter Körnung mit Straßenbaubitumen als Bindemittel verwendet [142].

Die Zusammensetzung der Asphaltdeck- und -tragschichten variiert in der ZTV Asphalt je nach Mischung und Anforderungen, wird im Folgenden jedoch für beide Schichten vereinfachend auf 95 % Gesteinskörnung und 5 % Straßenbaubitumen festgelegt. Die Masse eines m³ Asphaltbeton wird mit ca. 2,4 t/m³ angenommen [143], woraus bei Anwendung der prozentualen Verteilung 2,28 t/m³ für Gesteinskörnungen und ca. 0,12 t/m³ für Bitumen aufgebracht werden.

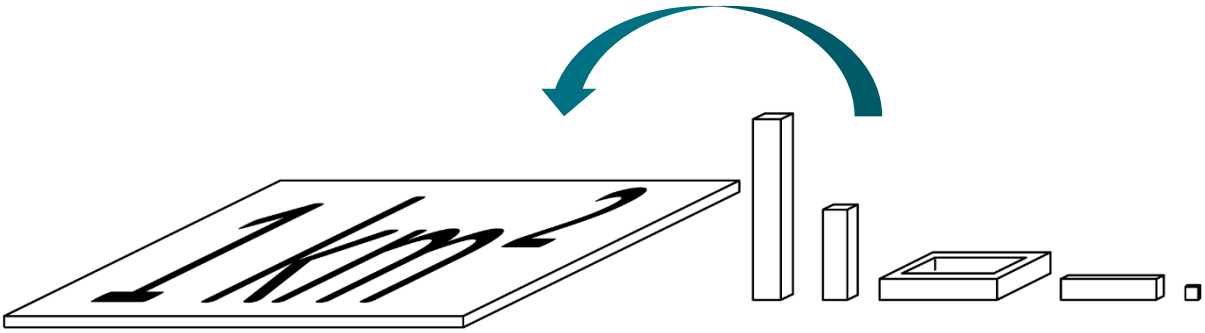
Für die Frostschutzschicht wird eine abgestufte Gesteinskörnung mit einem Gewicht von 2,0 t/m³ [143] angenommen.

Aufgegliedert in die jeweiligen Bauklassen und die damit einhergehenden Mindestdicken aus Tabelle 26 sowie die Angaben zu den Schichten gemäß Abbildung 34 ergeben sich aus obigen Werten die Ressourcenzusammensetzungen in Tabelle 27. Der Straßenaufbau wird in dieser Untersuchung für den gesamten Straßenquerschnitt (Fahrbahn und Fußgängerweg) angewandt.

Tabelle 27: Ressourcenaufwand nach Bauklasse je m² Straßenfläche

Bauklasse	Gesteinskörnung Asphalt	Bitumen	Gesteinskörnung Frostschutzschicht	Gesamt
$Bk_{3,2}$	0,50 t/m²	0,03 t/m²	0,56 t/m²	1,09 t/m²
$Bk_{1,8}$	0,46 t/m²	0,02 t/m²	0,60 t/m²	1,08 t/m²
$Bk_{1,0}$	0,41 t/m²	0,02 t/m²	0,64 t/m²	1,07 t/m²
$Bk_{0,3}$	0,32 t/m²	0,02 t/m²	0,52 t/m²	0,86 t/m²

4 Betrachtungsrahmen



Die Anordnung der Baukörper auf dem Untersuchungsfeld spielt eine wichtige Rolle bei der Betrachtung der Erschließungsflächen und damit der versiegelten Fläche für Verkehrsanlagen. Unterschiedliche Herangehensweisen für die Platzierung der Baukörper können dadurch zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Es lassen sich zwei Methoden identifizieren, wie Baukörper und erschließende Infrastruktur angeordnet werden können. So ergibt sich einerseits die Möglichkeit, die Baukörper entsprechend ihrer typischen städtebaulichen Dichte und Bebauungsform anzuordnen und beispielsweise EFH jeweils mit einer Grundstücksfläche von ca. 600 m² zu versehen, wie in [21] als Richtwert angegeben. Diese Vorgehensweise wurde z.B. in der Studie *Residensity* von ASGG angewandt, da die Autoren jedem Gebäudetyp eine individuelle Parzelle zuwiesen [16].

Eine zweite Möglichkeit stellt die gleichmäßige Verteilung der Baukörper über die gesamte Betrachtungsfläche dar. Durch diese Methode kann eine einheitliche Gliederung der Gebäude bei unterschiedlicher Dichte gewährleistet werden. Ein weiterer Vorteil ergibt sich daraus, dass die unterschiedlichen Gebäudetypologien unabhängig von ihrer maximal sinnvollen Dichte untersucht werden können, wodurch die bisherige systematische und rein phänomenologische Vorgehensweise verstärkt wird. Aufgrund der aufgezeigten Vorteile wird diese Anordnung für die Szenarienerstellung angewandt.

Der nächste festzulegende, den Betrachtungsrahmen bestimmende Entwurfsparameter ergibt sich aus der Frage, wie die gleichmäßige Verteilung erzielt wird und ob die Platzierung der Baukörper und auch die jeweilige verkehrstechnische Erschließung einem stringenten Raster oder einer freien Verteilung auf der Fläche folgen.

Im historischen Europa entwickelten sich urbane Gebiete häufig um bereits existierende Baustrukturen wie Kirchen oder kulturelle Einrichtungen. Die verkehrstechnische Erschließung der Baukörper zu bestehenden Elementen wurde nach und nach hinzugefügt. Bei umfangreichen Neuentwicklungen größerer urbaner Räume wurde jedoch meist eine schematische, radiale oder orthogonale Strukturierung gewählt, wie z.B. in Palma Nova (IT), Neuf-Brisach (FR) oder Savannah (USA) [144]. Stadtentwicklungen in den USA bedienten sich sehr häufig und unabhängig von Topografieeigenschaften eines orthogonalen Rasters, wie die Beispiele Manhattan, San Francisco oder Philadelphia zeigen. Eines der imposantesten Beispiele einer großflächigen städtebaulichen Weiterentwicklung eines historischen Stadtkerns in Europa stellt der Erweiterungsplan Barcelonas von Ildefons Cerdà aus dem 19. Jahrhundert dar [144]. Für die geplanten Stadtquartiere Barcelonas legte Cerdà eine sehr stringente Verteilung der Baublöcke in einem Nordwest-Südost orientierten Raster fest, woraus sich auch für die Straßenführung eine orthogonale Gliederung ergab. Auf Grundlage der genannten stadtplanerischen Faktoren für Neuentwicklungen urbaner Räume wird eine orthogonale Platzierung der Baukörper für die folgenden Szenarien festgelegt.

4.1 Szenarienerstellung

Insgesamt werden 15 Szenarien gebildet, die jede der fünf Bebauungstypologien in den drei unterschiedlichen urbanen Dichten phänomenologisch darstellen. Die drei Dichten 400, 4.000 bzw. 20.000 EW/km² sind meist nicht ganzzahlig durch die fünf festgelegten Baukörper zu erreichen, da eine vorgegebene Anzahl an Bewohnern mit den jeweiligen Bauten einhergeht (vgl. Tabelle 13). Aus diesem Grund wird die Anzahl der Baukörper mit jeweils erreichbarer Einwohnerzahl näherungsweise bestimmt. Eine einzuhaltende Vorgabe ist eine maximale Unterschreitung der Einwohnerzahl um 50 EW/km². Tabelle 28 fasst die entsprechenden Werte in einer Übersicht zusammen.

Tabelle 28: Festgelegte Anzahl der Baukörper (BK) und Einwohner (EW) für die fünf zu untersuchenden Bebauungsformen in den drei gewählten urbanen Dichten 400, 4.000, 20.000 EW/km²

	EFH		Zeile		Block		H20		H40	
Dichte	**BK**	**EW**	**BK**	**EW**	**BK**	**EW**	**BK**	**EW**	**BK**	**EW**
400	182	400,4	6	422,4	1	475,2	2	352	1	528
4.000	1818	3.999,6	57	4.012,8	9	4.276,8	23	4.048	8	4.224
20.000	9.091	20.000,2	284	19.993,6	42	19.958,4	114	20.064	38	20.064

Auf Grundlage der Angaben aus Tabelle 28 können schließlich für die 15 Szenarien Rasterunterteilungen festgelegt werden. Bei den Baukörperformen mit quadratischer Grundfläche wird eine möglichst quadratische Rasterung angestrebt, bei Zeilenanordnung hingegen eine rechteckige Strukturierung mit deutlichen Unterschieden zwischen den Kantenlängen der einzelnen Parzellen. In den dadurch entstehenden Rasterfeldern werden die Baukörper zentrisch platziert und durch eine möglichst geringe Straßenfläche verkehrstechnisch erschlossen. Fußwege von Straßen- zu Gebäudekante bzw. Haustür werden nicht berücksichtigt. Flächen für den ruhenden Verkehr sind aus den in Kapitel 3.4.3 erläuterten Gründen ebenfalls nicht Teil der Szenarienerstellung. Die Erschließung beschränkt sich grundsätzlich auf den Betrachtungsrahmen. Anbindungen außerhalb des Quadratkilometers, wie beispielsweise eine das Gebiet umlaufende Straße, werden nicht betrachtet.

Um eine Vergleichbarkeit der Szenarien zu erreichen, gelten für die Festlegung der verkehrstechnischen Erschließungsfläche folgende Entwurfsvorgaben:

- Die Haupterschließungsachsen verlaufen in West-Ost-Richtung, Nebenerschließungsachsen Nord-Süd.
- Mindestens eine Haupterschließungsachse muss sich über die gesamte Länge erstrecken und das Betrachtungsfeld mit den östlich und westlich angrenzenden Gebieten verbinden, eine durchgehende Nord-Süd-Verbindung ist hingegen nicht gefordert.
- Für Punkt- und Zeilenbauten erfolgt die Erschließung einseitig, für Baublöcke allseitig.
- Der Abstand zwischen Straßen- und Gebäudekante darf 30 m nicht überschreiten.
- Die Straßentypologie wird gemäß Einwohneranzahl und Anforderungsprofil gewählt.
- Gegebenenfalls notwendige Wendeanker am Ende von Stichstraßen werden nicht berücksichtigt.

Es wird bewusst davon abgesehen, ein realistisches Stadtbild zu entwerfen. Erschließung und Baukörperpositionen entsprechen einer rein phänomenologischen Anordnung und erheben keinen Anspruch auf Gültigkeit für ein funktionierendes Stadtgefüge.

4.2 Ressourcenermittlung Dichte 400

Wie in Kapitel 3.2 festgelegt, ist die erste zu untersuchende Dichte einer urbanen Struktur 400 EW/km². Im Folgenden werden fünf Untersuchungsszenarien gebildet, die durch eine sortenreine Anordnung von EFH-, Zeilen-, Baublock- und Hochhausbebauung diese oder eine nahegelegene Dichte erreichen. Die Baukörperanzahlen aus Tabelle 28 werden entsprechend dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Raster auf dem Quadratkilometer angeordnet und eine verkehrstechnische Erschließung gemäß der genannten Entwurfsbedingungen wird festgelegt. Für diese geringe urbane Dichte werden lediglich die Straßentypologien Wohnstraße ($Bk_{1,3}$) und Wohnweg ($Bk_{0,3}$) verwendet. Abbildung 35 zeigt eine Übersicht des Entwurfsrasters sowie der Gebäude- und Straßenplatzierung der Szenarien 1-5.

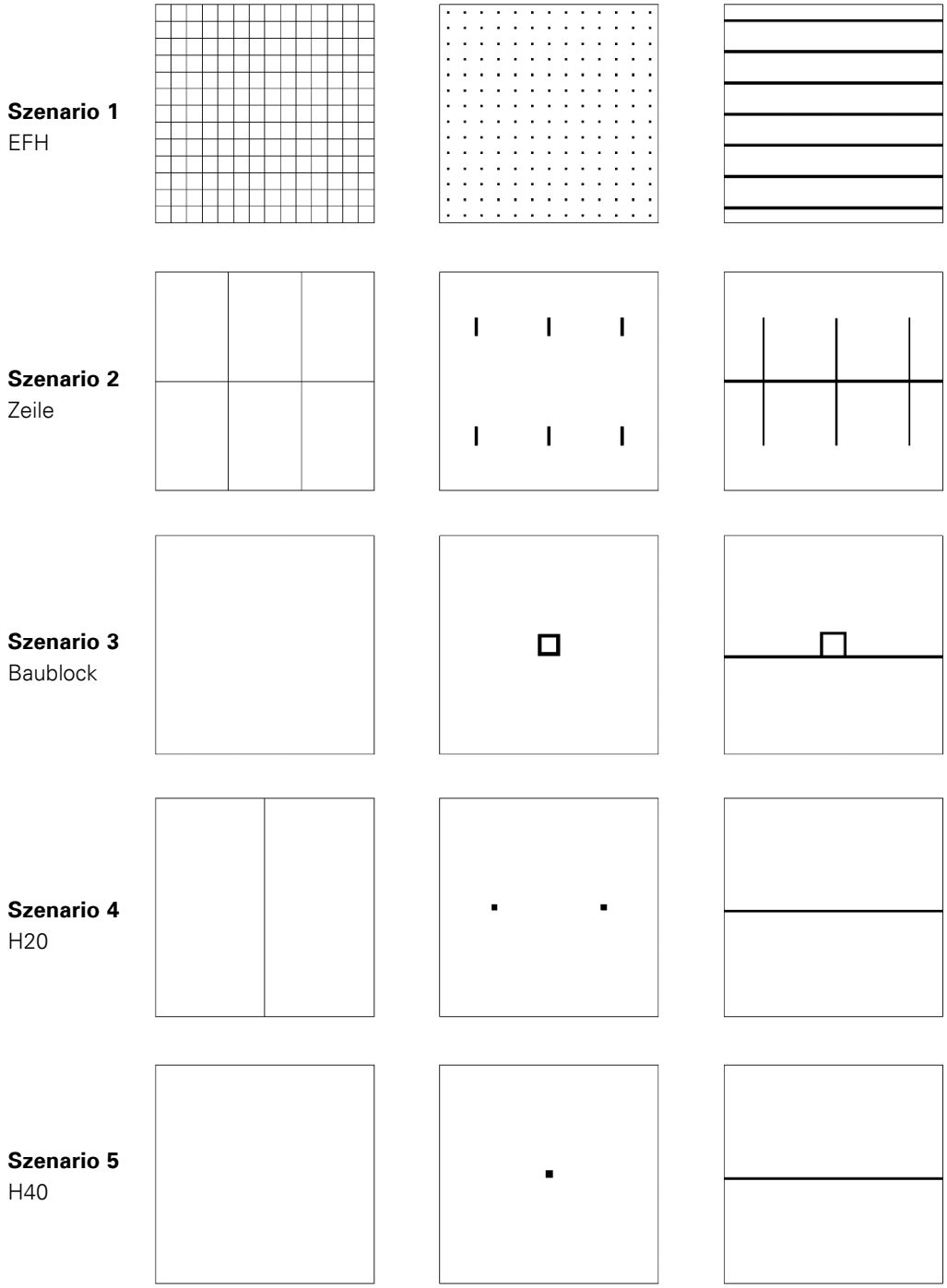


Abbildung 35: Übersicht der fünf unterschiedlichen Bebauungsarten für eine Dichte von ±400 EW/km²: links: Rastereinteilung, Mitte: Schwarzplan, rechts: Erschließungsplan, alle Zeichnungen maßstabslos, genordet

4.2.1 Szenario 1: Dichte 400 - Bebauungsstruktur EFH

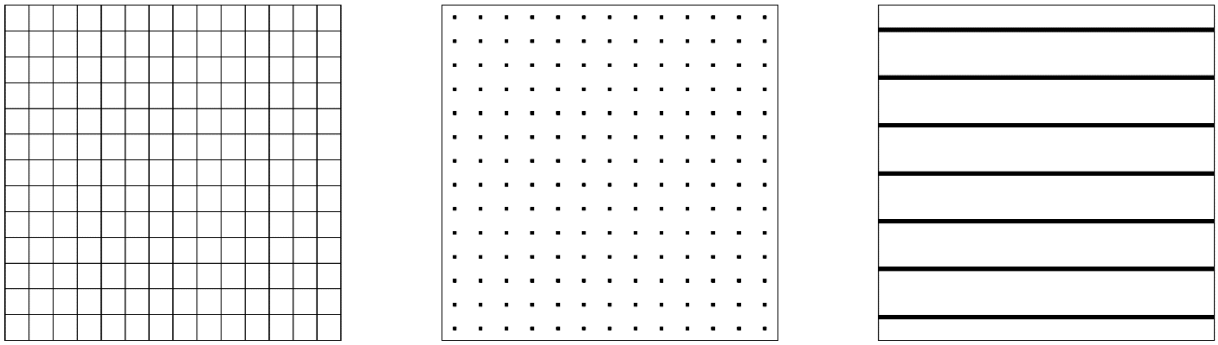


Abbildung 36: Szenario 1: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

Für die erforderliche Dichte von 400 EW/km² bzw. 400,4 EW/km² werden 182 EFH mit je einer Wohneinheit und 2,2 Bewohnern benötigt. Um diese Baukörperanzahl zu erreichen, wird eine Rasterunterteilung für eine einheitliche EFH-Bebauung von 13 x 14 (Abbildung 36 links) gewählt. Durch die zentrische Platzierung der Baukörper in jedem Rasterfeld entsteht die in Abbildung 36, Mitte wiedergegebene Anordnung.

Zur Erschließung jedes Baukörpers werden insgesamt 7.000 m Wohnstraßen als sieben Ost-West verlaufende Haupterschließungsachsen platziert, die zu beiden Straßenseiten EFH erschließen. Die Querschnittsbreite dieser Straßentypologie ist entsprechend 3.4.3 10,0 m.

Als Grundlagen für die Massenberechnung dienen für die Straßentypologie Wohnstraße 1,07 t/m² (Auflistung der Werte siehe Tabelle 27) und für das Gewicht eines EFH die Angaben aus Tabelle 20.

Aus Tabelle 29 kann die Massen- und Flächenaufstellung dieses Szenarios abgelesen werden. Es wird deutlich, dass in diesem Fall die Baukörper nur 38,9 % der Gesamtmasse und 14,6 % der überbauten Fläche ausmachen. Die Verkehrsfläche beansprucht dementsprechend einen deutlich höheren Flächen- und Ressourcenanteil. Insgesamt sind in diesem Szenario 8,2 % des betrachteten Quadratkilometers bebaut.

Tabelle 29: Massen- und Flächenaufstellung der EFH-Bebauung bei einer urbanen Dichte von 400,4 EW/m²:gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	70.000,00 m²	74.900,00 t	11.921,00 m²	47.684,00 t	**81.921,00 m²**	**122.584,00 t**
Pro EW	174,83 m²	187,06 t	29,77 m²	119,09 t	**204,60 m²**	**306,15 t**
Pro WE	384,62 m²	411,54 t	65,50 m²	262,00 t	**450,12 m²**	**673,54 t**

4.2.2 Szenario 2: Dichte 400 - Bebauungsstruktur Zeile

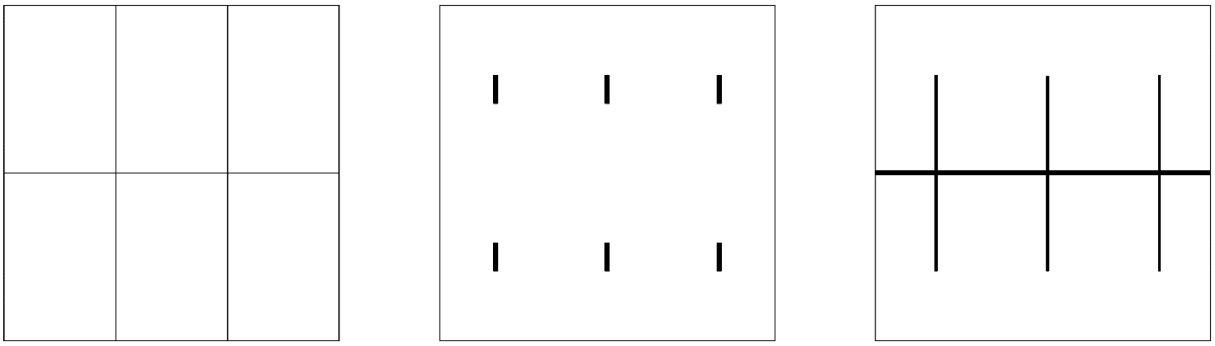


Abbildung 37: Szenario 2: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

Um eine Dichte von 400 EW/km² bzw. hier 422,4 EW/km² zu erreichen, werden sechs Zeilen mit je 32 Wohneinheiten und 70,4 Bewohnern auf dem Untersuchungsfeld angeordnet. Wie oben beschrieben, wird für diese längliche Baukörpertypologie ein rechteckiges Raster von 3 x 2 angestrebt. Die Längsseite der Zeilen wird zur besseren Nutzbarkeit der Grundrisse Richtung Ost-West orientiert und von dort erschlossen. Die Haupterschließung des Untersuchungsfeldes wird durch eine quer verlaufende Wohnstraße erreicht, die Erschließung der einzelnen Zeilen von der Haupterschließungsachse aus erfolgt über verkehrsberuhigte Wohnwege mit einer Querschnittsbreite von 6,0 m.

Als Grundlagen für die Massenberechnung dienen für die Straßentypologie Wohnstraße 1,07 t/m² bzw. 0,86 t/m² für Wohnwege (Werte siehe Tabelle 27) und für das Gewicht eines Zeilenbaukörpers die Angaben aus Tabelle 21.

Tabelle 30 fasst die errechneten, aufzuwendenden Massen und Flächen für Szenario 2 zusammen. Im Gegensatz zu der EFH-Bebauung überwiegt hier die Masse der Baukörper mit 65,0 %. Die durch Baukörper überbaute Fläche liegt jedoch nur bei 23,0 %. Bezogen auf die Gesamtfläche (1 km²) werden 2,6 % bebaut.

Tabelle 30: Massen- und Flächenaufstellung der Zeilenbebauung bei einer urbanen Dichte von 422,4 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	20.287,00 m²	19.546,82 t	6.048,00 m²	36.288,00 t	**26.335,00 m²**	**55.834,82 t**
Pro EW	48,03 m²	46,28 t	14,32 m²	85,91 t	**62,35 m²**	**132,18 t**
Pro WE	105,66 m²	101,81 t	31,50 m²	189,00 t	**137,16 m²**	**290,81 t**

4.2.3 Szenario 3: Dichte 400 - Bebauungsstruktur Baublock

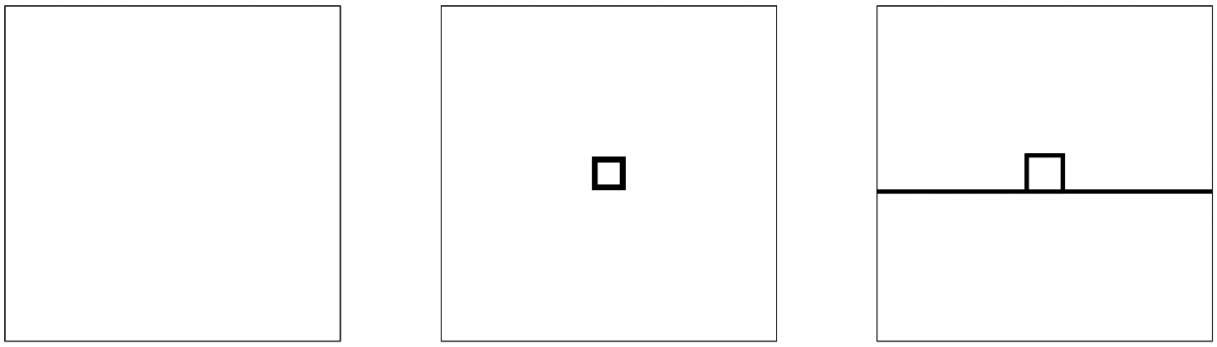


Abbildung 38: Szenario 3: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

Da ein Baublock in vorliegenden Dimensionen bereits von 475,2 Einwohnern bewohnt wird, ist ein Baukörper für dieses Szenario ausreichend. Dieser wird mittig auf dem Untersuchungsfeld platziert und von einer Wohnstraße allseitig erschlossen. Wie Abbildung 38 rechts zeigt, führt die Wohnstraße einmal um den Baukörper herum, um allen Seiten einen gleichwertigen Zugang zu ermöglichen. Die Straße erreicht damit eine Gesamtlänge von 1.310,40 m bei einer Breite von 10,0 m.

Als Grundlagen für die Massenberechnung dienen für die Straßentypologie Wohnstraße 1,07 t/m² (Werte siehe Tabelle 27) und für das Gewicht eines Baublocks die Angaben aus Tabelle 22.

Aus der Massen- und Flächenaufstellung für dieses Szenario in Tabelle 31 lässt sich ableiten, dass dieser einzelne Baukörper 72,1 % der Gesamtmasse ausmacht, hingegen nur 26,2 % des Flächenverbrauchs.

Im Flächenverbrauch nicht einkalkuliert ist der 4.733,44 m² große, nicht überbaute Innenhof, dessen Fläche jedoch nicht öffentlich nutzbar ist. Insgesamt sind durch den Block mit Straßenfläche nur 1,8 % des Untersuchungsfeldes überbaut.

Tabelle 31: Massen- und Flächenaufstellung der Blockbebauung bei einer urbanen Dichte von 475,2 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	13.104,00 m²	14.021,28 t	4.644,00 m²	36.223,20 t	**17.748,00 m²**	**50.244,48 t**
Pro EW	27,58 m²	29,51 t	9,77 m²	76,23 t	**37,35 m²**	**105,73 t**
Pro WE	60,67 m²	64,91 t	21,50 m²	167,70 t	**82,17 m²**	**232,61 t**

4.2.4 Szenario 4: Dichte 400 - Bebauungsstruktur Hochhaus 20

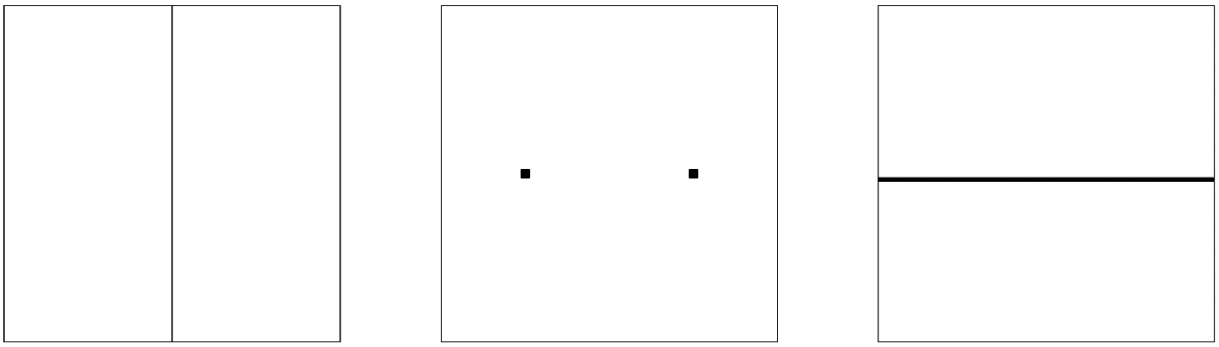


Abbildung 39: Szenario 4: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

Da ein 20-geschossiges Hochhaus der vorliegenden Untersuchung insgesamt von 176 Menschen in 80 Wohneinheiten bewohnt wird, sind zwei Baukörper notwendig, um die vorgegebene Dichte um nur maximal 50 Einwohner zu unterschreiten. Mit zwei Baukörpern wird folglich eine Dichte von 352 EW/km² erreicht. Abbildung 39 links zeigt die Einteilung der Fläche in zwei Hälften, wobei ein Baukörper in jeweils eine Hälfte gesetzt wird. Für eine einseitige Erschließung nach den Entwurfskriterien aus Kapitel 4.1 wird eine durchgehende Wohnstraße entlang der Ost-West-Achse an den beiden Baukörpern vorbeigeführt. Die Straßenlänge beträgt 1.000 m bei 10,0 m Breite.

Auf Basis der in Kapitel 3 ermittelten Massenangaben für Straßen und Gebäude kann die Aufstellung der Flächen- und Massenangaben erfolgen.

Die nachfolgende Tabelle 32 bietet einen Überblick über die aufzuwendenden Flächen und Massen. Der Baukörper des Hochhauses zeigt sich für 76,7 % des Massenverbrauchs, aber nur 10,5 % des Flächenverbrauchs verantwortlich. Gebäude und Erschließungsstraße benötigen in Szenario 4 1,1 % der zur Verfügung stehenden Fläche von 1 km².

Tabelle 32: Massen- und Flächenaufstellung der 20-geschossigen Hochhausbebauung bei einer urbanen Dichte von 352 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	10.000,00 m²	10.700,00 t	1.176,00 m²	35.280,00 t	**11.176,00 m²**	**45.980,00 t**
Pro EW	28,41 m²	30,40 t	3,34 m²	100,23 t	**31,75 m²**	**130,63 t**
Pro WE	62,50 m²	66,88 t	7,35 m²	220,50 t	**69,85 m²**	**287,38 t**

4.2.5 Szenario 5: Dichte 400 - Bebauungsstruktur Hochhaus 40

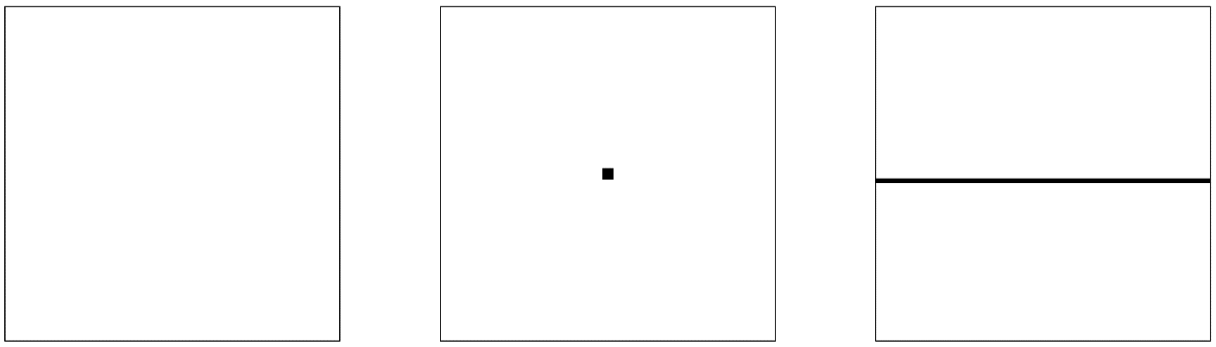


Abbildung 40: Szenario 5: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

Wie in Szenario 3 ist auch für Szenario 5 nur ein einziger Baukörper ausreichend. Mit der Platzierung eines 40-geschossigen Hochhauses wird eine Dichte von 528 erreicht. Diese Bewohneranzahl liegt bereits deutlich über der angesetzten Dichte von 400 EW/km². Auch dieser Baukörper wird zentrisch auf das Gebiet gesetzt und einseitig von einer Wohnstraße erschlossen. Diese erreicht 1.000 m Länge bei einer Querschnittsbreite von 10,0 m.
Sämtliche weiteren Annahmen für Szenario 5 werden den vorangegangenen Massen- und Flächenermittlungen aus Kapitel 3 entnommen. In Tabelle 33 sind die wesentlichen Kennzahlen zum Massen- und Flächenverbrauch aufgelistet. Der einzelne Baukörper des H40 hat Anteile an der Gesamtmasse von 87,0 % und am Flächenverbrauch von nur 8,6 %. Insgesamt wird für Szenario 5, wie bei Szenario 4, 1,1 % des Quadratkilometers bebaut. Die Werte beider Szenarien differieren um nur 0,03 Prozentpunkte.

Tabelle 33: Massen- und Flächenaufstellung der 40-gedschossigen Hochhausbebauung bei einer urbanen Dichte von 528 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	10.000,00 m²	10.700,00 t	0.942,00 m²	71.592,00 t	**10.942,00 m²**	**82.292,00 t**
Pro EW	18,94 m²	20,27 t	1,78 m²	135,59 t	**20,72 m²**	**155,86 t**
Pro WE	41,67 m²	44,58 t	3,93 m²	298,30 t	**45,59 m²**	**342,88 t**

4.3 Ressourcenermittlung Dichte 4.000

Die zweite zu untersuchende Dichte der urbanen Struktur entspricht einer Einwohneranzahl von 4.000 pro km². Im Folgenden werden wiederum fünf Untersuchungsszenarien gebildet, die durch eine sortenreine Anordnung von EFH-, Zeilen-, Blockrand- und Hochhausbebauung diese oder eine vergleichbare Dichte erreichen. Die Baukörperanzahlen aus Tabelle 28 werden entsprechend dem jeweils definierten Raster auf dem Quadratkilometer angeordnet, eine verkehrstechnische Erschließung entlang der Achsen wird festgelegt. Abbildung 41 stellt die Szenarien 6-10 zusammengefasst in einer Übersicht dar.

Für diese Dichte werden Sammelstraßen (Bk_{sa}) mit einer Querschnittsbreite von 12,5 m für die Ost-West verlaufenden Haupterschließungsachsen angesetzt. Nebenstraßen werden als Wohnwege (Bk_{sa}) oder -straßen (Bk_{sa}) ausgeführt mit 6,0 bzw. 10,0 m Breite.

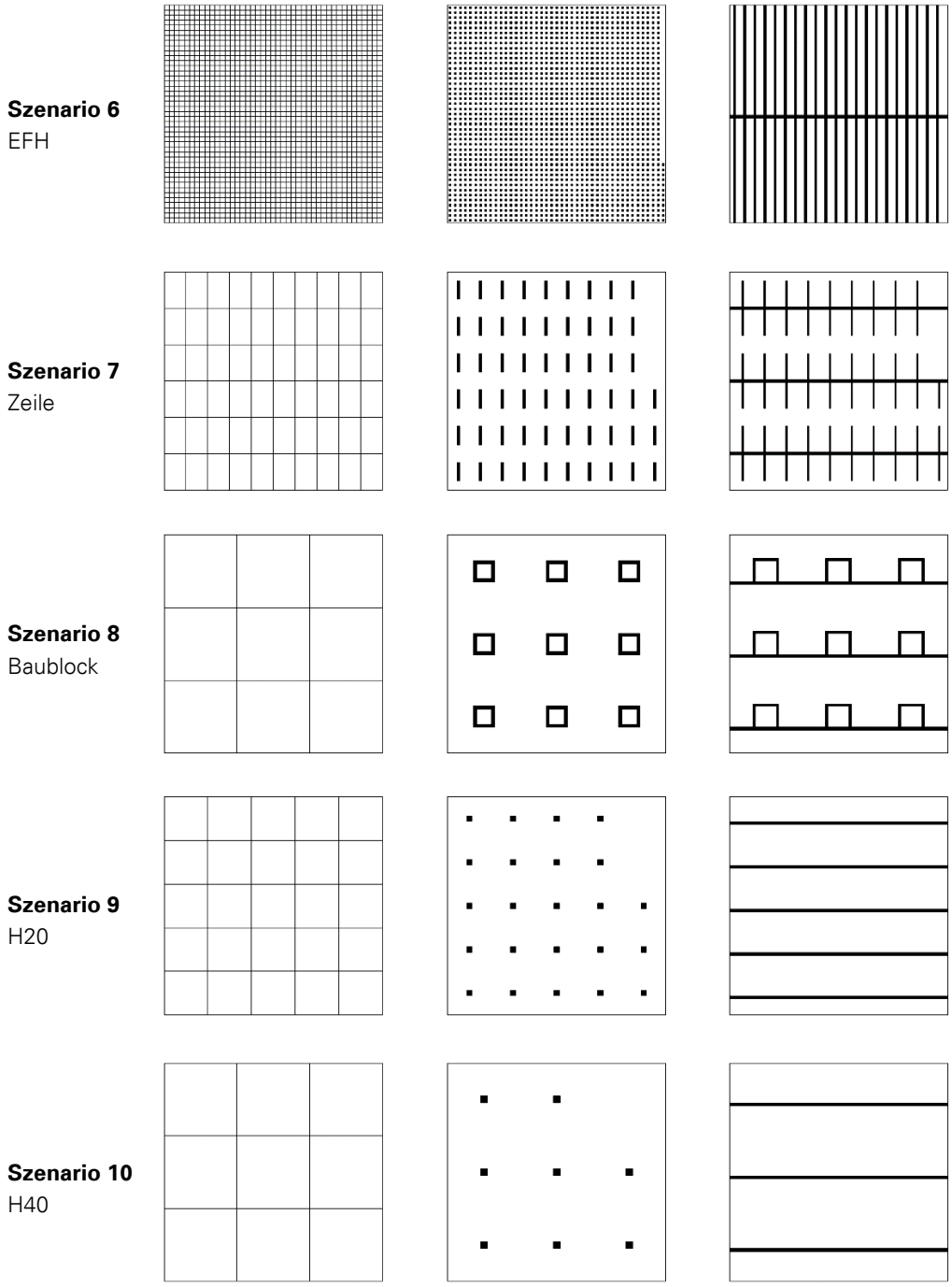


Abbildung 41: Übersicht der fünf unterschiedlichen Bebauungsarten für eine Dichte von ±4.000 EW/km²: links: Rastereinteilung, Mitte: Schwarzplan, rechts: Erschließungsplan, alle Zeichnungen maßstabslos, genordet

4.3.1 Szenario 6: Dichte 4.000 - Bebauungsstruktur EFH

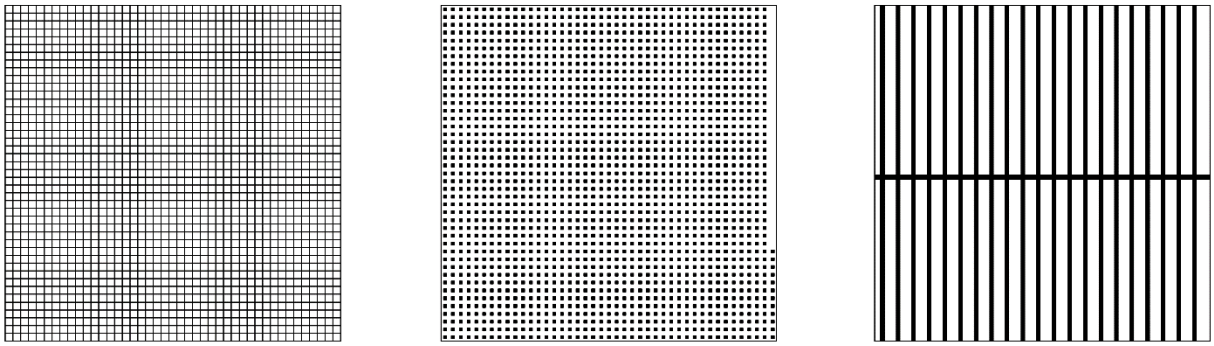


Abbildung 42: Szenario 6: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

Um mit einer Einfamilienhausbebauung der oben festgelegten Rahmenbedingungen eine Dichte von 4.000 bzw. hier 3.999,6 EW/km² zu erreichen, werden 1.818 Baukörper mit je einer WE benötigt. Mit Hilfe eines quadratischen Rasters von 43 x 43 entstehen 1.849 einzelne Parzellen, auf denen zentrisch jeweils ein EFH platziert werden kann. Durch das Entfernen von 31 randgelegenen Baukörpern kann die erforderliche Anzahl von 1.818 erreicht werden. Abbildung 42 zeigt die Einteilung des Rasters sowie die darin platzierten Baukörper. Zur Erschließung dient eine 1.000 m lange Sammelstraße entlang der Hauptrichtung Ost-West. Davon ausgehend erstrecken sich zu beiden Seiten je 21 Wohnstraßen mit einer Gesamtlänge von 20.737,5 m. Vergleichbar zu den Szenarien 1-5 werden auch hierfür die in Kapitel 3 ermittelten Massenangaben angewandt. Wohnstraßen benötigen demnach 1,07 t/m² und Sammelstraßen 1,08 t/m². Darauf aufbauend kann die Massen- und Flächenermittlung erfolgen, deren Ergebnisse in Tabelle 34 zusammengefasst sind.

Aus den Aufstellungen für Szenario 6 geht hervor, dass die Baukörper einen Anteil von 66,9 % an der Gesamtmasse und 35,1 % der verbrauchten Fläche innehaben. Der Einfluss der Verkehrsfläche ist damit gegenüber Szenario 1 zurückgegangen. Insgesamt beläuft sich die bebaute Fläche auf 33,9 % der Gesamtfläche von 1 km².

Tabelle 34: Massen- und Flächenaufstellung der EFH-Bebauung bei einer urbanen Dichte von 3.999,6 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	219.875,00 m²	235.391,25 t	119.079,00 m²	476.316,00 t	**338.954,00 m²**	**711.707,25 t**
Pro EW	54,97 m²	58,85 t	29,77 m²	119,09 t	**84,75 m²**	**177,94 t**
Pro WE	120,94 m²	129,48 t	65,50 m²	262,00 t	**186,44 m²**	**391,48 t**

4.3.2 Szenario 7: Dichte 4.000 - Bebauungsstruktur Zeile

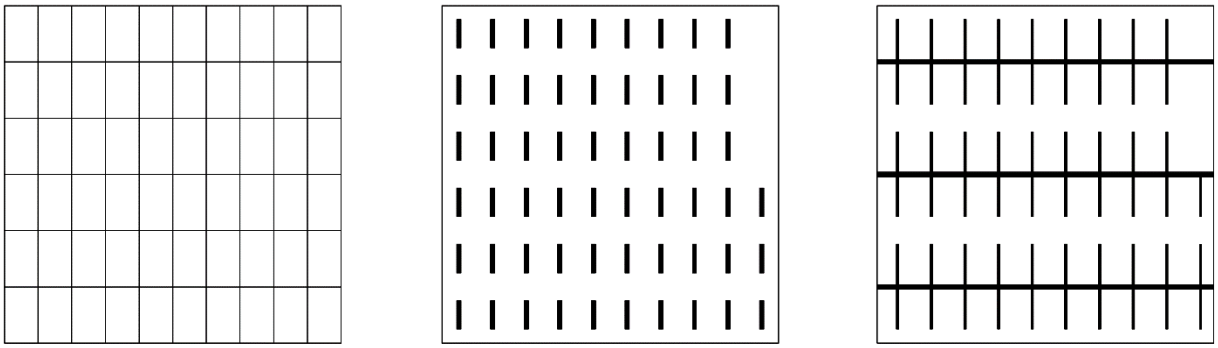


Abbildung 43: Szenario 7: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

57 Zeilen mit je 70,4 Einwohnern in insgesamt 1.840 Wohneinheiten ermöglichen eine Dichte von 4.048 EW/km². Wie in Szenario 2 wird auch hier jeder Baukörper der Zeilenbebauung über die Ostseite via Wohnwege erschlossen. Durch ein Raster von 10 x 6 entstehen 60 identische Felder, auf denen die Baukörper zentrisch platziert werden können. Nach Entfernen von drei am östlichen Rand gelegenen Baukörpern wird die geforderte Dichte erreicht. Die Festlegung des Straßenverlaufs erfolgt gemäß den in Kapitel 4.1 eingeführten Entwurfsparametern. Daraus resultierend werden 3.000 m Sammelstraßen entlang der Haupterschließungsachsen platziert und beidseitig davon abgehend 57 jeweils 119,65 m lange Wohnwege zur Erschließung der Zeilenbauten positioniert. Aufgrund der festgelegten maximalen Distanz von 30 m zwischen Straße und Gebäude ist eine geteilte Erschließung ausgeschlossen.

Abbildung 43 stellt die Einteilung des Rasters sowie die Verteilung von Gebäuden und Straßen für dieses Szenario schematisch dar. Zur Flächen- und Massenermittlung aus Tabelle 35 werden die in Kapitel 3 ermittelten Daten angewandt. In diesem Szenario haben die Zeilenbaukörper einen Anteil an der Gesamtmasse von 82,0 %, bei einem Anteil an der bebauten Fläche von 42,3 %. Insgesamt werden 13,6 % des untersuchten Quadratkilometers durch Gebäude und Straßen versiegelt.

Tabelle 35: Massen- und Flächenaufstellung der Zeilenbebauung bei einer urbanen Dichte von 4.048 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	78.420,30 m²	75.691,46 t	57.456,00 m²	344.736,00 t	**135.876,30 m²**	**420.427,46 t**
Pro EW	19,54 m²	18,86 t	14,32 m²	85,91 t	**33,86 m²**	**104,77 t**
Pro WE	42,99 m²	41,50 t	31,50 m²	189,00 t	**74,49 m²**	**230,50 t**

4.3.3 Szenario 8: Dichte 4.000 - Bebauungsstruktur Baublock

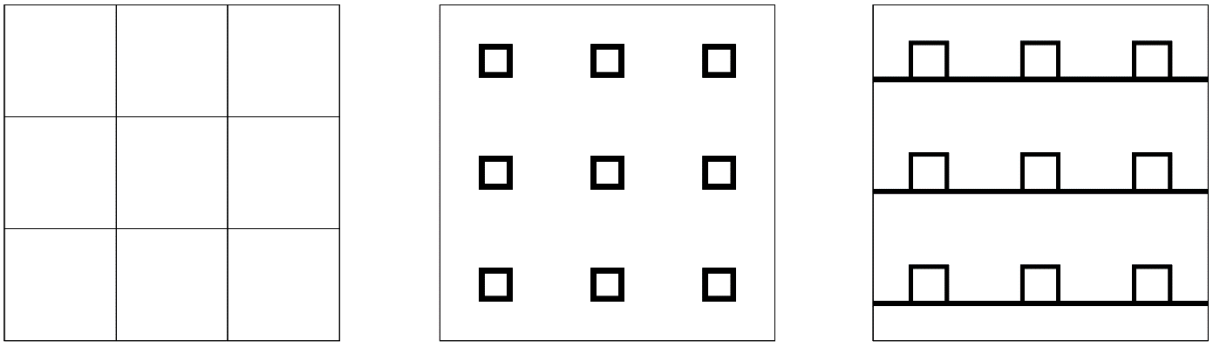


Abbildung 44: Szenario 8: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

Für das Erreichen dieser Dichte sind in Szenario 8 mindestens neun Baublöcke mit je 475,2 Einwohnern notwendig. Dies entspricht in Summe 4.276,8 EW/km². Um neun Felder zu erreichen, wird das Untersuchungsfeld in ein quadratisches Raster von 3 x 3 unterteilt. Die Baublöcke werden mittig in den Feldern platziert, eine allseitige Erschließung wird festgelegt. In Abbildung 44 sind Raster, Baukörper und Erschließungswege maßstabslos dargestellt.

Drei Sammelstraßen mit einer Gesamtlänge von 3.000 m und einer Breite von 12,5 m ergeben die Haupterschließungsachsen, von denen ausgehend jeweils eine Wohnstraße direkt angrenzend um den Baublock herumführt. Die Länge aller Wohnstraßen entspricht insgesamt 2.793,6 m bei 10,0 m Breite.

Wie bei den vorangegangenen Szenarien werden auch bei Szenario 8 für die zusammenfassenden Kalkulationen die in Kapitel 3 ermittelten Massenangaben für Gebäude und Straßen angewandt. Darauf aufbauend erfolgt die Massen- und Flächenermittlung für Szenario 8, deren Ergebnisse in Tabelle 36 zusammengefasst sind.

Die neun Baukörper beanspruchen 82,2 % der gesamten Masse und 39,0 % der bebauten Fläche – unberücksichtigt bleiben auch hier die neun Innenhöfe. Die bebaute Fläche hat einen Anteil von 10,7 % an der Gesamtfläche (1 km²) des Untersuchungsfeldes.

Tabelle 36: Massen- und Flächenaufstellung der Blockrandbebauung bei einer urbanen Dichte von 4.276,8 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	65.436,00 m²	70.391,52 t	41.796,00 m²	326.008,80 t	**107.232,00 m²**	**396.400,32 t**
Pro EW	15,30 m²	16,46 t	9,77 m²	76,23 t	**25,07 m²**	**92,69 t**
Pro WE	33,66 m²	36,21 t	21,50 m²	167,70 t	**55,16 m²**	**203,91 t**

4.3.4 Szenario 9: Dichte 4.000 - Bebauungsstruktur Hochhaus 20

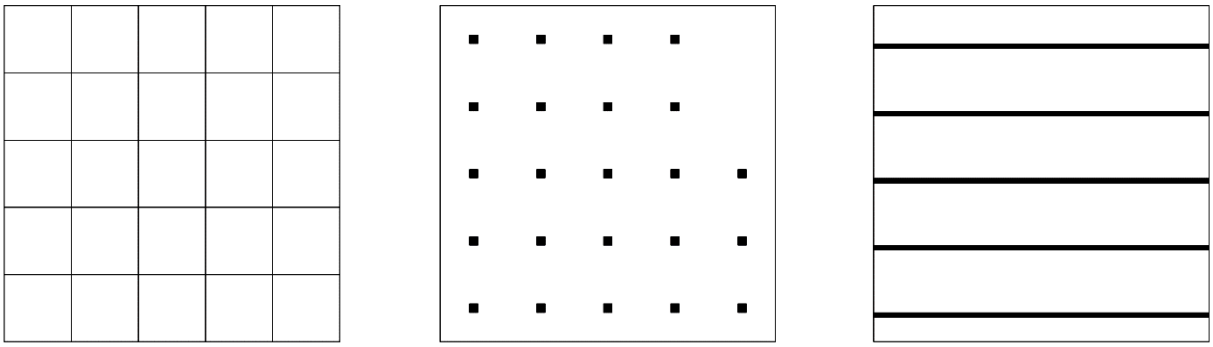


Abbildung 45: Szenario 9: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

Die Hochhausbebauung des Szenarios 9 mit 20-geschossigen Hochhäusern und je 176 Einwohnern erfordert 23 Baukörper, um eine Dichte von 4.048 EW/km² zu erhalten. Bei einer quadratischen Einteilung des Untersuchungsfeldes in ein Raster von 5 x 5, wird diese Baukörperanzahl überschritten. Durch Entfernen zweier randgelegener Baukörper kann wiederum die korrekte Anzahl eingehalten werden. Abbildung 45 zeigt die Verteilung der Gebäude und Straßen.

Die Erschließung der 23 Hochhäuser gemäß der in Kapitel 4.1 festgelegten Bedingungen erfolgt über fünf Sammelstraßen, die jeweils über die gesamte Länge und damit insgesamt über 5.000 m verlaufen. Da der Abstand zwischen Gebäude und Straße den vorgegebenen Maximalabstand von 30 m deutlich überschreiten würde, ist hier eine beidseitige Erschließung nicht möglich.

Die Angaben zum Flächen- und Massenverbrauch des Szenarios 9 sind in Tabelle 37 zusammengefasst. Die 23 Hochhäuser haben Anteile an der Gesamtmasse von 85,7 % und am Flächenverbrauch von 17,8 %. Insgesamt werden für dieses Szenario 7,6 % der Gesamtfläche bebaut.

Tabelle 37: Massen- und Flächenaufstellung der 20-geschossigen Hochhausbebauung bei einer urbanen Dichte von 4.048 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	62.500,00 m²	67.500,00 t	13.524,00 m²	405.720,00 t	**76.024,00 m²**	**473.220,00 t**
Pro EW	15,44 m²	16,67 t	3,34 m²	100,23 t	**18,78 m²**	**116,90 t**
Pro WE	33,97 m²	36,68 t	7,35 m²	220,50 t	**41,32 m²**	**257,18 t**

4.3.5 Szenario 10: Dichte 4.000 - Bebauungsstruktur Hochhaus 40

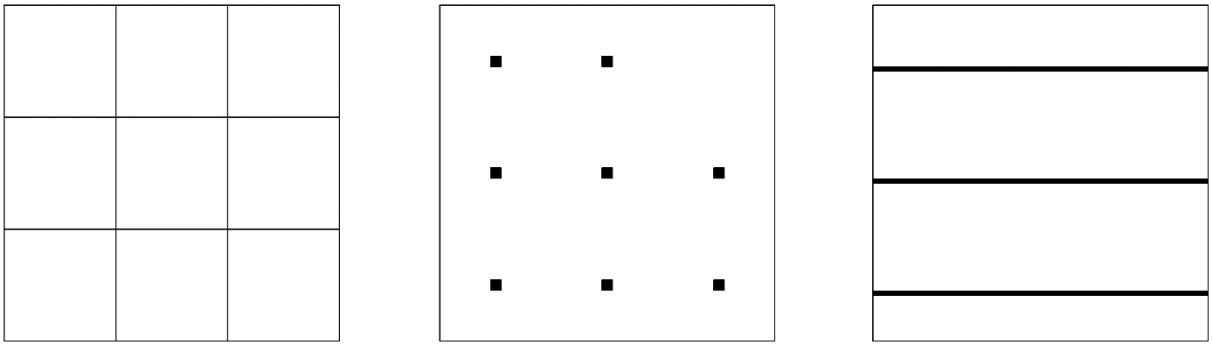


Abbildung 46: Szenario 10: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

Acht 40-geschossige Hochhäuser erreichen eine Dichte von 4.224 EW/km². Wie aus Abbildung 46 ersichtlich, wird wie in Szenario 8 ein Raster von 3 x 3 gebildet, woraus neun quadratische Felder resultieren. Nach Entfernen eines randgelegenen Baukörpers verbleiben acht Felder, die jeweils mittig mit einem Hochhaus versehen werden können.

Zur Erschließung dienen drei durchgehende Sammelstraßen mit einer Gesamtlänge von 3.000 m, die jeweils von der Südseite ausgehend die Gebäude zugänglich machen. Wie schon bei Szenario 9, sind die Distanzen zwischen Straße und Gebäude zu groß, als dass eine Straße zu beiden Seiten Hochhäuser erschließen könnte. Aufbauend auf den kalkulierten Straßen- und Baukörperdaten können nun für Szenario 10 die entsprechenden Werte ermittelt werden. Diese sind in Tabelle 38 zusammengefasst.

In Szenario 10 haben die Baukörper einen Anteil an der Gesamtmasse von 93,4 %, bei einem Anteil an der bebauten Fläche von nur 16,7 %. Auf das gesamte Gebiet bezogen werden 4,5 % durch Gebäude und Straßen versiegelt.

Tabelle 38: Massen- und Flächenaufstellung der 40-geschossigen Hochhausbebauung bei einer urbanen Dichte von 4.224 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	37.500,00 m²	40.500,00 t	7.536,00 m²	572.736,00 t	**45.036,00 m²**	**613.236,00 t**
Pro EW	8,88 m²	9,59 t	1,78 m²	135,59 t	**10,66 m²**	**145,18 t**
Pro WE	19,53 m²	21,09 t	3,93 m²	298,30 t	**23,46 m²**	**319,39 t**

4.4 Ressourcenermittlung Dichte 20.000

Die dritte und letzte zu untersuchende Dichte des Betrachtungsrahmens ist eine Einwohneranzahl von 20.000. Im Folgenden werden erneut fünf Untersuchungsszenarien gebildet, die durch eine sortenreine Anordnung von EFH-, Zeilen-, Block- und Hochhausbebauung diese oder eine nahegelegene Dichte erreichen. Die Baukörperanzahlen aus Tabelle 28 werden entsprechend dem jeweils definierten Raster auf dem Grundstück angeordnet und eine verkehrstechnische Erschließung wird entlang der Achsen festgelegt. Für diese Dichte werden für die West-Ost verlaufenden Haupterschließungsachsen Quartiersstraßen mit einer Querschnittsbreite von 16,0 m angesetzt. Nord-Süd verlaufende Nebenstraßen werden als Wohnwege, -straßen oder Sammelstraßen mit 6,0 m, 10,0 m oder 12,5 m ausgeführt. Die daraus entstehenden Szenarien 11-15 sind in Abbildung 47 dargestellt.

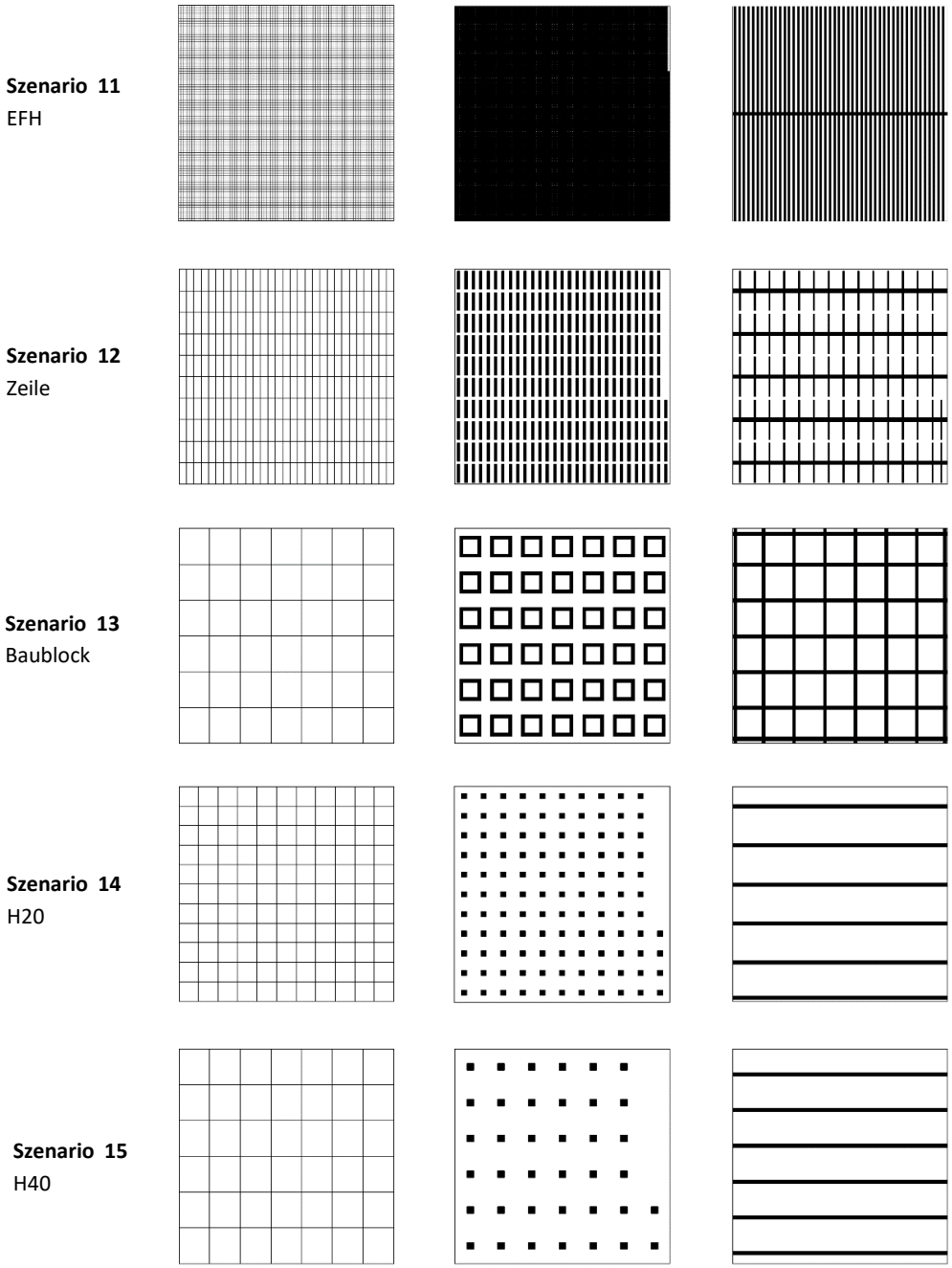


Abbildung 47: Übersicht der fünf unterschiedlichen Bebauungsarten für eine Dichte von ±20.000 EW/km², links: Rastereinteilung, Mitte: Schwarzplan, rechts: Erschließungsplan, Zeichnungen maßstabslos, genordet

4.4.1 Szenario 11: Dichte 20.000 - Bebauungsstruktur EFH

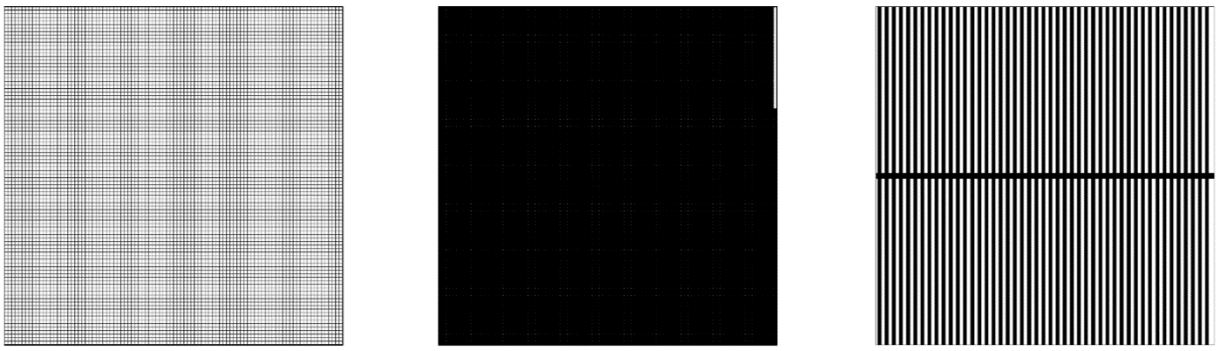


Abbildung 48: Szenario 11: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

Eine Dichte von 20.000 EW/km² kann unter den gegebenen Umständen mit einer EFH-Bebauungsstruktur nur theoretisch erreicht werden. Für diese urbane Dichte werden 9.091 Gebäude benötigt. Zur Platzierung der EFH wird ein Raster von 95 x 96, wie in Abbildung 48 links ersichtlich, festgelegt. Daraus ergeben sich 9.120 Parzellen. Nach Abzug von 29 am östlichen Rand gelegenen EFH wird die geforderte Anzahl erreicht. Da sich die Abstände zwischen den Baukörpern auf nur 2,32 m bzw. 2,43 m belaufen, ist die Erschließung der Gebäude auf der zur Verfügung stehenden Fläche nicht möglich. Da es sich hier jedoch um eine phänomenologische Untersuchung handelt, werden die Straßenflächen ungeachtet der begrenzten Fläche gemäß den Vorgaben in Kapitel 4.1 festgelegt. Daraus ergibt sich eine durchlaufende Quartiersstraße, die mit 16,0 m Breite die Haupterschließungsstraße bildet. Zu beiden Seiten dieser Quartiersstraße erschließen 10,0 m breite Wohnstraßen wiederum jeweils beidseitig auf 492 m 94 EFH. Die Gesamtlänge der Wohnstraßen beläuft sich damit auf 46.248 m.

In Abbildung 48 ist die Rasterbildung sowie die Bebauung durch EFH und Straßen schematisch dargestellt. Besonders markant ist hierbei die sehr dichte EFH-Bebauung, die in dieser verkleinerten Darstellung keine Baulücken erkennen lässt.

Wie in den bisherigen Szenarien wird auch hierfür auf Basis der Werte aus Kapitel 3 eine Flächen- und Massenverbrauchsermittlung vollzogen, deren Ergebnisse in Tabelle 39 zusammengefasst sind. Die Masse der Baukörper hat einen Anteil von 82,3 % an der Gesamtmasse, die EFH beanspruchen 55,4 % der bebauten Fläche. Insgesamt werden, wie oben angedeutet, theoretisch 107,4 % des Betrachtungsfeldes bebaut.

Tabelle 39: Massen- und Flächenaufstellung der EFH-Bebauung bei einer urbanen Dichte von 20.000,2 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	478.480,00 m²	512.293,60 t	595.460,50 m²	2.381.842,00 t	**1.073.940,50 m²**	**2.894.135,60 t**
Pro EW	23,92 m²	25,61 t	29,77 m²	119,09 t	**53,70 m²**	**144,71 t**
Pro WE	52,63 m²	56,35 t	65,50 m²	262,00 t	**118,13 m²**	**318,35 t**

4.4.2 Szenario 12: Dichte 20.000 - Bebauungsstruktur Zeile

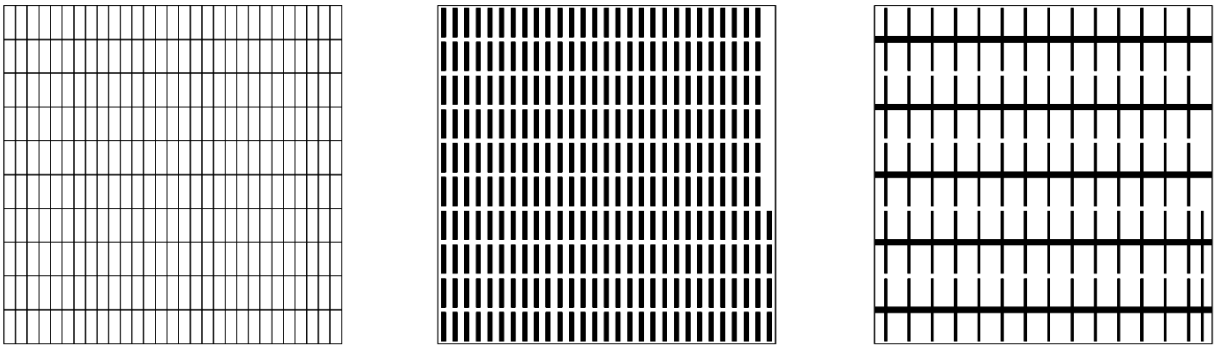


Abbildung 49: Szenario 12: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

In der vorliegenden Untersuchung bilden 284 Zeilenbauten eine urbane Dichte von 19.993,6 EW/km². Durch ein Raster von 29 x 10 werden 290 Rechteckflächen gebildet, die jeweils mittig mit einem Baukörper versehen werden können. Durch Entfernen von sechs am Rand gelegenen Baukörpern wird schließlich die geforderte Anzahl von 284 erreicht.

Wie in Abbildung 49 rechts erkennbar, bilden fünf durchgehende Quartiersstraßen die Haupterschließungsachsen dieses Szenarios. Beidseitig davon abzweigend verlaufen insgesamt 144 Wohnwege, die die einzelnen Zeilen erschließen. Sie erstrecken sich über eine Gesamtlänge von 12.074,4 m.

Zur Flächen- und Massenermittlung in Tabelle 40 werden die in Kapitel 3 ermittelten Daten angewandt. Hier haben die Baukörper einen Anteil an der Gesamtmasse von 92,0 %, bei einem Anteil an der bebauten Fläche von 65,3 %. Insgesamt werden 43,9 % des betrachteten Quadratkilometers durch Gebäude und Straßen versiegelt.

Tabelle 40: Massen- und Flächenaufstellung der Zeilenbebauung bei einer urbanen Dichte von 19.993,6 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	152.446,40 m²	149.503,90 t	286.272,00 m²	1.717.632,00 t	**438.718,40 m²**	**1.867.135,90 t**
Pro EW	7,62 m²	7,48 t	14,32 m²	85,91 t	**21,94 m²**	**93,39 t**
Pro WE	16,77 m²	16,45 t	31,50 m²	189,00 t	**48,27 m²**	**205,45 t**

4.4.3 Szenario 13: Dichte 20.000 - Bebauungsstruktur Baublock

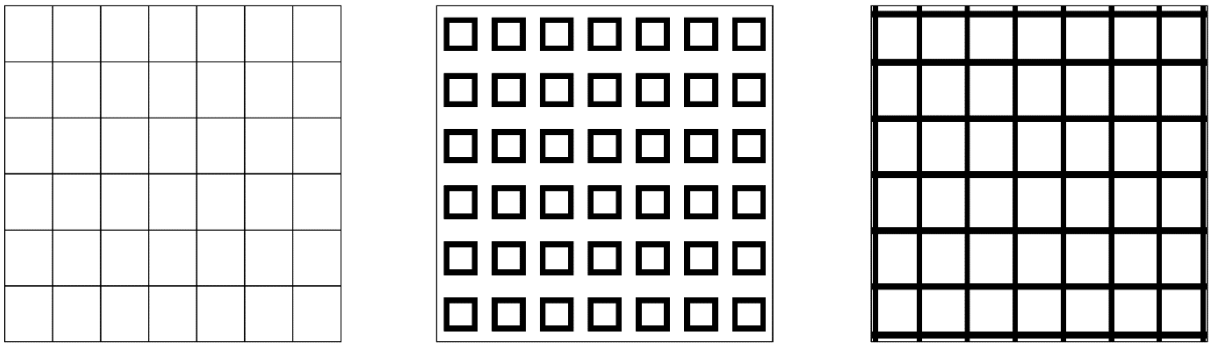


Abbildung 50: Szenario 13: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

42 Baublöcke ermöglichen eine Dichte von 19.958,4 EW/km² in insgesamt 9.072 Wohneinheiten. Durch die Festlegung des Rasters auf 6 x 7 entstehen 42 identische Felder, worin zentrisch jeweils ein Baublock positioniert wird. Abbildung 50 zeigt die regelmäßige Verteilung der Baublöcke über die gesamte Fläche. Die Erschließung erfolgt wie in den Szenarien 3 und 8 allseitig. Der Unterschied zu diesem Szenario besteht allerdings darin, dass die Straßen aufgrund der geringeren Abstände (<30 m) zueinander die Baublöcke zu beiden Seiten erschließen können. Daraus ergeben sich sieben in Hauptrichtung verlaufende Quartiersstraßen mit einer Gesamtlänge von 7.000 m und 16,0 m Querschnittsbreite. Orthogonal dazu verlaufen acht Sammelstraßen, die die Ost- und Westseiten der Baublöcke erschließen und eine Gesamtlänge von 7.104 m erreichen.

Sämtliche Werte basieren auf den in Kapitel 3 ermittelten Zahlen und sind in Tabelle 41 zusammengefasst. Daraus wird ersichtlich, dass die Baukörper 87,5 % der Gesamtmasse und knapp die Hälfte (49,3 %) der bebauten Fläche beanspruchen. Unbebaute Innenhöfe sind weiterhin von dem Flächenverbrauch ausgenommen. Insgesamt sind 39,6 % des Betrachtungsfeldes bebaut.

Tabelle 41: Massen- und Flächenaufstellung der Blockrandbebauung bei einer urbanen Dichte von 19.958,4 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	200.800,00 m²	217.984,00 t	195.048,00 m²	1.521.374,40 t	**395.848,00 m²**	**1.739.358,40 t**
Pro EW	10,06 m²	10,92 t	9,77 m²	76,23 t	**19,83 m²**	**87,15 t**
Pro WE	22,13 m²	24,03 t	21,50 m²	167,70 t	**43,63 m²**	**191,73 t**

4.4.4 Szenario 14: Dichte 20.000 - Bebauungsstruktur Hochhaus 20

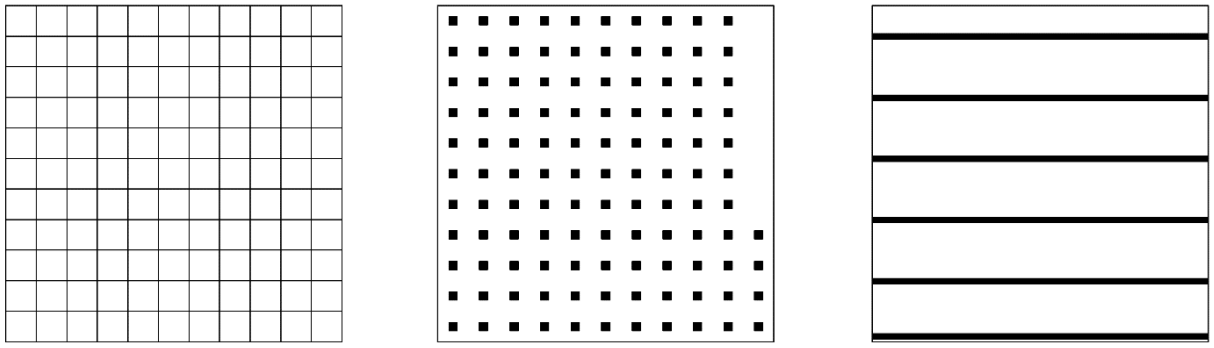


Abbildung 51: Szenario 14: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

Für das Erreichen einer urbanen Dichte von 20.064 EW/km² werden 114 jeweils 20-geschossige Hochhäuser benötigt. Um ein Raster mit möglichst quadratischen Feldern zu erreichen, werden 11 x 11 Felder erzeugt, in deren Mitte die Hochhäuser platziert werden können. Durch Entfernen von sieben Baukörpern wird die geforderte Dichte erreicht.

Wie Abbildung 51 zeigt, können jeweils zwei Hochhausreihen von einer gemeinsamen Quartiersstraße erschlossen werden. Dadurch werden letztendlich sechs Straßen entlang der Haupterschließungsachsen benötigt. Dies resultiert in einer Gesamtlänge von 6.000 m bei 16,0 m Breite.

Tabelle 42 stellt die Zusammenfassung der ermittelten Werte dar. Die Baukörper der Hochhausbebauung sind für 95,1 % des Massenverbrauchs verantwortlich und beanspruchen 41,1 % der gesamt bebauten Fläche. Insgesamt beläuft sich der Grad der Versiegelung durch Gebäude und Straßen auf 16,3 % des Quadratkilometers.

Tabelle 42: Massen- und Flächenaufstellung der 20-geschossigen Hochhausbebauung bei einer urbanen Dichte von 20.064 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	96.000,00 m²	104.640,00 t	67.032,00 m²	2.010.960,00 t	**163.032,00 m²**	**2.115.600,00 t**
Pro EW	4,78 m²	5,22 t	3,34 m²	100,23 t	**8,13 m²**	**105,44 t**
Pro WE	10,53 m²	11,47 t	7,35 m²	220,50 t	**17,88 m²**	**231,97 t**

4.4.5 Szenario 15: Dichte 20.000 - Bebauungsstruktur Hochhaus 40

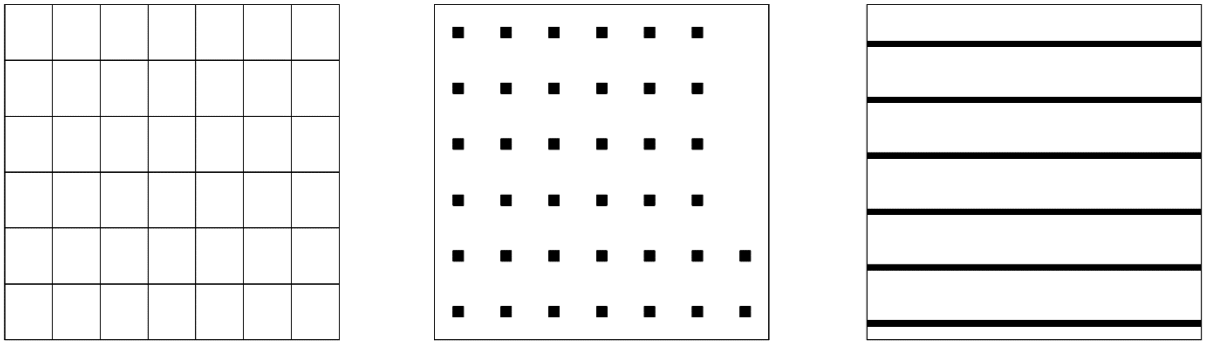


Abbildung 52: Szenario 15: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf

Das letzte Szenario dieser Untersuchung erreicht mit 38 jeweils 40-geschossigen Hochhäusern eine urbane Dichte von 20.064 EW/km². Die Rastereinteilung erfolgt in 6 x 7 Felder, worauf jeweils zentrisch ein Baukörper platziert wird. Nach Abzug von vier randgelegenen Baukörpern wird die geforderte Dichte erreicht. Die wesentlichen Elemente des Szenarios 15 sind in Abbildung 52 veranschaulicht. Wie daraus ersichtlich, werden alle Gebäude über West-Ost verlaufende Quartiersstraßen erschlossen. Da die Abstände zwischen den Gebäuden hier für eine Anbindung zu beiden Seiten der Straße zu groß sind, werden sechs Quartiersstraßen mit insgesamt 6.000 m Länge und 16,0 m Breite benötigt.

Tabelle 43 bietet einen Überblick über die generierten Werte. Sie basieren, wie die vorhergegangenen Kalkulationen, auf den Daten aus Kapitel 3. Die Baukörper der 40-geschossigen Hochhausbebauung beanspruchen 96,3 % des gesamten Massenverbrauchs, während sie nur 27,2 % des Flächenverbrauchs der bebauten Fläche ausmachen. In Szenario 13 werden insgesamt 13,2 % der verfügbaren Fläche von Gebäuden und Straßen beansprucht.

Tabelle 43: Massen- und Flächenaufstellung der 40-geschossigen Hochhausbebauung bei einer urbanen Dichte von 20.064 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)

	Fläche Straße	Masse Straße	Fläche BK	Masse BK	Σ Fläche	Σ Masse
Gesamt	96.000,00 m²	104.640,00 t	35.796,00 m²	2.720.496,00 t	**131.796,00 m²**	**2.825.136,00 t**
Pro EW	4,78 m²	5,22 t	1,78 m²	135,59 t	**6,57 m²**	**140,81 t**
Pro WE	10,53 m²	11,47 t	3,93 m²	298,30 t	**14,45 m²**	**309,77 t**

5 Auswertung und Diskussion

Die folgende Auswertung der Ressourcen- und Flächenangaben basiert auf den in Kapitel 4 ermittelten Daten der jeweiligen Szenarien. Diese Werte werden nun mit den Materialangaben aus Kapitel 3 in Relation gesetzt und ergeben eine detaillierte Massenaufstellung, die zum Vergleich der Massen innerhalb einer Dichte und zwischen unterschiedlichen Dichten dient. In diesem Kapitel werden zunächst die Ressourcenverbräuche der einzelnen Gebäude zusammenfassend untersucht und diese Betrachtungen anschließend um den urbanen Kontext mit erschließender Infrastruktur erweitert. Daraus resultiert in Kapitel 5 die Beantwortung der beiden verbliebenen Forschungsfragen.

Wie in Kapitel 4 begründet, führt die festgelegte Bewohneranzahl der Baukörper je Szenario zu einer jeweils leicht veränderten Dichte. Aus diesem Grund sind die absoluten Gesamtverbräuche nur relativ vergleichbar. Als Bezugsgröße wird für die weitere Auswertung der Verbrauch je Einwohner festgelegt. Die Angaben aus nachfolgenden Tabellen und Graphen sind dementsprechend pro Person zu verstehen.

5.1 Ressourcenverbrauch Gebäude

Der Ressourcenverbrauch der Gebäude in vorliegender Untersuchung besteht unter den gegebenen Rahmenbedingungen pro Person unabhängig von der Dichte und bleibt für jede Gebäudetypologie konstant. Dies resultiert aus den festgelegten, unveränderlichen Eigenschaften der Baukörper. Die anfallenden Baukörpermassen und -flächen pro Person sind folglich für die Szenarien mit gleicher Bebauungsstruktur (z.B. 1, 6, 11 oder 2, 7, 12, etc.) identisch. Tabelle 44 fasst diese Werte zusammen und gibt einen detaillierten Überblick über die einzelnen Baustoffzusammensetzungen.

Tabelle 44: Baukörpermassen und -flächen pro Person je Bebauungstypologie

	Szenario	**1, 6, 11**	**2, 7, 12**	**3, 8, 13**	**4, 9, 14**	**5, 10, 15**
	Bebauung	**EFH**	**MFH (4)**	**MFH (6)**	**H20**	**H40**
	Flächenverbrauch in m²	29,77	14,32	9,77	3,34	1,78
	Gesamtmasse in t	119,09	85,91	76,23	100,23	135,59
	Beton	67,88	48,97	43,45	94,71	128,13
	Zement	8,42	6,07	5,39	14,59	19,73
	Wasser	5,09	3,67	3,26	6,16	8,33
Baukörper	Gesteinskörnung	52,61	37,95	33,67	71,98	97,38
	Zusatzstoffe	1,70	1,22	1,09	1,89	2,56
	Zusatzmittel	0,07	0,05	0,04	0,09	0,13
	Mauerwerk	41,56	29,98	26,60		
	Ton/Lehm	39,90	28,78	25,54		
	Mineral. Zuschlagstoffe	1,66	1,20	1,06		
	Metalle	2,62	1,89	1,45	3,51	4,75
	Stahl	2,49	1,80	1,38	3,51	4,75
	Aluminium	0,13	0,09	0,07		

Bei der Betrachtung der detaillierten Massenkalkulation wird deutlich, welch hohen Anteil mineralische Baustoffe, insbesondere Beton, innehaben. Dies ist vor allem in Hinblick auf den Zementgehalt und dessen aktuelle Emissionswerte von ca. 580 kg CO_2 pro t Zement [145] relevant für eine zukunftsfähige gebaute Umwelt. Andere Materialien, wie z.B. Metalle spielen nur eine untergeordnete Rolle und weisen sehr geringe Anteile an der Gesamtmasse auf.

In einem ersten Schritt werden die Gebäudetypologien aus ihrer städtebaulichen Bebauungsstruktur gelöst und als EFH, MFH (4), MFH (6) und 20- und 40-geschossiges Hochhaus (H20, H40) untersucht. Aus Tabelle 44 geht deutlich hervor, dass bei der Betrachtung des Flächenverbrauchs Hochhäuser die schonendste Typologie darstellen, jedoch im Hinblick auf den weiteren Ressourcenverbrauch mit zunehmender Höhe hinter die anderen Gebäudetypologien zurückfallen. Bedingt durch die niedrige Geschosszahl und einen hohen Materialverbrauch pro m² verursacht die EFH-Bebauung den größten Flächenverbrauch und den zweitgrößten Ressourcenverbrauch. Es zeigt sich, dass das MFH durch eine hohe Nutzflächeneffizienz und geringes Eigengewicht pro m² BGF die ressourcenschonendste Gebäudetypologie darstellt. Im Typologievergleich der beiden MFH schneidet das 6-geschossige Wohnhaus mit insgesamt 76,23 t pro Einwohner noch besser ab als das 4-geschossige MFH mit 85,91 t/cap. Da das MFH (6) zudem nur knapp 10 m² Fläche pro Person beansprucht, kann das 6-geschossige MFH als ressourcenschonendste Gebäudetypologie unter den hier angewandten Rahmenbedingungen bezeichnet werden.

Ein prozentualer Vergleich des Ressourcenverbrauchs verdeutlicht die Diskrepanzen der Gebäudetypologien untereinander, denn ausgehend vom ressourcenaufwendigsten Gebäude dieser Untersuchung, H40, beanspruchen EFH 87,8 %, H20 73,9 %, MFH (4) 63,4 % und MFH (6) nur 56,2 % der Ressourcen. Dieses Verhältnis bleibt bei kongruent veränderten Variablen, wie z.B. der Wohnfläche pro Person, stets gleich. Wird jedoch eine Variable für nur eine Typologie abgeändert, während die anderen unverändert bleiben, kann dieses Ergebnis beeinflusst werden.

Je nach Signifikanz des Flächenverbrauchs durch z.B. sehr begrenzt verfügbare Fläche kann jedoch auch der Faktor Fläche der maßgebende sein und damit die Rangordnung zu Gunsten des Hochhauses verändern.

Es können drei Variablen identifiziert werden, die jeweils große Auswirkungen auf den Ressourcenaufwand pro Person haben. Dazu zählen zum einen die *Effizienz der Flächenausnutzung* sowie die *Quadratmeter Wohnfläche pro Person* und zum anderen das anfallende *Gewicht in t pro m² BGF*. Diese Variablen haben unterschiedlich starke Auswirkungen auf das Endergebnis, wie die folgenden Erläuterungen zeigen. Für alle nachfolgenden Aufstellungen gilt, dass die Graphen einzig durch die Veränderung einer Variablen entstehen, sämtliche anderen Rahmenbedingungen bleiben gemäß den in Kapitel 4 festgelegten Ausgangszuständen unverändert.

5.1.1 Geschossflächeneffizienz

Für die Bestimmung der BGF auf Grundlage der Wohnfläche pro Einwohner ist die Effizienz die entscheidende Einflussgröße und beeinflusst somit auch den Ressourcenverbrauch pro Person. In vorliegender Untersuchung variiert das Verhältnis NUF zu BGF je nach Gebäudetypologie zwischen 56-70 % (siehe Tabelle 8). Für eine Wohnfläche von 88 m² bedeutet diese Varianz eine Differenz von bis zu 31 m² BGF. Es wird deutlich, dass eine hohe Effizienz höchst relevant bei der Bestimmung des Ressourcenverbrauchs ist.

Eine Veränderung der Geschossflächeneffizienz des 40-geschossigen Hochhauses in einem realistischen Rahmen genügt beispielsweise nicht, um den Ressourcenverbrauch pro Bewohner auf das Niveau des 6-geschossigen MFH, wie es in dieser Untersuchung definiert wurde, zu senken (siehe Abbildung 53). Erst im rein hypothetischen Fall, wenn die NUF des Hochhauses mit der BGF zu 100 % übereinstimmt, wird der Vergleichswert erreicht. Ähnlich verhält es sich beim EFH, das selbst bei hundertprozentiger Effizienz aufgrund seines hohen Eigengewichts pro m² BGF den Vergleichswert des 6-geschossigen MFH von 76,23 t/cap nicht erreichen kann.

Das 20-geschossige Hochhaus sowie das 4-geschossige MFH können im Gegensatz zu EFH und H40 durch eine Erhöhung der jeweiligen Geschossflächeneffizienz auf 78,5 % den Vergleichswert erreichen bzw. überschreiten, sobald die Effizienz weiter zunimmt. Da für beide Gebäudetypologien in dieser Untersuchung das gleiche Gewicht pro m² BGF angesetzt wird, sind ihre Werte in Abbildung 53 deckungsgleich.

Die Graphen zur Korrelation von Flächeneffizienz und Tonnage pro Einwohner aus Abbildung 53 verlaufen exponentiell abnehmend. Das führt dazu, dass eine Effizienzsteigerung von beispielsweise 45 % auf 55 % einen größeren Einsparungseffekt hat als eine Steigerung von 75 % auf 85 %. Durch diesen Umstand erweist es sich als schwierig, allein durch eine Effizienzsteigerung ein Optimum zu erreichen.

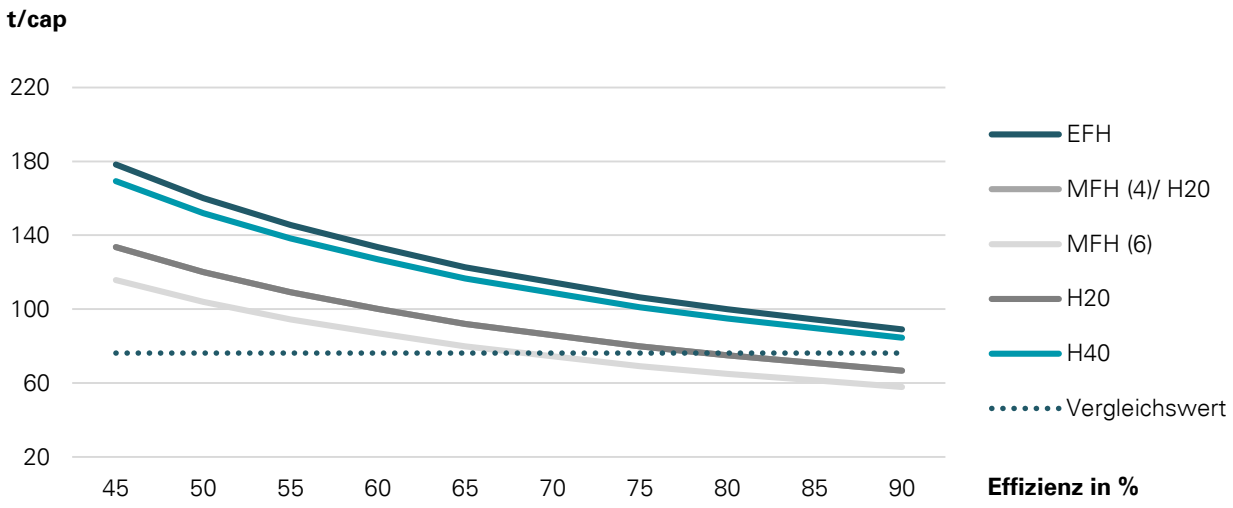


Abbildung 53: Korrelation zwischen Geschossflächeneffizienz und Gewicht pro Einwohner. Als Vergleichswert dient der Ressourcenverbrauch eines MFH (6) bei 68 % Effizienz und 1,3 t/m² BGF

5.1.2 Gewicht je m² BGF

In direktem Zusammenhang mit dem anfallenden Gewicht pro Bewohner steht das Gewicht pro m² BGF. Es stellt einen wesentlichen Faktor bei der Massenkalkulation pro Person dar. In vorliegender Untersuchung liegt das Gewicht in Abhängigkeit von der Gebäudetypologie zwischen 1,3-2,0 t/m² BGF. Bei einer Differenz von bis zu 700 kg pro m² kann der zusätzliche Ressourcenverbrauch sehr groß ausfallen. Aus Abbildung 54 wird deutlich, wie sich eine Veränderung des Faktors Gewicht je m² BGF auswirkt. Am Beispiel der beiden Hochhausgeraden ist erkennbar, dass eine ineffizientere Geschossflächennutzung zu einem leicht steiler verlaufenden Graphen führt. Somit wirkt sich in diesen beiden Fällen eine Reduzierung des Massenverbrauchs pro m² deutlicher auf den Verbrauch pro Kopf aus als bei den effizienteren Typologien.

Um den Vergleichswert zu erreichen, müsste sich das durchschnittliche Gewicht pro m² BGF auf 1,15 t für H20 und 1,05 t für H40 reduzieren. Dieser Wert befindet sich für H20 noch innerhalb des in Abbildung 32, aufgespannten Korridors. Bei H40 wird der Korridorbereich jedoch für das Gesamtgewicht je m² BGF knapp unterschritten. Ein Erreichen des Vergleichswertes eines 6-geschossigen MFH allein durch die Reduzierung des Faktors Gewicht pro m² BGF ist unter den in vorliegender Untersuchung gegebenen Rahmenbedingungen für H40 nicht möglich.

An dieser Stelle gilt der Hinweis, dass weiterführende Betrachtungen, die nicht die gemittelten Werte der in den Kapiteln 3.5.1 und 3.5.2 aufgezeigten Korridore verwenden, sondern beispielsweise Maximalwerte der MFH mit Minimalwerten der Hochhäuser vergleichen, zu anderen Ergebnissen führen können.

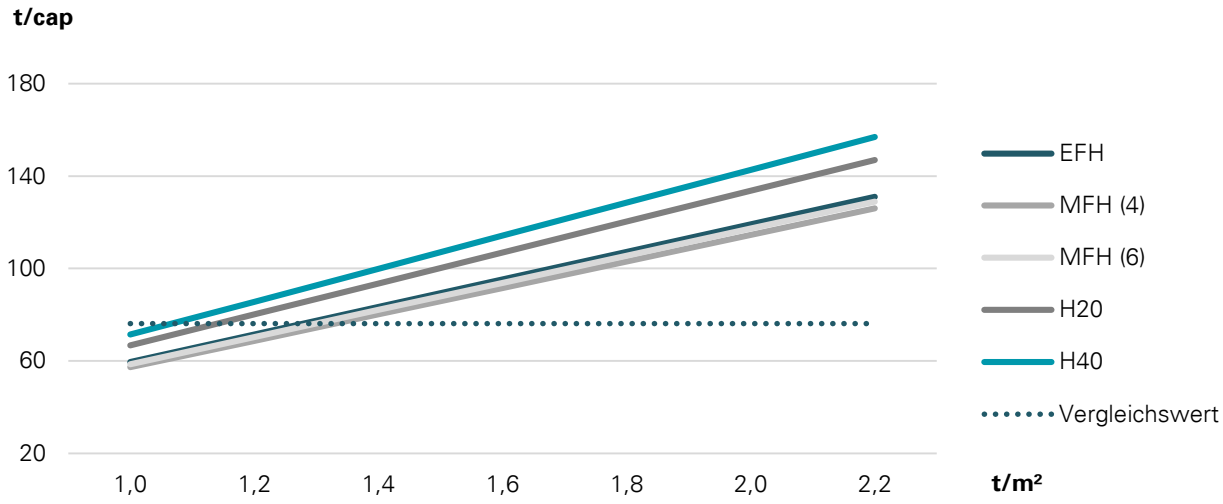


Abbildung 54: Korrelation zwischen Ressourcenaufwand pro m² BGF und -verbrauch pro Person. Als Vergleichswert dient der Ressourcenverbrauch eines MFH (6) bei 68 % Effizienz und 1,3 t/m² BGF

5.1.3 Wohnfläche pro Einwohner

In vorliegender Untersuchung wird weiterhin das europäisches Mittel von abgerundet 40 m² Wohnfläche pro Person angesetzt. Diese Variable hat direkten Einfluss auf den Ressourcenaufwand pro Einwohner. Wie auch das Gewicht pro m² BGF, verläuft der Einfluss der Wohnfläche auf den Ressourcenverbrauch pro Person linear. Aus Abbildung 55 wird deutlich, dass die Gerade der Korrelation m² und t pro Einwohner steiler ansteigt, je schwerer und je ineffizienter die jeweilige Gebäudetypologie ist. So zeigt sich auch in Abbildung 55 der steilste Verlauf für das 40-geschossige Hochhaus, da es stets die ressourcenaufwendigste Variante darstellt. Erst wenn die Wohnfläche auf 22,5 m²/cap sinkt, kann für H40 ein ähnlicher Ressourcenverbrauch pro Person wie bei einem 6-geschossigen MFH mit 40 m²/cap erreicht werden. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen H20 und H40, da das 20-geschossige Hochhaus bereits ab 30,5 m² den Vergleichswert erreicht. Die Wohnfläche eines EFH dieser Untersuchung müsste auf 25 m² pro Person reduziert werden. Solch geringe Wohnflächen entsprechen zwar bei weitem nicht dem Industrienationenstandard für EFH, sie werden jedoch zumindest im Nischentrend zum Wohnen auf geringer Wohnfläche erzielt, der in Form von kleinen EFH, sog. Tiny Houses, in der deutschen Bevölkerung vereinzelt auf positive Resonanz stößt [146].

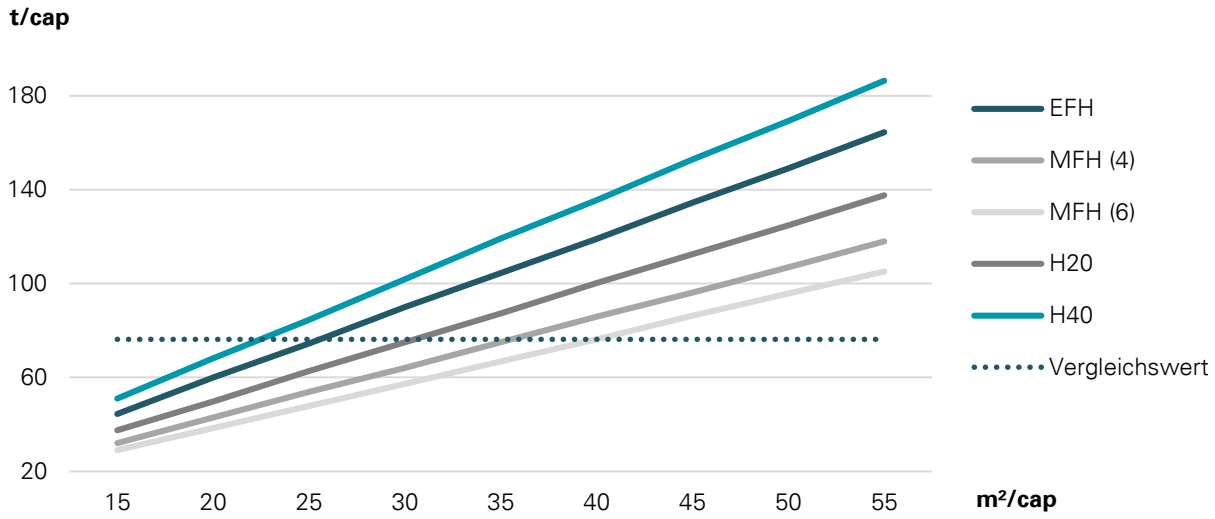


Abbildung 55: Korrelation zwischen Wohnfläche pro Person und Ressourcenverbrauch pro Person. Als Vergleichswert dient der Ressourcenverbrauch eines MFH (6) bei 68 % Effizienz und 1,3 t/m² BGF

5.1.4 Zusammenfassung

Aus den aufgezeigten Korrelationen geht hervor, dass stets eine gegenseitige Abhängigkeit der einzelnen Faktoren untereinander existiert. Es wird ersichtlich, welche Auswirkungen von einer Abänderung einzelner Variablen zu erwarten sind. Die Planung von ressourcenschonenden Bebauungstypologien ist folglich nur begrenzt durch den Fokus auf eine einzelne Variable möglich. Ein realisierbares Optimum kann für manche Gebäudetypologien, insbesondere EFH und H40, erst bei Berücksichtigung und Verbesserung von mindestens zwei Faktoren erreicht werden.

Die Wohnfläche pro Person stellt zwar einen wesentlichen Faktor bei der Berechnung des Ressourcenaufwands pro Person dar, lässt sich aber nur eingeschränkt durch Architekten oder Planer beeinflussen. Neben der Größe der Wohneinheit wird die Wohnfläche auch von der Anzahl der Einwohner pro Wohneinheit bedingt und ist dem Parameter Wohnverhalten, der vor allem durch die Bewohner selbst beeinflussbar ist, zuzuordnen. Durch die Planung von kleineren Wohneinheiten können Anreize geschaffen werden, die Wohnfläche pro Person zu verkleinern, ob diese auch tatsächlich nachgefragt und angenommen werden, ist allerdings von den Bewohnern selbst abhängig.

Das Zusammenspiel der einzelnen Einflussfaktoren ist bildlich in Abbildung 56 als Beziehungsdiagramm dargestellt. Die Wohnfläche pro EW sowie die EW pro WE erhalten darin eine gesonderte Kennzeichnung, da sie zwar jeweils die BGF einer Wohneinheit beeinflussen, aber wie oben beschrieben nicht direkt von Architekten und Planern gesteuert werden können.

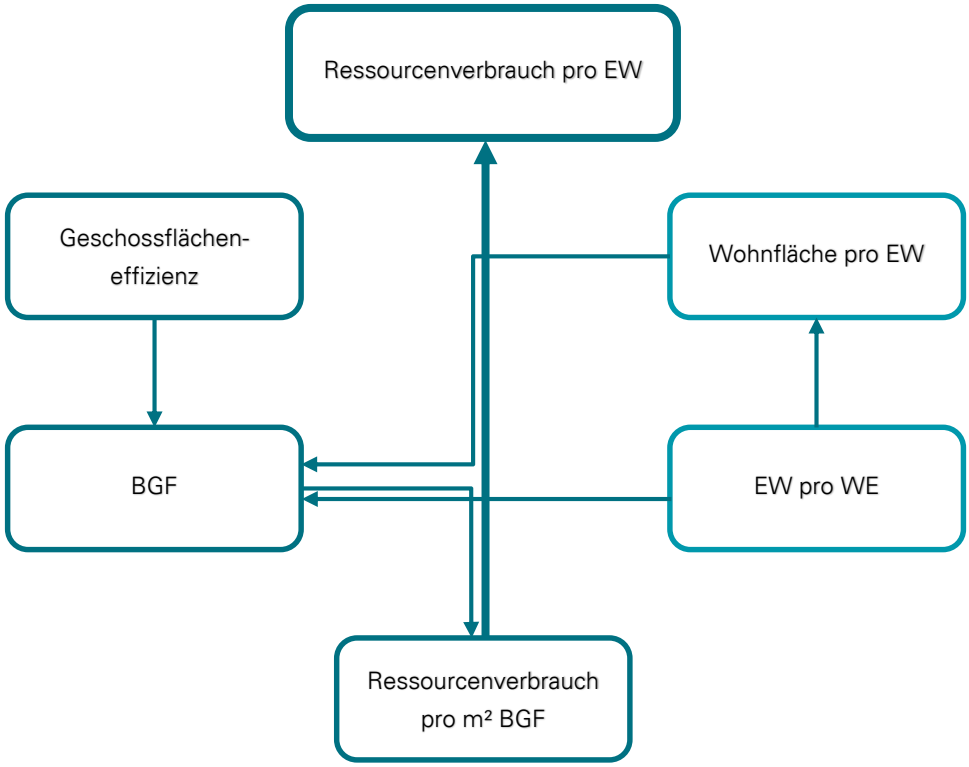


Abbildung 56: Korrelation zwischen den einzelnen Einflussfaktoren des Ressourcenverbrauchs pro Einwohner

Als Resultat der Aufstellungen aus Abbildung 56 kristallisiert sich heraus, dass mit den vorliegenden Rahmenbedingungen ein Hochhaus hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs des Baukörpers keine ressourcenschonendere Typologie darstellt als ein Mehrfamilienhaus unterhalb der Hochhausgrenze. Dies verschärft sich mit zunehmender Höhe des Hochhauses. Erst bei einer deutlichen Verbesserung der Geschossflächeneffizienz sowie der Reduzierung der Masse pro m² BGF kann ein Hochhaus mit 6-geschossiger Bebauung konkurrieren.

Wird der Parameter Flächenverbrauch pro Person hinzugezogen, zeigt sich eine gegenläufige Entwicklung, wie in Abbildung 57 dargestellt. Während der aufzuwendende Ressourcenverbrauch pro Person bis sechs Geschosse hin abnimmt und darauf folgend wieder ansteigt, nimmt die verbaute Fläche pro Person kontinuierlich ab. Der auf die absolute Fläche bezogene stärkste Rückgang ist zwischen zwei und vier bzw. sechs und 20 Geschossen wahrnehmbar.

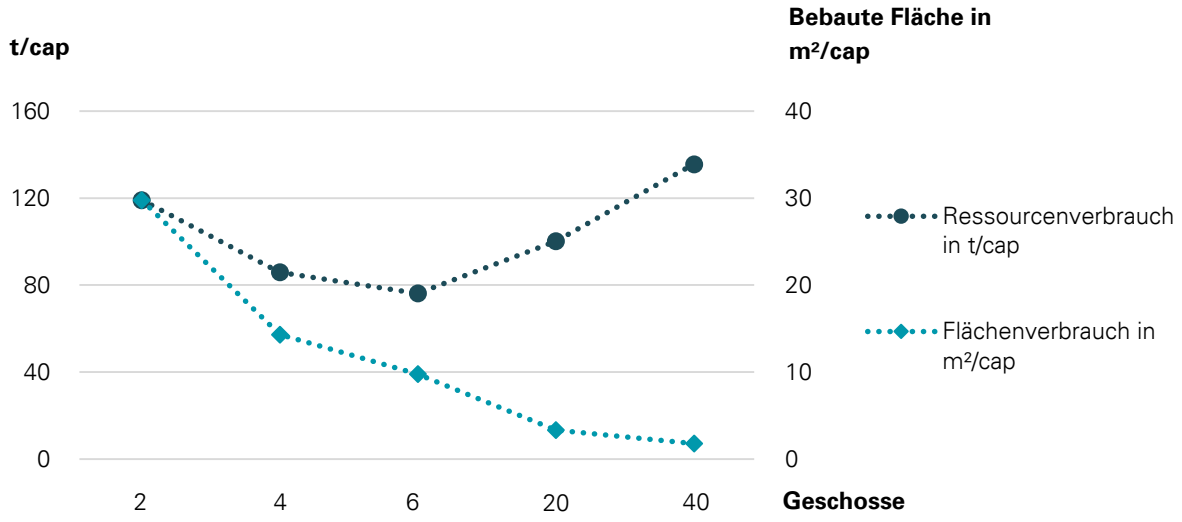


Abbildung 57: Ressourcen- und Flächenverbrauch pro Person für die einzelnen Baukörper dieser Untersuchung (Datenbereiche zwischen den Erhebungspunkten sind linear interpoliert)

Je nach Verfügbarkeit von bebaubarer Fläche gewinnt der Faktor Flächenverbrauch an Relevanz. Bei identischer Geschossflächeneffizienz und gleichbleibenden Rahmenbedingungen würde eine Erhöhung des Gebäudes um das Doppelte in einer Halbierung der bebauten Fläche pro Person resultieren. Da jedoch der Faktor Effizienz in dieser Untersuchung ab sechs Geschosse stetig abnimmt, ist der Verlauf über die Gebäudetypologien hinweg nicht linear. Dies verdeutlicht wiederum die Gewichtigkeit einer effizienten Geschossflächennutzung für die Planung von ressourcenschonenden Wohngebäuden. Abbildung 58 stellt die Korrelation der Einflussfaktoren für den Flächenverbrauch pro Einwohner in einem Beziehungsdiagramm dar. Daraus geht hervor, dass im Wesentlichen die BGF pro EW und die Anzahl der Geschosse den Flächenverbrauch pro Einwohner bestimmen.

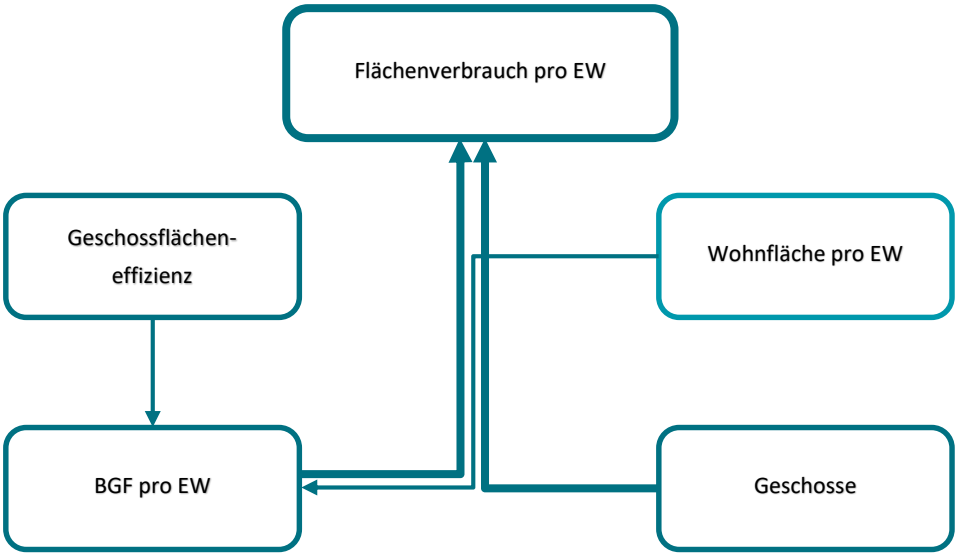


Abbildung 58: Korrelation zwischen den einzelnen Einflussfaktoren des Flächenverbrauchs pro Einwohner

5.2 Ressourcenverbrauch urbaner Strukturen

Die in Kapitel 5.1 zusammengefassten Ressourcenverbräuche der einzelnen Baukörper bilden die Grundlage für die Planung von ressourcenschonenden Wohngebäuden ohne städtebaulichen Kontext. Für die Planung von ressourcenschonenden urbanen Strukturen ist hingegen nicht nur die Ressourcen- und Flächenaufstellung der jeweiligen Gebäudetypologien relevant, sondern auch diejenige der notwendigen verkehrstechnischen Infrastruktur. Der Aufwand für die Infrastruktur unterscheidet sich je nach urbaner Dichte und wird im Folgenden für jede Dichte einzeln und abschließend im Vergleich der drei Dichten genauer betrachtet. Erst durch diesen Schritt werden die jeweiligen Baukörper tatsächlich miteinander vergleichbar. Ein Beispiel hierfür sind Hochhäuser, die horizontale Erschließungsfläche einsparen, allerdings in ihrer Grundflächeneffizienz Einbußen durch erhöhten Aufwand für die vertikale Erschließung haben.

Aus den Erläuterungen in den Kapiteln 5.2.1, 5.2.2 und 5.2.3 ergibt sich schließlich die Antwort auf die zweite Forschungsfrage (*Wie verändert sich in Abhängigkeit von der Bebauungsstruktur der Ressourcen- und Flächenverbrauch von Verkehrsanlagen und Gebäuden, bei einheitlicher baulicher Dichte?*) und anschließend in Kapitel 5.2.4 auf die dritte Frage (*Wie verändern sich diese Ergebnisse bei veränderter baulicher Dichte?*).

5.2.1 Dichte 400

Im internen Vergleich sticht bei der Gesamtbetrachtung der Dichte von 400 EW/km² mit großem Abstand das EFH als die sowohl flächen- als auch ressourcenaufwendigste Bebauungsstruktur heraus. Diese Intensität resultiert vor allem aus dem erhöhten Aufwand für die verkehrstechnische Erschließung der Einfamilienhäuser, die mit einer Straßenlänge von 7.000 m den größten Anteil des Ressourcen- und Flächenverbrauchs des ersten Szenarios ausmacht. Da sich nur wenige Bewohner der EFH-Bebauung diese Erschließungswege teilen, entfallen in Szenario 1 pro Person 175 m² Verkehrsfläche, während der Verbrauch von beispielsweise Szenario 5 nur bei 11 % dieser Fläche liegt. Bei den Szenarien 2-5 verantworten im Gegensatz zu Szenario 1 die Baukörper den größten Ressourcen- und Flächenverbrauch.

Wie schon bei der Betrachtung der Einzelgebäude ist auch im urbanen Kontext des Baublocks, die 6-geschossige MFH-Bebauung am ressourcenschonendsten. Da die Verkehrsanlagen im urbanen Kontext (mit Ausnahme von Szenario 1) zu geringe Auswirkungen auf die Gesamtbilanz haben, ist der Vorteil des MFH (6) bei Geschossflächeneffizienz und Ressourcenaufwand pro m² BGF ausschlaggebend für das positive Resultat von Szenario 3. Im Hinblick auf die Ressource Fläche sind jedoch die beiden Szenarien 4 und 5 mit ihrer jeweiligen Hochhausbebauung effizienter, da ein Bewohner dieser beiden Szenarien nur 31,75 m² bzw. 20,72 m² benötigt.

In Tabelle 45 sind die einzelnen Aufstellungen zu den jeweiligen Verbräuchen der Hauptmaterialkategorien aufgelistet. Der geringste Ressourcenverbrauch fällt für Einwohner unter den Rahmenbedingungen des dritten Szenarios an und beträgt 105,73 t. Der Ressourcenaufwand für Bewohner im EFH-Szenario 1 beläuft sich auf fast das Dreifache. Auch die Bewohner des Szenarios 5 benötigen deutlich mehr Materialien (+50 t/cap) als diejenigen in Szenario 3. Der Gesamtressourcenverbrauch der Szenarien 2 und 4 befindet sich mit 132 bzw. 131 t pro Person fast gleich auf, da Szenario 2 beträchtlich mehr Straßenfläche pro Person benötigt und damit den ressourcenbezogenen Vorsprung in den Baukörpern einbüßt. Daraus wird deutlich,

dass in Szenario 2 sowie in Szenario 1 die Erschließungsfläche einen größeren Einfluss auf die Endkalkulation hat als bei den Szenarien 3-5.

Die großen Unterschiede der Straßenfläche und folglich auch der -masse pro Person zwischen Szenario 4 und 5 liegen in der ungleichen Einwohneranzahl durch die für H20 und H40 vorgegebenen Bewohneranzahlen von 352 bzw. 528 EW begründet.

Tabelle 45: Absolutwerte pro Person der Szenarien 1-5; Angaben zum Flächenverbrauch in m², zum Ressourcenverbrauch in t

		EFH Szenario 1	Zeile Szenario 2	Baublock Szenario 3	H20 Szenario 4	H40 Szenario 5
	Flächenverbrauch gesamt	204,60	62,35	37,35	31,75	20,72
	Straßen	174,83	48,03	27,58	28,41	18,94
	Baukörper	29,77	14,32	9,77	3,34	1,78
	Ressourcenverbrauch gesamt	306,15	132,18	105,73	130,63	155,86
Baukörper	**Ressourcenverbrauch**	119,09	85,91	76,23	100,23	135,59
	Beton	67,88	48,97	43,45	94,71	128,13
	Mauerwerk	41,56	29,98	26,60		
	Metalle	2,62	1,89	1,68	3,51	4,75
Straßen	**Ressourcenverbrauch**	187,06	46,28	29,51	30,40	20,27
	Gesteinskörnung	183,51	45,31	28,95	29,82	19,88
	Bitumen	3,55	0,96	0,56	0,58	0,39

Die Relationen der Szenarien zueinander können anschaulich aus Abbildung 59 ausgelesen werden. Hier ist der Sprung zwischen Szenario 1 und 2, verursacht durch die Verkehrsanlagen bei der EFH-Bebauung, sehr markant wahrnehmbar. Für die Szenarien 2-5 folgt der Kurvenverlauf des gesamten Ressourcenverbrauchs im Wesentlichen dem der Baukörper, da hier die Verkehrsanlagen einen geringeren Anteil (13-35 %) und damit geringere Auswirkungen haben.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die EFH-Bebauung für diese Dichte zwar die typischerweise bevorzugt angewandte Bebauungsstruktur darstellt, jedoch der zusätzliche, ressourcenbezogene Mehraufwand beträchtlich ausfällt.

Der erhöhte Flächenverbrauch ist bei dieser Bebauungsdichte vernachlässigbar, da aufgrund der dünnen Besiedelung ausreichend Fläche zur Verfügung steht.

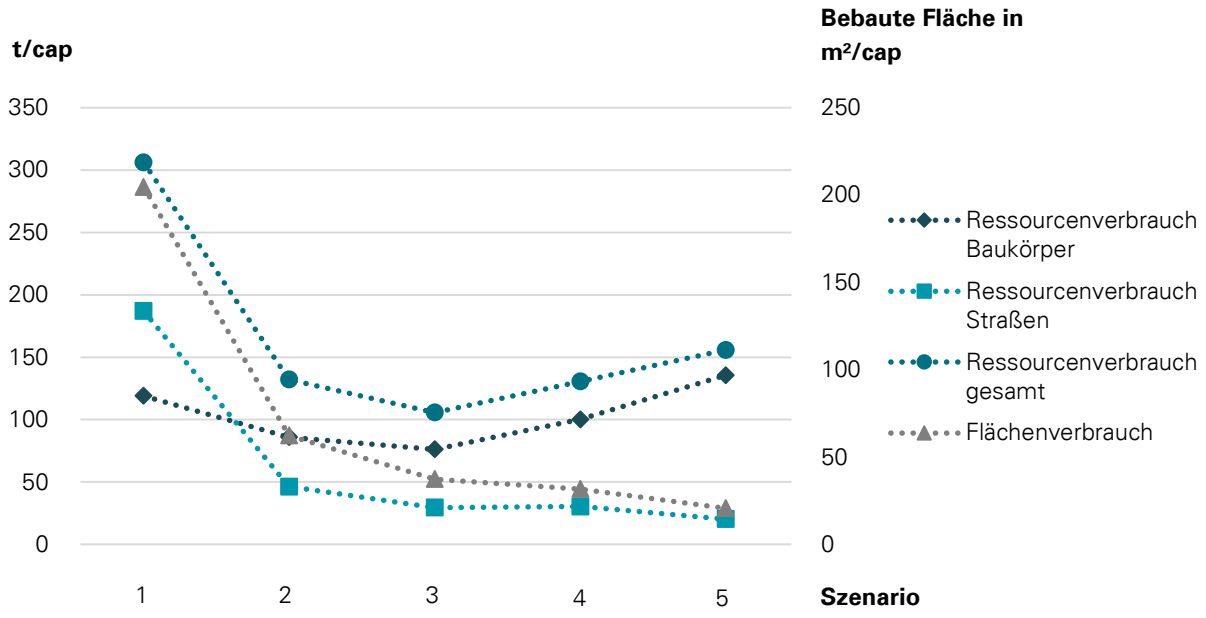


Abbildung 59: Ressourcenverbrauch pro Person für Gebäude und Straßen der Dichte 400 (Datenbereiche zwischen den Erhebungspunkten sind linear interpoliert)

5.2.2 Dichte 4.000

Die im Vergleich zu Kapitel 5.2.1 zehnfach höhere Dichte hat eine Reduzierung des Ressourcenverbrauchs der Verkehrsanlagen auf 31-55 % des Vergleichswertes aus Kapitel 5.2.1 zur Folge. Die größte Einsparung tritt bei der EFH-Bebauung auf. Bewohner des Szenarios 6 beanspruchen nur noch knapp 55 m² Verkehrsfläche, da im Vergleich zu Szenario 1 die zehnfache Anzahl an Baukörpern durch eine gemeinsam genutzte Straße erschlossen werden kann. Auch für die anderen Szenarien reduziert sich die Verkehrsfläche pro Person, sodass sich der Aufwand der Szenarien 7-10 auf 9-20 m² pro Person beläuft.

Ein Vergleich mit der Verkehrsfläche für fließenden Verkehr pro Person aus Tabelle 14 zeigt, dass die Werte der Tabelle einen Mittelwert darstellen, der für die Szenarien 7-10 durchaus zutrifft. Da 5.000 EW/km² in Tabelle 14 die geringste angegebene Dichte darstellt, wird diese Dichte als Richtwert für die hier untersuchten 4.000 EW/km² angesetzt. Lediglich die Straßenfläche der EFH-Bebauung aus Szenario 6 übersteigt diejenige des Vergleichswerts deutlich. Da in Tabelle 14 keine Differenzierung zwischen unterschiedlichen Bebauungsstrukturen getroffen wird, ist darin eher ein Richtwert zu sehen, der für extrem monotone Bebauungsstrukturen nicht ansetzbar ist.

Die Ressourcenaufstellungen aus Tabelle 46 zeigen, dass die Diskrepanzen zwischen den Szenarien 6-10 insgesamt kleiner ausfallen als noch bei der Dichte 400. Die Ressourcenbilanz der Szenarien 7-10 verbessert sich um 10-20 % und der Verbrauch von Szenario 6 halbiert sich sogar fast gegenüber Szenario 1. Auffällig ist zudem, dass bei Dichte 400 der Massenverbrauch zwischen Zeilen- und H20-Bebauung noch annähernd gleich ist, während hier ein Unterschied von 12 t pro EW festzustellen ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die relative Verkehrsfläche für Szenario 7 im Vergleich zu Szenario 2 abnimmt und sich daher die Einsparung durch den geringeren Ressourcenverbrauch bei der Gebäudemasse von MFH (4) deutlicher äußert.

Für die Dichte 4.000 liegt der Wertebereich des Ressourcenverbrauchs insgesamt zwischen 92,69 t und 177,94 t pro Person. Auch hier sind wie bei Kapitel 5.2.1 die beiden Szenarien mit MFH-Bebauung am ressourcenschonendsten, während die EFH-Bebauung den größten Verbrauch aufweist.

Weiterführend können aus Tabelle 46 die detaillierten Angaben zu den einzelnen Rohstoffverbräuchen ausgelesen werden.

Tabelle 46: Absolutwerte pro Person der Szenarien 6-10; Angaben zum Flächenverbrauch in m², zum Ressourcenverbrauch in t

		EFH Szenario 6	Zeile Szenario 7	Baublock Szenario 8	H20 Szenario 9	H40 Szenario 10
	Flächenverbrauch	84,75	33,86	25,07	18,78	10,66
	Straßen	54,97	19,54	15,30	15,44	8,88
	Baukörper	29,77	14,32	9,77	3,34	1,78
	Ressourcenverbrauch gesamt	**177,94**	**104,77**	**92,69**	**116,90**	**145,18**
Gebäude	**Ressourcenverbrauch**	119,09	85,91	76,23	100,23	135,59
	Beton	67,88	48,97	43,45	94,71	128,13
	Mauerwerk	41,56	29,98	26,60		
	Metalle	2,62	1,89	1,68	3,51	4,75
Straßen	**Ressourcenverbrauch**	58,85	18,86	16,46	16,67	9,59
	Gesteinskörnung	57,74	18,47	16,15	16,36	9,41
	Bitumen	1,12	0,39	0,31	0,32	0,18

Die Relation der Ergebnisse der einzelnen Szenarien zueinander ist anschaulich aus Abbildung 60 ablesbar. Die Kurve zum gesamten Ressourcenverbrauch weist im Szenarienvergleich den Minimalwert bei Szenario 8 (Baublock) auf.

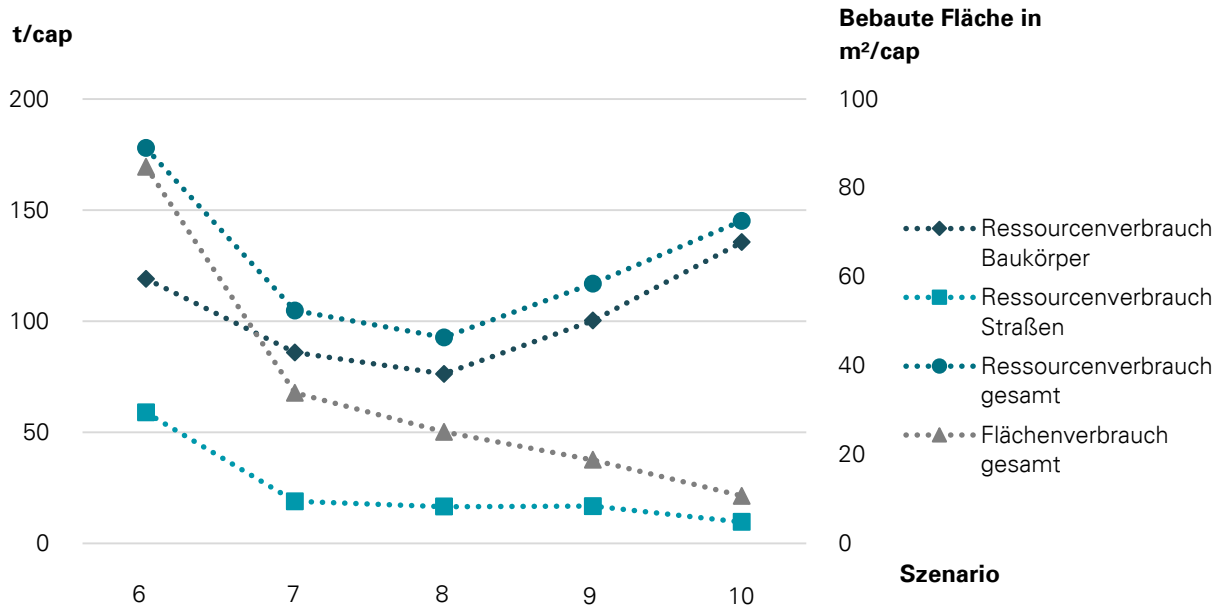


Abbildung 60: Ressourcenverbrauch für Gebäude und Straßen der Dichte 4.000 pro Person (Datenbereiche zwischen den Erhebungspunkten sind linear interpoliert)

Es zeigt sich deutlich, dass auch bei der Dichte 4.000 der Einfluss des Ressourcenverbrauchs der Verkehrsanlagen auf die Gesamtbilanz bei Szenario 6 am stärksten ist. Der Flächenaufwand der Straßen für die Szenarien 7-9 verläuft innerhalb dieser Dichte annähernd gleichbleibend. Die Ursache für die geringen Unterschiede der Verkehrsfläche zwischen den Szenarien 8 und 9 liegt in den vorab bestimmten Entwurfsparametern, die eine beidseitige Erschließung der H20-Gebäude verhindern (siehe Kapitel 4.3.4). Dadurch besteht für Szenario 9 kein ressourcenbezogener Vorteil durch eine geringere Erschließungsfläche. Bei gleichbleibender Infrastruktur wird somit eine Verbesserung der Geschossflächeneffizienz der Baukörper von

60 % auf 75 % und eine Reduzierung des Ressourcenverbrauchs von 1,5 t auf 1,4 t pro m² BGF erforderlich, um den Vergleichswert von Szenario 8 zu unterschreiten.

Aus Abbildung 60 wird ersichtlich, wie sich der Gesamtflächenverbrauch über die fünf Szenarien hinweg entwickelt. Die bebaute Fläche beansprucht je nach Szenario zwischen 4,5-33,9 % der verfügbaren Fläche und liegt damit noch deutlich unterhalb der Fläche, die laut Abbildung 12 für Bebauung und Verkehr in europäischen Millionenstädten ausgewiesen wird. Aufgrund des Umstands, dass in den Szenarien vorliegender Arbeit ausschließlich Wohnbauten und keine komplexen und multifunktionalen urbanen Umgebungen berücksichtigt sind, sind die Abweichungen von Abbildung 12 zu erklären.

Je nach Bebauungstypologie gewinnt der Faktor Fläche bei dieser Dichte durchaus an Relevanz, vor allem dann, wenn zusätzlich private und öffentliche Freiräume als Parameter aufgenommen werden oder vorgegebene Abstandsflächen oder andere Flächenbegrenzungen beachtet werden müssen. Dies gilt auch für Szenario 8, da insgesamt 42.601 m² der neun Innenhöfe vom öffentlichen Raum wegfallen, jedoch nicht überbaut sind. Bei einer Bebauung durch Hochhäuser ist der Anteil bebauter Fläche mit 7,6 % bzw. 4,5 % noch sehr gering.

5.2.3 Dichte 20.000

Eine Erhöhung der Dichte 4.000 um den Faktor Fünf erzeugt eine Einsparung des Ressourcenverbrauchs der Verkehrsfläche um 35-69 %. Die geringste Ersparnis tritt für die Blockrandbebauung in Szenario 13 auf, die mit 69 % größte Reduktion erfährt die Bebauung mit 20-geschossigen Hochhäusern. Dennoch ist auch im Szenarienvergleich dieser Dichte das Szenario 13 am ressourcenschonendsten. Im Vergleich zur Dichte 4.000 sinken allerdings (mit einer Ausnahme) die prozentualen und auch absoluten Differenzen zu den anderen Szenarien. Einzig Szenario 15 weist im Vergleich zu Kapitel 5.2.2 eine unveränderte Diskrepanz zu Szenario 13 auf. Der Grund hierfür liegt erneut in den festgelegten Entwurfsparametern der Verkehrsfläche, die eine beidseitige Erschließung der H40 nicht ermöglichen. Es ergibt sich insgesamt ein Ressourcenverbrauch von 87,15-144,71 t pro Bewohner. Tabelle 47 fasst die Angaben zum Flächen- und Ressourcenverbrauch, aufgegliedert nach Bauwerk und Hauptmaterialgruppe, zusammen.

Tabelle 47: Absolutwerte pro Person der Szenarien 11-15; Angaben zum Flächenverbrauch in m², zum Ressourcenverbrauch in t

		EFH Szenario 11	Zeile Szenario 12	Baublock Szenario 13	H20 Szenario 14	H40 Szenario 15
	Flächenverbrauch	**53,70**	**21,94**	**19,83**	**8,13**	**6,57**
	Straßen	23,92	7,62	10,06	4,78	4,78
	Gebäude	29,77	14,32	9,77	3,34	1,78
	Ressourcenverbrauch gesamt	**144,71**	**93,39**	**87,15**	**105,44**	**140,81**
Gebäude	**Ressourcenverbrauch**	119,09	85,91	76,23	100,23	135,59
	Beton	67,88	48,97	43,45	94,71	128,13
	Mauerwerk	41,56	29,98	26,60		
	Metalle	2,62	1,89	1,68	3,51	4,75
Straßen	**Ressourcenverbrauch**	25,61	7,48	10,92	5,22	5,22
	Gesteinskörnung	25,12	7,28	10,66	5,07	5,07
	Bitumen	0,49	0,19	0,26	0,15	0,15

Die in vorliegender Arbeit ermittelten Verkehrsflächen der Szenarien 12-15 können durch die in Tabelle 14 angegebenen 5,6-9,3 m² für fließenden Verkehr pro Person bestätigt werden. Zwar weichen die Einzelwerte leicht ab, die Tendenz wird jedoch überwiegend widergespiegelt. Aufgrund der extremen Bebauungsart in monotoner EFH-Bebauung überschreitet das Szenario 11 die Werte deutlich und muss von dem Vergleich mit Tabelle 14 ausgenommen werden. Wie in Kapitel 4.4.1 dargelegt, übersteigt eine Bebauung in dieser Form und Ausführung die verfügbare Fläche und stellt daher keine realistische Bebauungsform dar.

Die Verbrauchsangaben der Szenarien 11-15 sind zur graphischen Übersicht in Abbildung 61 dargestellt. Hier zeigen sich ähnliche Kurvenverläufe wie bei den beiden vorangegangenen Dichten. Es ist zudem deutlich erkennbar, dass der Einfluss der Verkehrsfläche abnimmt und sich die beiden Kurven Ressourcenverbrauch Baukörper und Ressourcenverbrauch gesamt weiter annähern. Die Ausnahme bildet Szenario 13, denn hier hat die erhöhte Verkehrsfläche, vor allem im Vergleich zu Szenario 12, die Auswirkung, dass sich der Ressourcenverbrauch beider Szenarien bis auf 6,2 t angleicht. Dadurch führt beispielsweise eine Reduzierung der Tonnage pro m² BGF der Zeilenbebauung auf den gleichen Wert der MFH (6) zu einer deutlichen Unterschreitung des Verbrauchswertes von Szenario 13. Aus diesem Umstand lässt sich

ableiten, dass die 6-geschossige Gebäudetypologie zwar am ressourcenschonendsten ist, nicht jedoch die Bebauungstypologie Blockrand mit entsprechender, umfangreicheren Erschließung.

Zum Vergleich: Die zusätzliche Optimierung des Szenarios 14 umfasst nicht nur eine Reduzierung der Tonnage pro m² BGF auf 1,4 t, sondern auch eine Effizienzsteigerung auf 70 % bis zum Unterschreiten des Verbrauchs von Szenario 13.

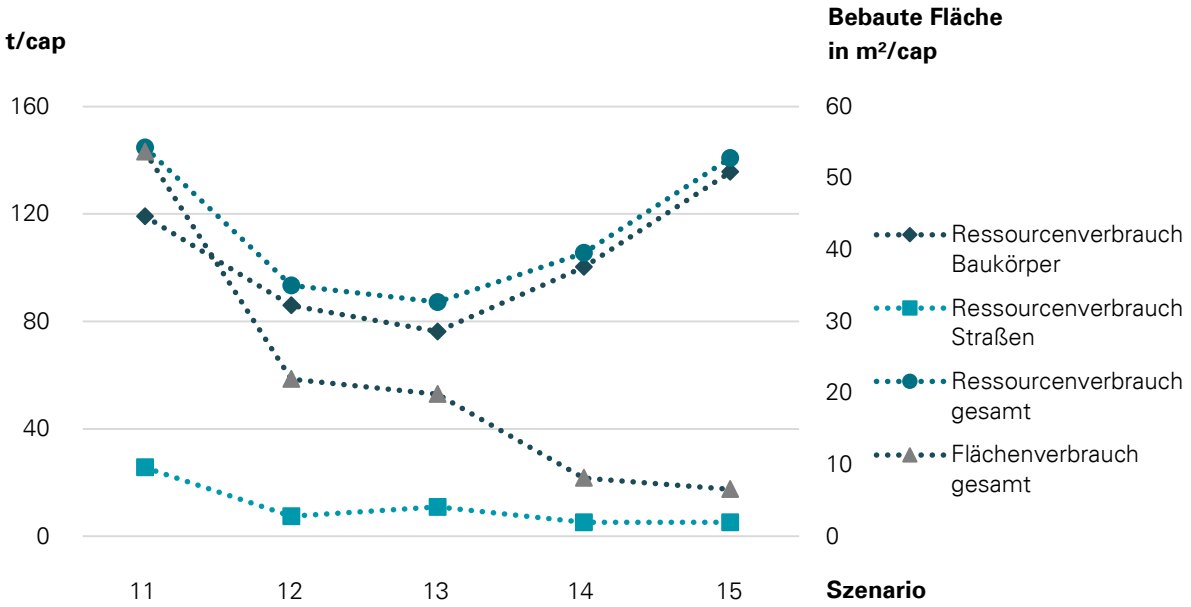


Abbildung 61: Ressourcenverbrauch für Gebäude und Straßen der Dichte 20.000 pro Person (Datenbereiche zwischen den Erhebungspunkten sind linear interpoliert)

Der Flächenverbrauch verläuft, wie bei den beiden vorangegangenen Dichten, mit zunehmender Baukörperhöhe absteigend. Zwischen Szenario 12 und 13 stellt sich jedoch aufgrund der erhöhten Verkehrsfläche von Szenario 13 ein nur noch leicht abnehmender Verlauf ein. Die Verkehrsfläche ist hier bei dem Baublockszenario erstmalig höher als bei dem Zeilenszenario. Dadurch beläuft sich die Differenz des gesamten Ressourcenverbrauchs zwischen Szenario 12 und 13 auf nur mehr 2 t pro Einwohner.

Im Hinblick auf die teilweise Verknappung der Ressource Fläche durch Versiegelungsgrade zwischen 13-107 %, steigt die Bedeutung des Flächenverbrauchs bei Dichte 20.000. Auch hier ist anzumerken, dass zum bebauten Flächenanteil von ca. 40 % für Szenario 13 noch 42 halböffentliche oder private Innenhöfe mit einer Gesamtfläche von 198.804 m² hinzukommen, die nicht von der Allgemeinheit genutzt werden können und daher zusätzlich vom öffentlichen Raum wegfallen.

Abschließend lässt sich über diese Dichte sagen, dass eine Bebauung in Baublöcken mit MFH (6) die ressourcenschonendste Bebauung darstellt. Die Unterschiede zu den anderen Bebauungsarten fallen allerdings teilweise geringer aus, da für die Blockrandbebauung im Vergleich zu Szenario 12, 14 und 15 mehr Verkehrsfläche aufgebracht werden muss.

5.2.4 Zusammenfassender Vergleich der Dichten

Eine wesentliche Erkenntnis für städtische Strukturen im Vergleich der drei untersuchten Dichten ist die Prämisse: je dichter, desto ressourcenschonender.

Eine Veränderung einzelner Parameter wie z.B. der Wohnfläche pro Person könnte diese Erkenntnis weiter schärfen, da die Wohnfläche in Städten im Vergleich zu ländlichen, weniger dichten Siedlungsbereichen geringer ist. Dies zeigt sich z.B. in einem Vergleich des Stadtkreises Stuttgart mit der Region Nordschwarzwald [147].

Da in vorliegender Dissertation sämtliche Rahmenbedingungen für die Erstellung der 15 Szenarien unverändert bleiben, wird die Veränderung des Ressourcenverbrauchs bei unterschiedlichen Dichten ausschließlich durch die verkehrstechnische Erschließung bedingt.

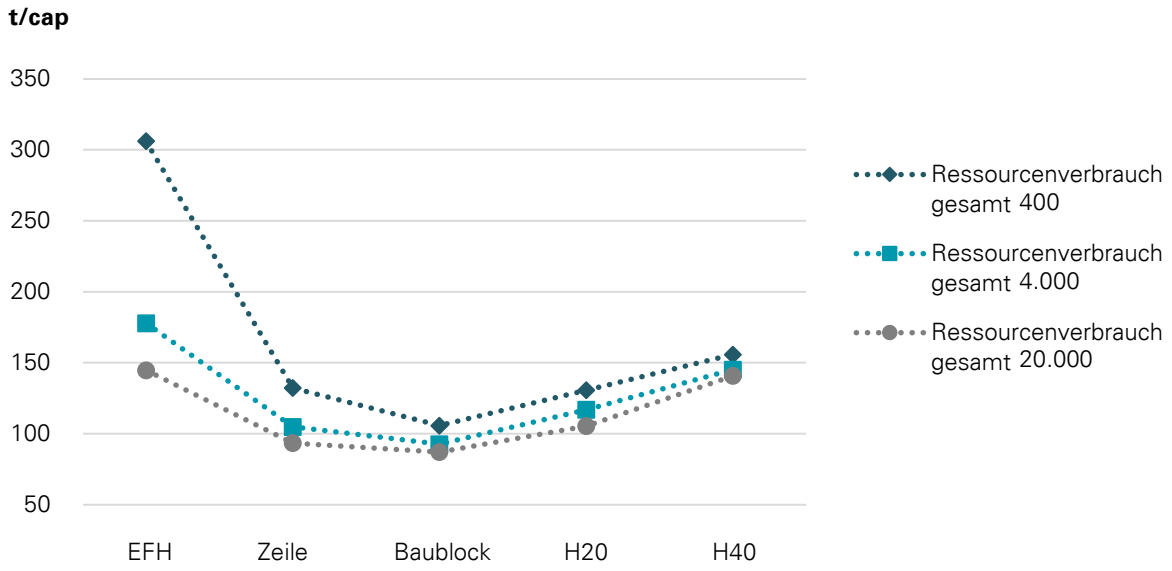


Abbildung 62: Ressourcenverbrauch der drei untersuchten urbanen Dichten (Datenbereiche zwischen den Erhebungspunkten sind linear interpoliert)

Abbildung 62 stellt die Verläufe des Ressourcenverbrauchs der drei untersuchten urbanen Dichten dar und Abbildung 63 zeigt die entsprechende Entwicklung zum Flächenverbrauch. Die geringste Dichte von 400 EW/km² beansprucht in beiden Abbildungen im Vergleich zu den Dichten 4.000 und 20.000 EW/km² für alle Bebauungstypologien pro Person die meiste Fläche sowie die meisten Ressourcen. Eine Dichte von 20.000 EW/km² hingegen benötigt pro Person am wenigsten Ressourcen. Die Entwicklungstendenz der Kurven der einzelnen Szenarien innerhalb einer Dichte verändert sich, wie aus Abbildung 62 ersichtlich, nicht. Allerdings reduziert sich die Amplitude der Verbrauchswerte der fünf Szenarien, je dichter sie werden. Während zwischen Szenario 1 und 3 noch 200 t Differenz liegen, sind es zwischen Szenario 6 und 8 nur noch 85,3 t und zwischen Szenario 11 und 13 nur noch 57,6 t. Die durchschnittliche Tonnage dieser fünf untersuchten Bebauungsvarianten reduziert sich von 166,1 t/cap bei der Dichte 400 um 31 % auf 114,3 t/cap bei der Dichte 20.000. Für ressourcenschonende urbane Strukturen ist also per se eine höhere Dichte anzustreben.

Eine weitere Erkenntnis aus vorliegender Untersuchung ist, dass 6-geschossige Mehrfamilienhäuser unterhalb der Hochhausgrenze durch hohe Geschossflächeneffizienz und geringe Tonnage je m² BGF stets die ressourcenschonendste Gebäudetypologie – unter den festgelegten Rahmenbedingungen – darstellen. Da der Gewichtsanteil des Baukörpers gegenüber dem Straßenanteil meistens überwiegt, mit der einzigen Ausnahme von Szenario 1, ist bei

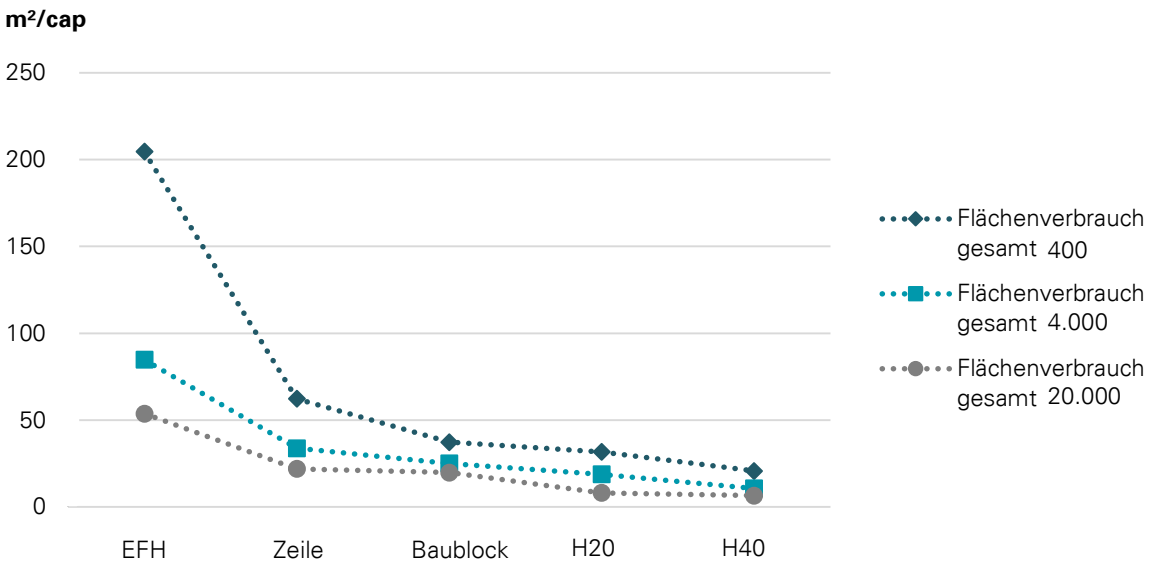


Abbildung 63: Flächenverbrauch der drei untersuchten urbanen Dichten (Datenbereiche zwischen den Erhebungspunkten sind linear interpoliert)

jeder urbanen Dichte die Bebauungsstruktur *Blockrand* mit MFH (6) diejenige mit dem geringsten Ressourcenaufwand. Sogar bei einer Reduzierung der Verkehrsfläche von der H20-, H40- oder EFH-Bebauung auf 0,0 m² könnte eine Bebauung durch Hochhäuser oder EFH nicht ressourcenschonender sein als die 6-geschossige Blockrandbebauung. Auch eine Verdoppelung des Straßenaufbaus verändert dieses Verhältnis nicht. Daraus wird deutlich, dass der Einfluss des Ressourcenaufwands der Baukörper gewichtiger ist als derjenige der Straßen.

Ressourcenverbrauch Baukörper > Ressourcenverbrauch Verkehrsanlagen

Isoliert betrachtet, benötigt eine Blockrandbebauung jedoch bei einer Dichte von 20.000 EW/km² hinter der Bebauung durch EFH die meiste Verkehrsfläche und folglich auch die meisten Ressourcen für die allseitige Erschließung. Durch eine veränderte Bebauungsstruktur, beispielsweise mit MFH (6) als Reihe entlang der West-Ost verlaufenden Haupterschließungsachsen, könnten weitere 5 t pro Person an Ressourcen eingespart werden. Daraus ergibt sich, dass in der Bebauungsstruktur durchaus noch Optimierungspotential vorhanden ist und dass die urbanen Anordnungen spezifisch im jeweiligen Kontext betrachtet werden müssen. Zusätzliche, notwendige Kreuzungen und Verbindungsstraßen entlang der Nord-Süd-Achse könnten diese abstrahierte Aufstellung beispielsweise wieder verändern.

Unter den hier gewählten Rahmenbedingungen gilt für die Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch der MFH[3], dass der Einfluss der Effizienz und des Ressourcenaufwands der Gebäudetypologie den Einfluss der Anordnung in der Bebauungsstruktur übertrifft.

Gebäudetypologie > Bebauungsstruktur

[3] Diese Aussage bezieht sich ausschließlich auf Mehrfamilienhäuser, da nur für diese Gebäudetypologie zwei unterschiedliche Bebauungsstrukturen (Zeile/Baublock) untersucht wurden.

5.3 Limitationen der Arbeit und weiterer Forschungsbedarf

Die Planung von nachhaltigen urbanen Strukturen stellt Architekten und Ingenieure vor ein Multiparameterproblem, welches in seiner Umfänglichkeit nicht in einer einzigen Arbeit erfasst werden kann. Wie in Kapitel 2 dargestellt, ist eine Vielzahl an Faktoren – weit mehr, als hier aufgelistet werden konnten – verantwortlich für einen zukunftsfähigen urbanen Lebensraum. Die Begrenzung auf ein bearbeitbares Themenfeld hat zur Konsequenz, dass andere Bereiche unbehandelt bleiben. Im Folgenden werden die Limitationen dieser Arbeit und der damit verbundene weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

Nachhaltigkeit von urbanen Strukturen

Da das Themenfeld zur Nachhaltigkeit von urbanen Strukturen sehr umfangreich ist, wurde der Fokus auf die in der Ideologie des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren verankerte Thematik der Ressourcenschonung gelegt. Dadurch entfallen Betrachtungen z.B. zu dem Emissionsaufkommen von urbanen Strukturen oder weiteren in Kapitel 2 aufgeführten Aspekten.

Wie im einleitenden Kapitel erläutert, stellen vor allem die Emissionen, die nicht nur während der Nutzung, sondern auch durch Bau und Abbruch emittiert werden, einen wichtigen Aspekt in Nachhaltigkeitsbetrachtungen von urbanen Räumen dar. Dies geht einher mit einer Untersuchung des Verbrauchs- und Mobilitätsverhaltens der Bewohner. Insbesondere die Mobilität hat laut Du et al. wesentlichen Einfluss auf die Emissionen urbaner Strukturen [148]. Folglich sollte dieser Aspekt, vor allem für aufstrebende Schwellen- und Entwicklungsländer, Bestandteil von weiterführenden Forschungen sein.

Gebäudetypologien

In der vorliegenden Untersuchung wurden von allen möglichen Gebäudetypologien drei ausgewählt: das freistehende Einfamilienhaus, das Mehrfamilienhaus und das Hochhaus. Diese Eingrenzung führt dazu, dass z.B. Doppel- oder Reihenhäuser nicht berücksichtigt wurden, da sie lediglich eine Variation des EFH darstellen. Des Weiteren erfolgte aus der Festlegung auf Massivbauten keine Untersuchung zu Holz- oder Stahlgebäuden, da diese bislang eine Minderheit im deutschen Wohnungsbau bilden. Um die variantenreiche gebaute Umwelt repräsentativ widerzuspiegeln, sollten weiterführend auch andere Konstruktionsweisen in Untersuchungen (prozentual) integriert werden.

Für detaillierte Massenangaben besteht dringender Forschungsbedarf bei der Erfassung von Ressourcenverbräuchen unterschiedlicher Gebäudetypologien und Bauweisen. Insbesondere bei Hochhäusern hängt der Ressourcenaufwand maßgeblich von Funktionalität des Gebäudes, Bodenbeschaffenheit, Bauweise, Aussteifungssystem und nicht zuletzt Ingenieursleistung ab. Sofern die Datentransparenz für Bestands- und Neubauten durch z.B. politische Maßnahmen nicht erhöht wird, würden umfangreiche Fallstudien von EFH, MFH und Hochhäusern Anhaltspunkte für eine präzisierte Ressourcenaufstellung bieten, die den in vorliegender Dissertation festgelegten Korridor eingrenzen könnten.

Für eine belastbare Interpretation der Massenangaben ist eine einheitliche Flächenberechnung notwendig, da andernfalls keine vergleichbaren Aussagen über die tatsächliche Effizienz von Gebäuden getroffen werden können. Hier besteht dringender Handlungsbedarf, dessen

sich vereinzelte Organisationen bereits bewusst sind. Bis allgemeingültige Lösungen existieren, sind international vergleichende Aussagen stets mit einer Unschärfe behaftet, die nicht auszuräumen ist.

Durch die Festlegung auf reine Wohnbauten und Wohnquartiere entfällt eine Untersuchung von Büro- und Industriebauten oder von einer Mischnutzung innerhalb des Quartiers und innerhalb eines Gebäudes. Während EFH fast ausschließlich als reine Wohngebäude fungieren, wird bei Blockrandbebauung und Hochhäusern die Erdgeschossebene häufig anderweitig genutzt. Die Berücksichtigung dieser veränderten Flächennutzung stellt einen weiteren Forschungsaspekt dar.

Da verfügbare Fläche in Städten durch die stete Zunahme der Bevölkerung geringer wird, gewinnt der Faktor des Flächenverbrauchs und damit die Gebäudetypologie der Hochhäuser zunehmend an Relevanz. Wie die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, ist diese Gebäudetypologie deutlich ressourcenaufwendiger, wenngleich sie nur einen Bruchteil der Bodenfläche benötigt. Daraus ergibt sich für diese Gebäudetypologie weiterer Forschungsbedarf, der eine Erhöhung der Geschossflächeneffizienz und eine Reduzierung der aufgewandten Masse pro m² BGF von Hochhäusern ermöglicht. Erst durch eine Optimierung dieser Gebäudetypologie können Hochhäuser konkurrenzfähiger für ein ressourcenschonendes Bauen werden.

In vorliegender Untersuchung wurde eine einheitliche Geschosshöhe (3,50 m) für sämtliche Gebäudetypologien festgelegt. Auch hier liegt ein weiterer Untersuchungsansatz, der unterschiedliche Geschosshöhen je Gebäude berücksichtigt. Somit wäre der BRI pro Person die entsprechende Untersuchungsgröße.

Szenarien

Für die Erstellung der Szenarien wurde eine Auswahl an Parametern, die für den Ressourcenverbrauch relevant sind, festgelegt. Auch hieraus resultieren Limitationen, die aufgrund der Komplexität des urbanen Kontexts notwendig sind. Neben den untersuchten urbanen Dichten von 400, 4.000 und 20.000 EW/km² gibt es noch eine große Anzahl an weiteren möglichen urbanen Dichten, die als Grundlage für Untersuchungen angesetzt werden könnten. Allerdings können mithilfe der dokumentierten Entwurfsparameter zusätzliche Szenarien leicht nachgebildet werden.

Eine weitere, vorab festgelegte Größe ist die Wohnfläche pro Person und die Anzahl der Einwohner je Wohneinheit. Diese beiden Parameter sind hier für alle Gebäudetypologien und Szenarien identisch. Dadurch ist eine bessere Vergleichbarkeit der jeweiligen Gebäude gegeben. Es widerspiegelt jedoch nicht die tatsächliche Verteilung an Wohnfläche und Wohneinheitsgröße, da diese Eigenschaften innerhalb verschiedener Gebäudetypologien variieren und in ihrer Variation Gegenstand weiterer Forschungen sein können.

Ferner begrenzt sich die vorliegende Untersuchung ausschließlich auf die sortenreine Anordnung der drei unterschiedlichen Gebäudetypologien (EFH, MFH, Hochhaus) in drei Bebauungsstrukturen (Punkt, Zeile, Block). Andere Bebauungsstrukturen, wie beispielsweise Cluster oder Höfe in offener Bauweise, werden hier nicht betrachtet. Dies führt zu phänomenologischen Aussagen, die auch hier eine bessere Vergleichbarkeit ermöglichen. Aus städtebaulicher Sicht erstrebenswert ist hingegen eine abwechslungsreiche Bebauungs- und Nutzungsvielfalt, die das urbane Bild und das soziale Umfeld belebt und den städtischen Raum attraktiver macht.

Die gleichförmige Anwendung der Entwurfsparameter für die Szenarienerstellung führt dazu, dass z.B. eine funktionierende Erschließung der EFH bei einer Dichte von 20.000 EW/km² unter den gegebenen Konditionen nicht möglich ist, da die verfügbare Fläche überbeansprucht wird. Es kann zwar eine sehr hohe Dichte mit flacher Bebauung erreicht werden, dies geschieht allerdings vornehmlich in informellen Siedlungsstrukturen, deren Bewohner wenige m² Wohnfläche beziehen und deren Erschließungsstraßen nicht oder kaum befestigt sind.

Der systematischen Platzierung der Baukörper ist es geschuldet, dass z.B. Hochhäuser oder Baublöcke, die gewöhnlich in engerer Formation angeordnet sind, hier größere Abstände zueinander haben und daher teilweise mehr Verkehrsfläche benötigen als unter realitätsnäheren Umständen. Dies wurde jedoch aufgrund der phänomenologischen Vorgehensweise so festgelegt und bewusst zugelassen.

Verkehrsfläche

Die festgesetzten Entwurfsparameter bedingen die Verkehrsfläche zur Straßenführung. Diese ist in ihrer Geradlinigkeit ebenfalls rein phänomenologisch zu betrachten. Die Flächen sind darin auf den strömenden Verkehr zur Erschließung der Baukörper begrenzt, weshalb Flächen für den ruhenden Verkehr weder als Teil der Straßenfläche noch in Gebäuden oder Tiefgaragen in dieser Betrachtung berücksichtigt werden. Der Fußweg zwischen erschließender Straße und Haustür wurde ebenfalls nicht in die Berechnung einbezogen.

Eine weitere Limitation bei der Untersuchung der Verkehrsfläche besteht darin, dass die festgelegten Straßen keine Maximaldistanzen zwischen Kreuzungen einbeziehen, die für eine reibungslose Erschließung notwendig sind. So wird eine Distanz zwischen zwei Kreuzungen von 50 m, wie z.B. in Barcelona, als sehr fußgängerfreundlich gesehen, während es in Peking bis zu 400 m sind und die Straßenführung damit eher auf motorisierten Verkehr ausgelegt ist [144]. Nachfolgende Forschungen sollten diesen Aspekt berücksichtigen, da er für eine nachhaltige urbane Struktur durchaus von Relevanz ist, wie es auch Untersuchungen zur Integration des öffentlichen Personennahverkehrs und dessen Auswirkungen auf den Ressourcen- und Flächenverbrauch sind.

Standort

Das Betrachtungsfeld wurde in einer Industrienation, mit in Deutschland vergleichbaren Anforderungen und Bauweisen verortet, da für diesen Standort in der vorangegangenen Literaturrecherche eine bessere Datengrundlage vorzufinden war. Betrachtungen zu anderen ökonomischen bzw. bautechnischen Standards wurden daher nicht berücksichtigt. Hier eröffnet sich ein großer Bereich für weiterführende Untersuchungen, die sich mit der Verortung an unterschiedlichen Standorten mit spezifischen klimatischen und ökonomischen Anforderungen beschäftigen könnten. Besonders in den Schwellen- und Entwicklungsländern, die bis 2050 den Großteil der zusätzlichen urbanen Bevölkerung beherbergen müssen, wäre eine Analyse zum Ressourcenverbrauch der dort angewandten, unterschiedlichen Bebauungsstrukturen von großer Bedeutung.

Da bewusst kein erweiterter urbaner Kontext für das Umfeld des Betrachtungsrahmens festgelegt wurde, entfallen Aussagen zur Mobilität der Bewohner und zum erhöhten Ressourcenaufwand in Abhängigkeit von der Lage des Betrachtungsfeldes zum Ober-/Unterzentrum. Vereinzelt wurden diese Aspekte bereits in anderen Publikationen (z.B. von Peng Du in [26]) untersucht.

6 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Dissertation konzentriert sich auf ressourcenbezogene Aspekte der Nachhaltigkeit. Trotz der in Kapitel 5.3 aufgeführten Limitationen kann mit ihr ein wichtiger Beitrag zur Bewältigung der im einleitenden Kapitel beschriebenen Herausforderungen geleistet werden. Die knapper werdenden Ressourcen, in Verbindung mit einer immer weiter steigenden Weltbevölkerung verlangen nach einer Schärfung des Bewusstseins für die Verwendung von Rohstoffen, vor allem im Bausektor. Auf Grundlage der vorliegenden Arbeit können nun Ressourcenverbräuche in urbanen Wohnstrukturen abgeschätzt werden. Es wurde aufgezeigt, welche Auswirkungen die urbane Dichte und die gewählten Bebauungsstrukturen bzw. Gebäudetypologien auf die verbaute Masse haben. Die gewählte Herangehensweise ermöglicht zudem eine Anwendung der Prinzipien auf jede andere urbane Dichte. Sie bietet eine Grundlage für Planer, die damit die ressourcenbezogene Nachhaltigkeit ihrer urbanen Strukturen im Voraus abschätzen und gegebenenfalls durch Veränderung einzelner Faktoren die Auswirkungen reduzieren können.

Die wesentliche Erkenntnis aus dieser Untersuchung besteht darin, dass eine Bebauung durch 6-geschossige Mehrfamilienhäuser bei jeder Dichte die ressourcenschonendste Gebäudetypologie darstellt. Obgleich dieses Ergebnis durchaus vorhersehbar war, konnte es nun durch die vorliegende Untersuchung belegt werden. Zudem konnte die gängige Annahme widerlegt werden, dass Hochhäuser aufgrund der geringeren horizontalen Erschließungsfläche ohne weitere Optimierung eine Einsparung an Ressourcen ermöglichen. Wie die Ausführungen in Kapitel 5.2.4 zeigen, ist der Einfluss der Baukörper auf den Ressourcenverbrauch deutlich größer als derjenige der Infrastruktur.

Die weiteren, in vorliegender Arbeit erzielten Erkenntnisse zum Ressourcenverbrauch in der gebauten Umwelt und die dafür relevanten Parameter bilden zusammen die Grundlage für die Planung von ressourcenminimalen urbanen Strukturen. Gegliedert in die Antworten auf die drei Forschungsfragen werden sie im Folgenden abschließend zusammengefasst.

Welche Parameter sind für eine ressourcenspezifische Betrachtung urbaner Strukturen relevant?

Es wurden zunächst jene übergeordneten Parameter identifiziert, die für eine ressourcenspezifische Betrachtung von Relevanz sind. Dies betrifft insgesamt 14 Faktoren aus den Bereichen Bewohner, Städtebau, Ökologie und Standort.

Auswirkungen der Bewohner zeigen sich zum einen im *Wohnverhalten*, welches u.a. durch gesteigerten Wohnflächenbedarf pro Person den Ressourcenaufwand für die gebaute Umwelt erhöht. Zum anderen beeinflusst das *Mobilitätsverhalten* durch erhöhtes Verkehrsvolumen oder das *Verbraucherverhalten* durch den Konsum von Gütern den individuellen und urbanen Ressourcenverbrauch. Die *Ansprüche der Bewohner* sind als weiterer Auslöser für einen erhöhten Ressourcenverbrauch identifiziert worden, da sie die Quantität und die Qualität der gebauten Umwelt bestimmen.

Für den Städtebau sind zum einen der Parameter *Stadt- und Regionalentwicklung*, welcher die Bebauungsstruktur definiert und der Parameter *urbane Dichte*, der maßgeblich den Flächenverbrauch beeinflusst und zum anderen der Parameter *urbanes Umfeld*, welcher die Gebäudetypologien mit entsprechendem Ressourcenaufwand beinhaltet, für eine ressourcenspezifische Betrachtung von Relevanz.

Ein weiterer Parameter, der für diesen Zusammenhang grundlegend ist, ist der *Umgang mit natürlichen Ressourcen*, da dieser Parameter den Flächen- und Ressourcenverbrauch einer urbanen Struktur und seiner Bevölkerung beschreibt.

Ferner wurden sämtliche den Standort definierenden Faktoren als relevant identifiziert. Dazu zählen der Parameter *Anbindung*, der die Vernetzung im Verkehrs- oder Versorgungsnetz beschreibt, der Faktor *Geografie* und damit die geografischen Bedingungen mit entsprechender Bodenbeschaffenheit oder Rohstoffverfügbarkeit sowie der Faktor *Klima*, welcher u.a. durch erhöhte Anforderungen an die Bausubstanz den Ressourcenverbrauch beeinflussen kann. Der Parameter *Ökonomie* und damit verbunden das BIP und dessen Zuwachsrate bestimmen ebenso wie die *soziale Struktur* und beispielsweise ein gesteigertes Bevölkerungswachstum maßgeblich den Verbrauch von Rohstoffen. Auch der Parameter *Politik* kann etwa durch Anreize oder Restriktionen diesen Verbrauch lenken.

Wie verändert sich in Abhängigkeit von der Bebauungsstruktur der Ressourcen- und Flächenverbrauch von Verkehrsanlagen und Gebäuden, bei einheitlicher baulicher Dichte?

Eine zentrale Erkenntnis der vorliegenden Untersuchung besteht darin, dass es markante Unterschiede im Ressourcen- und Flächenverbrauch von verschiedenen Bebauungsstrukturen gibt. Isoliert betrachtet, als Baukörper ohne urbanen Kontext, besteht eine klare Abstufung des Ressourcen- und Flächenverbrauchs. Für den Ressourcenverbrauch gilt in aufsteigender Reihenfolge MFH (6) – MFH (4) – H20 – EFH – H40, mit absoluten Werten von 76,23 t/cap bei MFH (6) bis 135,59 t/cap bei H40. Die Variablen Effizienz der Geschossflächenausnutzung, Quadratmeter Wohnfläche pro Person und Gewicht pro m² BGF sind im Wesentlichen verantwortlich für die Bestimmung des Ressourcenaufwands pro Person. Wie die Ausführungen in Kapitel 5.1 zeigen, wirken sich diese Variablen sehr unterschiedliche auf den Ressourcenverbrauch aus. So ist es teilweise nicht ausreichend, nur eine Variable zu modifizieren, um die obige Reihenfolge zu verändern. Um das 20-geschossige Hochhaus ressourcenschonender als das 6-geschossige MFH auszubilden, müsste beispielsweise die Effizienz von 60 % auf 75 % erhöht und zudem die Tonnage pro m² BGF von 1,5 t auf 1,4 t reduziert werden.

Beim Flächenverbrauch gilt für die Baukörper: je mehr Geschosse, desto geringer der Flächenverbrauch pro Person. Daher lautet die Reihenfolge: H40 – H20 – MFH (6) – MFH (4) – EFH. Bewohner von H40 beanspruchen lediglich 1,78 m², Bewohner eines EFH 29,77 m². Neben der Geschossanzahl spielen auch die Variablen Wohnfläche pro Person sowie die Geschossflächeneffizienz eine entscheidende Rolle.

In drei unterschiedlichen Dichten (400, 4.000, 20.000 EW/km²) wurden diese Einzelgebäude weiterführend im urbanen Kontext untersucht. Die fünf Bebauungsstrukturen (EFH, Zeile, Block, H20, H40) bilden mit den drei Dichten insgesamt 15 Szenarien, die auf einem Quadratkilometer quantifiziert wurden.

Ausgehend von der ressourcenschonendsten Bebauungsart durch 6-geschossige Baublöcke variiert der Ressourcenverbrauch pro Einwohner in den Szenarien der Dichte 400 zwischen 124 % und 289 % des Vergleichswerts von 105,73 t pro Person, in den Szenarien der Dichte 4.000 zwischen 113 % und 192 % des Vergleichswerts von 92,69 t pro Person und in den Szenarien der Dichte 20.000 zwischen 107 % und 166 % des Vergleichswerts von 87,15 t pro Person.

Diese Unterschiede entstehen vorrangig aufgrund der höheren Gewichtung der Auswirkung der Baukörper im Vergleich zur Verkehrsfläche. Einzig bei Szenario 1 überwiegt der Verbrauch

durch die Straßen den durch die Baukörper. Bei Szenario 2 (Zeile) führt der erhöhte Straßenverbrauch dazu, dass der gesamte Ressourcenaufwand höher ausfällt als bei Szenario 4 (H20) und daher Szenario 2 in der Rangfolge bei dieser Dichte zurückfällt. Daraus lässt sich ableiten, dass die Verkehrsfläche den Ressourcenverbrauch zwar erhöht, jedoch meist nicht ausschlaggebend für die Rangfolge ist, die außer bei Dichte 400 stets Block – Zeile – H20 – H40 – EFH lautet. Aufgrund dieses geringen Einflusses benötigt Szenario 14 eine Verbesserung der H20-Tonnage von 1,5 t auf 1,4 t pro m² BGF und zudem, wie im Baukörpervergleich, eine Effizienzsteigerung von 60 % auf 70 %, bis es Szenario 13 in Bezug auf die verbauten Masse unterbietet.

Innerhalb einer Dichte reduziert sich der Flächenverbrauch kontinuierlich mit zunehmender Baukörperhöhe, sodass auch nach Addition der Verkehrsfläche stets das 40-geschossige Hochhaus das flächensparsamste und das EFH das flächenaufwendigste darstellt. Die Werte variieren zwischen 20,72 m² und 204,6 m² bei Dichte 400, 10,66 m² und 84,75 m² bei Dichte 4.000 und 6,57 m² und 53,70 m² bei Dichte 20.000. Für den Flächenverbrauch zeigt sich, dass – bis auf Szenario 11 und 12 – der Anteil für die Verkehrsfläche der EFH und Zeilenbebauung bei Dichte 20.000 den Anteil der Baukörperfläche teilweise sehr deutlich übersteigt. Hier hat die Verkehrsfläche also durchaus Auswirkung auf den Flächenverbrauch pro Person.

Wie verändern sich diese Ergebnisse bei veränderter baulicher Dichte?

Es kristallisierte sich heraus, dass eine urbane Struktur umso ressourcenschonender im Vergleich pro Person ist, je mehr Einwohner pro Referenzfläche sie aufnimmt. Da hier die Baukörpermassen pro Person unverändert bleiben, liegt dies in vorliegender Arbeit allein darin begründet, dass die Verkehrsfläche von mehr Einwohnern genutzt werden kann und sich damit der Anteil pro Person reduziert.

Für den Ressourcenverbrauch der Blockrandbebauung bedeutet das beispielsweise eine Ersparnis von 12 % bei einer Steigerung von 400 auf 4.000 EW/km² und weiteren 6 % bei Dichte 20.000. Für die EFH-Bebauung sind die Unterschiede noch deutlich gravierender: so werden 42 % bei der Erhöhung von 400 auf 4.000 EW/km² und bei Dichte 20.000 weitere 19 % eingespart.

Es ist bemerkenswert, dass sich bei Erhöhung der Dichte der ressourcenbezogene Vorsprung der 6-geschossigen Blockrandbebauung zur 20-geschossigen Hochhausbebauung reduziert. Dies liegt im geringeren Flächenaufwand für Verkehrsanlagen der Hochhausbebauung begründet. Da die Auswirkung der Verkehrsfläche jedoch zu gering ist und das MFH (6) eine deutlich bessere Effizienz und geringeren Materialaufwand aufweist, kann die Differenz der beiden Szenarien unter den hier gewählten Rahmenbedingungen nie vollständig ausgeglichen werden. Somit bleibt die 6-geschossige Bebauung, unabhängig von der baulichen Dichte, stets die ressourcenschonendste.

Die großen Auswirkungen der Wahl von Dichte und Bebauungsart auf den globalen Ressourcenverbrauch zeigen sich durch folgende überschlägige Rechnung: bei Anwendung des ressourcenschonendsten Szenarios, einer 6-geschossigen Blockrandbebauung bei einer Dichte von 20.000 EW/km² werden 214,4 Mrd. t an Materialien und Rohstoffen benötigt, um 2,46 Mrd. zusätzliche Menschen bis 2050 unterzubringen. Im aufwendigsten Szenario, einer EFH-Bebauung bei 400 EW/km², sind es 752,8 Mrd. t und damit 24,3 Mrd. t pro Jahr an benötigten Ressourcen. Diese Zahlen beziehen sich ausschließlich auf Wohnräume mit erschließender Infrastruktur innerhalb eines Wohnquartiers ohne ergänzende urbane Strukturen.

Es wird deutlich, dass Maßnahmen ergriffen werden müssen, die es ermöglichen, Gebäude sowohl flächen- als auch ressourcenbezogen effizienter zu gestalten und den Verbrauch von natürlichen Rohstoffen auf ein Minimum zu reduzieren. Dies ist für eine zukunftsfähige Bauindustrie von großem Wert. Die Beantwortung der Frage „How much does your building weigh?“ liefert einen ersten Schritt für ein dringend benötigtes Ressourcenbewusstsein. Während in vorliegender Arbeit aufgezeigt wurde, welche grundsätzlichen Entscheidungen von Planern und Bewohnern zu welchen ressourcenbezogenen Auswirkungen führen, könnten die erreichten Erkenntnisse und Abhängigkeiten weiterführend als Grundlage für ein computerbasiertes Tool verwendet werden. Mit dessen Hilfe könnten während des Entwurfsprozesses individuell urbane Strukturen überschlägig untersucht und miteinander verglichen werden, um so beispielsweise Zielvorgaben zur Effizienz, zum Gewicht oder zum Flächenverbrauch zu erhalten.

Es ist unbestreitbar, dass zusätzliche Forschungen notwendig sind, um Methoden zu entwickeln, die den Verbrauch von Ressourcen in der gebauten Umwelt weiter reduzieren können. Ein Konzept, das eine wirksame Methode zur Einsparung von Ressourcen darstellen könnte, ist die Verwendung von rezyklierten Baustoffen. Bereits 1969 verkündete Jane Jacobs, dass die Städte von heute die Minen der Zukunft sein werden [149]. Bekannt als Urban Mining, könnte dieser Ansatz dazu führen, dass Abbruchmaterialien nicht deponiert oder nur verwertet, sondern auch rezykliert und wiederverwendet werden [150] und das anthropogene Materialdepot, welches die gebaute Umwelt darstellt, nutzbar gemacht wird. Dafür erforderlich ist zum einen ein recyclinggerechtes Konstruieren der Gebäude, welches auf untrennbare Verbindungen verzichtet und Materialien sortenrein verwendet sowie ein Datensystem, welches die Materialbestände und -ströme dokumentiert und zugänglich macht [151].

Ein weiterer, vielversprechender Ansatz, der den Verbrauch von Beton und damit auch der knapper werdenden Ressource Sand stark reduzieren könnte, ist die Technologie des sog. Gradientenbetons [9]. Gradientenbeton ist vor allem in Betonbauteilen einsetzbar, die auf Biegung beansprucht werden. In Gebäuden zählen dazu Balken und Platten, die als Decken einen Anteil von circa 50 % der oberirdischen Gesamtmasse ausmachen [152]. Da die geometrische Form dieser Bauteile u.a. durch nutzungsbedingte Vorgaben nur begrenzt verändert werden kann, widmet sich die Technologie des Gradientenbetons erstmals den Bauteilinnenräumen. Dazu werden in die spannungsarmen Bereiche der Bauteile Hohlräume, die in Form und Größe an die Spannungszustände angepasst sind, gezielt eingefügt. Dieses Vorgehen optimiert die Bauteile dahingehend, dass 50 % und mehr ihres Eigengewichts einspart werden können [153]. Allein durch diesen Ansatz könnten für die hier ermittelte ressourcenaufwendigste Gebäudetypologie H40 mindestens 27,2 t[4] Beton pro Bewohner eingespart werden. Angewandt auf die 20-geschossigen Hochhäuser dieser Untersuchung ist eine Einsparung von 20,1 t[5] pro Person möglich, wodurch bei Dichte 20.000 die H20-Bebauung zur ressourcenschonendsten Bebauungstypologie würde.

[4] Diese Zahl berechnet sich wie folgt: 128,13 t*0,85*0,5*0,5; hierbei ist 128,13 t die Betonmasse pro Person für H40; 85 % der Anteil der Gebäudemasse ohne Fundament; 50 % der Anteil der Decken an dieser oberirdischen Masse und 50 % die Mindestersparnis durch Gradientenbeton. Dadurch bedingte, weiterführende Einsparungen beispielsweise in den lastabtragenden Elementen bleiben hier unberücksichtigt.

[5] Nach Formel in Fußnote 4

Die zwei genannten Beispiele zeigen, dass es bereits aussichtsreiche Ansatzpunkte für ein ressourcenschonenderes Bauen gibt, welche die in vorliegender Arbeit ermittelten Ressourcenverbräuche maßgeblich reduzieren können. Nur durch ein fundamentales Umdenken, einen Paradigmenwechsel, wird es der Baubranche möglich sein, die Herausforderungen der Zukunft umweltverträglich und nachhaltig zu bewältigen.

Literatur

[1] F. Kraas, C. Leggewie, und P. Lemke, *Der Umzug der Menschheit: die transformative Kraft der Städte*. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, 2016.

[2] United Nations Department of Economic and Social Affairs, „World urbanization prospects: the 2018 revision - Excel-Tabellen", 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://population.un.org/wup/Download/.

[3] United Nations, *World economic situation and prospects as of mid-2019*. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2019.

[4] M. Fischer-Kowalski *et al.*, *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth*. Kenya, UNEP: United Nations Environment Programme, International Resource Panel, 2011.

[5] M. Kondo *et al.*, „Direct solar energy", in *Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, O. Edenhofer, Hrsg. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, S. 333–400.

[6] *Statistisches Jahrbuch Deutschland 2018*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2018.

[7] P. Icha und G. Kuhs, *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2019.

[8] H. J. Schellnhuber, *Selbstverbrennung: die fatale Dreiecksbeziehung zwischen Klima, Mensch und Kohlenstoff*, 1. Aufl. München: Bertelsmann, 2015.

[9] W. Sobek, „Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume", in *Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach*, S. Scheerer und U. van Stipriaan, Hrsg. Dresden: Technische Universität, Institut für Massivbau, 2016, S. 62–76.

[10] W. Sobek, „Buildings as renewable power plants: active houses for the electric city", in *Urban energy transition: renewable strategies for cities and regions*, 2. Aufl., P. Droege, Hrsg. Amsterdam: Elsevier, 2018, S. 131–138.

[11] M. Curbach, „Bauen für die Zukunft", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 108, Nr. 11, S. 751, 2013.

[12] *Zahlen und Daten - Zementindustrie in Deutschland 2019*. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2019.

[13] United Nations Environment Programme, „Sand, rarer than one thinks", UNEP Global Environmental Alert Service, Nairobi, 2014.

[14] V. Smil, *Making the modern world: materials and dematerialization*. Chichester: Wiley, 2014.

[15] *Mineral commodity summaries 2019*. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2019.

[16] Adrian Smith + Gordon Gill Architecture, *Residensity: a carbon analysis of residential typologies*. Chicago, 2018.

[17] A. Quantrill, „Review: How much does your building weigh, Mr. Foster? by Norberto Lopez Amado and Carlos Carcas, directors", *Journal of the Society of Architectural Historians*, Bd. 72, Nr. 1, S. 96–97, 2013.

[18] W. Coprian, Hrsg., *FINDEX Bau: facettenartiges Indexierungssystem für das Bauwesen; eine systematische Begriffssammlung zum Ordnen und Suchen von Bauinformationen*, 2. Aufl. Stuttgart: IRB Verlag, 1985.

[19] *Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies*, 3rd edition New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2007.

[20] J. Libbe, Hrsg., *Indikatorensysteme für eine nachhaltige Entwicklung in Kommunen: Dokumentation der Beiträge zu einem Seminar des Deutschen Instituts für Urbanistik am 8. und 9. Februar in Berlin*. Berlin: Deutsches Institut für Urbanistik, 1999.

[21] M. Korda, *Städtebau: Technische Grundlagen*, 5., neubearbeitete Auflage Wiesbaden: Vieweg Teubner, 2005.

[22] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hrsg., *Verkehr in Zahlen 2017/18*. Hamburg: DVV Media Group, 2017.

[23] Umweltbundesamt, „Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr - Bezugsjahr 2016", 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen-0. [Zugegriffen: 27.04.2018].

[24] Sachverständigenrat für Umweltfragen, Hrsg., *Verantwortung in einer begrenzten Welt: Umweltgutachten 2012*. Berlin: E. Schmidt, 2012.

[25] Umweltbundesamt, „Radverkehr", *Nachhaltige Mobilität*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/nachhaltige-mobilitaet/radverkehr. [Zugegriffen: 31.07.2018].

[26] P. Du, „Environmental and social sustainability implications of downtown high-rise vs. suburban low-rise living: a Chicago case study", PhD Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago, 2015.

[27] Statistisches Bundesamt, „Wohnfläche je Einwohner - Quadratmeter", *Deutschland in Zahlen*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.deutschlandinzahlen.de/tab/deutschland/ infrastruktur/gebaeude-und-wohnen/wohnflaeche-je-einwohner.

[28] *LBS - Markt für Wohnimmobilien 2017*. Berlin: Bundesgeschäftsstelle Landesbausparkassen, 2017.

[29] *Entwicklung der Privathaushalte bis 2035: Ergebnisse der Haushaltsvorausberechnung 2017*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2017.

[30] U. Bigalke, A. Armbruster, F. Lukas, O. Krieger, C. Schuch, und J. Kunde, *Der dena-Gebäudereport 2016: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur, 2016.

[31] *China statistical yearbook 2012*. Beijing: National Bureau of Statistics of China, 2012.

[32] L. Hong, N. Zhou, D. Fridley, W. Feng, und N. Khanna, „Modeling China's building floor-area growth and the implications for building materials and energy demand", in *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, August 17-22, 2014, Pacific Grove, CA*, 2014.

[33] M. Isaac und D. P. van Vuuren, „Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change", *Energy Policy*, Bd. 37, Nr. 2, S. 507–521, 2009.

[34] *DGNB-Kriterium SOC1.6: Freiraum*, Gesundheit, Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit (SOC10). Stuttgart: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, 2016.

[35] S. Hutter-von Knorring, Hrsg., *Grünplanung in München*. München: Landeshauptstadt München, Referat für Stadtplanung und Bauordnung, 2005.

[36] H. Bott, G. C. Grassl, S. Anders, und M. Altmann, *Nachhaltige Stadtplanung: Konzepte für nachhaltige Quartiere*, 1. Aufl. München: Detail, Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, 2013.

[37] S. Lutter, S. Giljum, M. Lieber, und C. Manstein, *Die Nutzung natürlicher Ressourcen: Bericht für Deutschland 2016*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2016.

[38] Statistisches Bundesamt, „Durchschnittlicher Pro-Kopf-Rohstoffverbrauch im Leben eines Bundesbürgers im Jahr 2010 (in Tonnen)", *Statista*, 2012. [Online]. Verfügbar unter:

https://de.statista.com/statistik/daten/studie/246380/umfrage/durchschnittlicher-pro-kopf-rohstoffverbrauch-im-leben-eines-bundesbuergers/.

[39] International Energy Agency, Hrsg., *World energy balances 2018*. Paris: OECD Publishing, 2018.

[40] U. R. Fritsche und U. Eberle, „Treibhausgasemissionen durch Erzeugung und Verarbeitung von Lebensmitteln", Öko-Institut e.V., Darmstadt, Hamburg, Arbeitspapier, 2007.

[41] J. Bruinsma, „The resource outlook to 2050: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050?", in *Expert Meeting on How to Feed the World in 2050, June 24-26, 2009, Rome*, 2009.

[42] United Nations, „World population prospects 2019", *United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://population. un.org/wpp/DataQuery/.

[43] A. Jering *et al.*, *Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2013.

[44] Brockhaus, „Städtebau", *Brockhaus Enzyklopädie*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://brockhaus.de/ecs/enzy/article/st%C3%A4dtebau.

[45] *DGNB-Kriterium SOC3.2: Soziale und funktionale Mischung*, Soziokulturelle Qualität (SOC30). Stuttgart: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, 2016.

[46] *DGNB-Kriterium ECO2.1: Resilienz und Wandlungsfähigkeit*, Wertentwicklung (ECO20). Stuttgart: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, 2016.

[47] L. Bernstein, R. K. Pachauri, und A. Reisinger, *Klimaänderung 2007: Synthesebericht*, Deutsche Übersetzung hrsg. von der Deutschen IPCC-Koordinierungsstelle. Berlin, 2008.

[48] *DGNB-Kriterium PRO1.2: Integrale Planung*, Qualität der Planung (PRO10). Stuttgart: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, 2016.

[49] *DGNB-Kriterium PRO1.7: Partizipation*, Qualität der Planung (PRO10). Stuttgart: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, 2016.

[50] M. Hegger, C. Fafflok, J. Hegger, und I. Passig, *Aktivhaus - the reference work: from passivhaus to energy-plus house*. Berlin, Boston: Birkhäuser, 2017.

[51] The City of New York, City Planning Commission, „Zoning resolution - web version", 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www1.nyc.gov/assets/planning/download/pdf/zoning/zoning-text/allarticles.pdf?v=1120. [Zugegriffen: 06.12.2018].

[52] V. Magnago Lampugnani, T. K. Keller, und B. Buser, Hrsg., *Städtische Dichte*. Zürich: Verl. Neue Zürcher Zeitung, 2007.

[53] A. Raschka und M. Carus, „Stoffliche Nutzung von Biomasse: Basisdaten für Deutschland, Europa und die Welt; F+E-Projekt aus dem Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit", nova-Institut GmbH, Hürth, Teilbericht, 2012.

[54] P. Gamba und M. Herold, Hrsg., *Global mapping of human settlement: experiences, datasets, and prospects*. Boca Raton: CRC Press, 2009.

[55] Center for International Earth Science and Information Network, „Urban-rural population and land area estimates, version 2 - Excel-Tabelle", *NASA Socioeconomic Data and Application Center*, 2013. [Online]. Verfügbar unter: https://doi.org/10.7927/H4MW2F2J. [Zugegriffen: 19.11.2019].

[56] Z. Liu, C. He, Y. Zhou, und J. Wu, „How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion", *Landscape Ecology*, Bd. 29, Nr. 5, S. 763–771, 2014.

[57] E.-H. Ritter, Hrsg., *Handwörterbuch der Raumordnung*, 4., neu bearbeitet Auflage Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung, 2005.

[58] H. Heineberg, F. Kraas, und C. Krajewski, *Stadtgeographie*, 4., aktualisierte und erweiterte Auflage Paderborn: Schöningh, 2014.

[59] J. Winkelhaus *et al.*, *Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2017.

[60] S. Steger, M. Fekkak, und S. Bringezu, „Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen: Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.3 des Projekts ‚Materialeffizienz und Ressourcenschonung' (MaRess)", Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal, 2011.

[61] G. Schiller *et al.*, *Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2015.

[62] Umweltbundesamt, „Abfallaufkommen", *Ressourcen und Abfall*, 2013. [Online]. Verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen.

[63] A. Müller, „Baustoffrecycling", *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, Bd. 63, Nr. 11–12, S. 224–230, 2011.

[64] „Mineralische Bauabfälle Monitoring 2014: Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2014", Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden, Berlin, 2017.

[65] Industrieverband Steine und Erden Baden-Württemberg e.V., *Jahresbericht 2018/2019*. Ostfildern, 2019.

[66] J. Kosmol und J. Kanthak, Hrsg., *Glossar zum Ressourcenschutz*, Stand Januar 2012. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2012.

[67] M. Swilling, B. Robinson, S. Marvin, und M. Hodson, *City-level decoupling: urban resource flows and the governance of infrastructure transitions*. Nairobi: United Nations Environment Programme, International Resource Panel, 2013.

[68] S. Salat *et al.*, „The weight of cities: resource requirements of future urbanization", United Nations Environment Programme, International Resource Panel, Nairobi, 2018.

[69] T. M. Baynes und J. K. Musango, „Estimating current and future global urban domestic material consumption", *Environmental Research Letters*, Bd. 13, Paper Nr. 065012, 2018.

[70] C. Deilmann, N. Krauß, K. Gruhler, und J. Reichenbach, „Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau: Endbericht Stand 17. Juli 2014, Forschungsprogramm Zukunft Bau", Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, Dresden, 2014.

[71] A. Kirby und K. Landmark, *Desertification: a visual synthesis*. Bonn, Geneva: United Nations Convention to Combat Desertification, Zoi Environment Network, 2011.

[72] Umweltbundesamt, „Indikator: Siedlungs- und Verkehrsfläche", *Umwelt-Indikatoren*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/indikator-siedlungs-verkehrs flaeche.

[73] „Umwelt - Städte und Ballungsräume - Eurostat-Daten im Datenportal der EU", 26-März-2019. [Online]. Verfügbar unter: https://data.europa.eu/euodp/de/data/dataset/z09AxCCo0J3k5X dxzhqsXA. [Zugegriffen: 26.03.2019].

[74] *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundesimmissionsschutzgesetz - BImSchG)*. 1974.

[75] O. Edenhofer, Hrsg., *Climate change 2014: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, NY: Cambridge University Press, 2014.

[76] Umweltbundesamt, „Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2016 - Excel-Tabelle", 2018. [Online]. Verfügbar unter:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2017_12_ 18_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_thg_v1.0.xlsx. [Zugegriffen: 19.11.2019].

[77] *Klimaschutzbericht 2017: zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2018.

[78] Umweltbundesamt, „Wirkungen auf die Gesundheit", *Luft*, 2013. [Online]. Verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-die-gesundheit. [Zugegriffen: 07.08.2018].

[79] Umweltbundesamt, „Umgebungslärmrichtlinie", *Verkehr - Lärm*, 2013. [Online]. Verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/umgebungslaermrichtlinie.

[80] „Bericht der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat über die Durchführung der Richtlinie über Umgebungslärm gemäß Artikel 11 der Richtlinie 2002/49/EG", Europäische Kommission, Brüssel, März 2017.

[81] Umweltbundesamt, „Erschütterungen", *Verkehr - Lärm*, 2013. [Online]. Verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/laermwirkung/erschuetterungen.

[82] Deutscher Wetterdienst, „Stadtklima", *Wetterlexikon*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=102558.

[83] Naturschutzbund Deutschland, „Stadtklima, was ist das? Hintergrundinformationen zum Lokalklima in Städten", *Ressourcenschonung - Bauen*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/ressourcenschonung/bauen/stadtklima/stadtklima.html.

[84] V. John, S. Gut, und H. Wallbaum, „Hoch oder quer? Ökologische Lebenszyklusanalyse eines Hochhauses im Vergleich zu einem Riegelbau", *Bauingenieur*, Bd. 85, Nr. 7/8, S. 341–352, 2010.

[85] P. Bertoldi *et al.*, „Buildings", in *Climate change 2014: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY: Cambridge University Press, 2014, S. 671–738.

[86] OECD, „Real GDP long-term forecast", *OECD iLibrary*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oecd-ilibrary.org/economics/real-gdp-long-term-forecast/indicator/english_d927bc18-en.

[87] A. N. D. Saldivar-Sali, „A global typology of cities: classification tree analysis of urban resource consumption", Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2010.

[88] Umweltbundesamt, „Ressourcenschonung in der Umweltpolitik", *Abfall - Ressourcen*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/ ressourcenschonung-in-der-umweltpolitik.

[89] „World Fertility Report 2015", United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, ST/ESA/SER.A/415, 2017.

[90] C. Böhme, T. Preuß, A. Bunzel, B. Reimann, A. Seidel-Schulze, und D. Landua, „Umweltgerechtigkeit im städtischen Raum - Entwicklung von praxistauglichen Strategien und Maßnahmen zur Minderung sozial ungleich verteilter Umweltbelastungen", Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Forschungsbericht, 2015.

[91] European Commission, „Housing space per person", *European Commission - Energy*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/energy/en/content/housing-space-person.

[92] Eurostat, „EU - Durchschnittliche Haushaltsgröße in den Mitgliedsstaaten im Jahr 2017 (in Personen pro Haushalt)", *Statista*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/ statistik/daten/studie/350573/umfrage/haushaltsgroesse-in-den-eu-laendern/.

[93] United Nations, „Population density and urbanization", *United Nations Statistics Division - Demographic and Social Statistics*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://unstats.un.org/ unsd/demographic/sconcerns/densurb/densurbmethods.htm.

[94] „The urban and rural classifications", in *Geographic areas reference manual*, U.S. Department of Commerce, Hrsg., Suitland, MD: U.S. Census Bureau, 1994, S. 12.1-12.24.

[95] *Statistischer Bericht - Bevölkerung in Berlin 2017*. Potsdam: Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, 2018.

[96] *Statistisches Jahrbuch Hamburg 2018/19*. Hamburg: Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2019.

[97] Stadt Köln, „2015 Fläche Dichte Einwohner Gesamt", *Offene Daten Köln*, 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://www.offenedaten-koeln.de/dataset/28b8e786-edde-4744-b245-13439 e9c1ed8/ resource/e948b316-b720-448c-b970-8e4cda471731#{} [Zugegriffen: 09.01.2019]

[98] muenchen.de, „München in Zahlen", *Sehenswürdigkeiten*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.muenchen.de/sehenswuerdigkeiten/muenchen-in-zahlen.html.

[99] Magistrat der Stadt Wien, *Wien in Zahlen*. Wien: Dezernat Statistik Wien, 2017.

[100] Ayuntamiento de Madrid, *La ciudad de Madrid en cifras*. Madrid: Area de Gobierno de Economia y Hacienda, 2017.

[101] K. Hynková, H. Kynclová, und E. Kyzlíková, *Do you know Prague? The city in maps, graphs and figures*. Prague: Prague Institute of Planning and Development, 2015.

[102] *La popolazione di Roma: struttura e dinamica demografica, anno 2016*. Roma: Ragioneria Generale - I Direzione „Sistemi informativi di pianificazione e controllo finanziario" - U.O. Statistica, 2017.

[103] Institut national de la statistique et des études économiques, „Comparateur de territoire – Département de Paris (75)", *Statistiques et études*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=DEP-75.

[104] Ajuntament de Barcelona, *Barcelona data sheet 2018: main economic indicators for the Barcelona area*. Barcelona: Barcelona Activa, 2018.

[105] *Stuttgarter Einwohnerdaten*, Ausgabe 2018. Stuttgart: Landeshauptstadt Stuttgart, Statistisches Amt, 2018.

[106] Philippine Statistics Authority, „Philippine population density (based on the 2015 census of population)", *Population and housing*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://psa.gov.ph/content/philippine-population-density-based-2015-census-population. [Zugegriffen: 19-Nov-2019].

[107] A. Albert, J. P. Heisel, K.-J. Schneider, und A. Goris, *Bautabellen für Architekten: mit Entwurfshinweisen und Beispielen*, 23. Aufl. Köln: Bundesanzeiger-Verlag, 2018.

[108] C. Reicher, *Städtebauliches Entwerfen*, 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.

[109] T. Haag *et al.*, *Raumpilot*, 4 Bände. Stuttgart, Ludwigsburg: Krämer, Wüstenrot-Stiftung, 2010.

[110] E. Neufert und J. Kister, *Bauentwurfslehre: Grundlagen, Normen, Vorschriften über Anlage, Bau, Gestaltung, Raumbedarf, Raumbeziehungen, Maße für Gebäude, Räume, Einrichtungen, Geräte*, 38., vollständig überarbeitete und aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2005.

[111] B. Bielefeld und P. J. Fröhlich, *Flächen – Rauminhalte: DIN 277 und alle relevanten Richtlinien - Kommentar, Erläuterungen, Bildbeispiele*, 17. Aufl. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019.

[112] Davis Langdon & Everest, „High-rise office towers - Cost model, May 1997", *Building*, 31.12.1998.

[113] Davis Langdon & Everest, M. Green, W. Arup, „Cost model: Tall buildings - Costs of building a 48-storey tower in Central London", *Building*, 06.09.2002.

[114] L. Hemphill und J. L. C. Lim, „Residential property measurement practice: evidence from world regions; report for Royal Institution of Chartered Surveyors", London, 2016.

[115] *BKI-Objektdaten, Reihe N - Neubau, Bd. 16*. Stuttgart: BKI-Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, 2018.

[116] R. Bechmann, *Hochhäuser der Werner Sobek AG*. Persönliches Interview, geführt von der Verfasserin, 2018.

[117] J. Eisele und E. Kloft, Hrsg., *Hochhaus-Atlas: Typologie und Beispiele, Konstruktion und Gestalt, Technologie und Betrieb*. München: Callwey, 2002.

[118] G. König und S. Liphardt, „Hochhäuser aus Stahlbeton", *Beton-Kalender*, Bd. 92, Nr. 1, S. 1–69, 2003.

[119] *Der Landkreis Cham: Zahlen, Daten & Fakten*, 13., aktualisierte und neu gestaltete Aufl. Cham: Landratsamt Cham, 2017.

[120] *Kreisfreie Stadt München 09 162: eine Auswahl wichtiger statistischer Daten*. Fürth: Bayerisches Landesamt für Statistik, 2019.

[121] Mobil in Deutschland, „Länge des Straßennetzes in deutschen Großstädten im Jahr 2015 (in Kilometern)", *Statista*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/ daten/studie/429371/umfrage/laenge-der-strassen-in-deutschen-grossstaedten/.

[122] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsausschuss Stadtstraßen, Hrsg., *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt 06)*, Korrigierter Nachdruck Mai 2012. Köln: FGSV-Verl, 2012.

[123] G. Schiller, C. Dellmann, K. Gruhler, und P. Röhm, *Ermittlung von Ressourcenschonungs-potenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2010.

[124] D. Walberg, O. Brosius, T. Schulze, und A. Cramer, *Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden: Vergleich von massiven Bauweisen mit Holzfertigbauten aus kostenseitiger, bautechnischer und nachhaltiger Sicht*. Kiel: Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen, 2015.

[125] H. Lehmann und C. Stanetzky, „Zukunftsfähiges Bauen heißt Ressourcennutzung optimieren", in *Das Wuppertal-Haus: Bauen und Wohnen nach dem Mips-Konzept*, Basel: Birkhäuser, 1999, S. 16–21.

[126] A. Müller, „Das Rohstoffpotenzial von Bauabfällen", in *Müllhandbuch digital*, Stand 03/13., Berlin: Schmidt, 2013, Nr. 1691.

[127] A. Müller, Rückantwort auf E-Mail Anfrage der Verfasserin mit dem Titel: Nachfrage zu Ihrer Publikation "Das Rohstoffpotenzial von Bauabfällen", 02-Sep-2019.

[128] M. M. Ali, *Art of the skyscraper: the genius of Fazlur Khan*. New York, NY: Rizzoli, 2001.

[129] Council on Tall Buildings and Urban Habitat, „The skyscraper center: global tall building database of the CTBUH“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: http://www.skyscrapercenter.com/ compare-data/submit?type%5B%5D=building&status%5B%5D=COM&function%5B%5D= residential&base_region=1&base_country=0&base_city=0&base_height_range=0&base_company=All&base_min_year=1980&base_max_year=2019&comp_region=1&comp_country =0&comp_city=0&comp_height_range=2&comp_company=All&comp_min_year=1980& comp_max_year=2019&skip_comparison=on&output%5B%5D=list&output%5B%5D=material&dataSubmit=Show+Results. [Zugegriffen: 15.06.2019].

[130] A. S. S. Rizk, „Structural design of reinforced concrete tall buildings“, *CTBUH Journal*, Nr. 1, S. 34–41, 2010.

[131] P. Foraboschi, M. Mercanzin, und D. Trabucco, „Sustainable structural design of tall buildings based on embodied energy“, *Energy and Buildings*, Bd. 68, Nr. Part A, S. 254–269, 2014.

[132] A. Miatto, H. Schandl, T. Fishman, und H. Tanikawa, „Global patterns and trends for non-metallic minerals used for construction“, *Journal of Industrial Ecology*, Bd. 21, Nr. 4, S. 924–937, 2017.

[133] *Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C25/30; EPD-IZB-2013421-D, ausgestellt am 26.07.2013, gültig bis 25.07.2018*. Erkrath: Informations-Zentrum Beton GmbH, 2013.

[134] *Umwelt-Produktdeklaration Zement: EPD-VDZ-20170026-IAG1-DE, ausgestellt am 01.03.2017, gültig bis 28.02.2022*. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2017.

[135] *Umwelt-Produktdeklaration Mauerziegel: EPD-AMZ-20140244-ICG1-DE, ausgestellt am 26.08.2015, gültig bis 25.08.2020*. Bonn: Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V., 2015.

[136] M. Hegger, V. Auch-Schwelk, M. Fuchs, und T. Rosenkranz, *Baustoff Atlas*. Basel, Berlin, Boston: de Gruyter, 2012.

[137] *Umwelt-Produktdeklaration Baustähle: Offene Walzprofile und Grobbleche; EPD-BFS-20180116-IBG2-DE, ausgestellt am 25.10.2018, gültig bis 24.10.2023*. Düsseldorf: bauforumstahl e.V., 2018.

[138] *DIN EN 573-3:2009-08 Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen*. 2009.

[139] *Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C45/55: EPD-IZB-20180099-IBG1-DE, ausgestellt am 03.09.2018, gültig bis 02.09.2023*. Erkrath: InformationsZentrum Beton GmbH, 2018.

[140] D. Richter und M. Heindel, *Straßen- und Tiefbau: mit lernfeldorientierten Projekten*, 10., vollständig überarbeitete und aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Teubner, 2008.

[141] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, Hrsg., *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12)*, Ausgabe 2012. Köln: FGSV-Verl, 2012.

[142] R. Bull-Wasser, H. Schmidt, und H.-H. Weßelborg, *ZTV/TL Asphalt-StB: Ausgabe 2007/Fassung 2013; Handbuch und Kommentar*, Stand August 2014. Bonn: Kirschbaum-Verl., 2014.

[143] *Handbuch Eurocode 1 - Einwirkungen: Band 1: Grundlagen, Nutz- und Eigenlasten, Brandeinwirkungen, Schnee-, Wind-, Temperaturlasten*, 1. Aufl., vom DIN autorisierte konsolidierte Fassung. Berlin: Beuth, 2012.

[144] S. Salat, F. Labbé, und C. Nowacki, *Cities and forms: on sustainable urbanism*. Paris: CSTB Urban Morphology Laboratory, Hermann, 2011.

[145] *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2018*. Düsseldorf: Verein Deutscher Zement-werke e.V., 2019.

[146] S. Mangold und T. Zschau, „In search of the "good life": the appeal of the tiny house lifestyle in the USA", *Social Sciences*, Bd. 8, Nr. 1, Paper Nr. 26, 2019.

[147] B. Hochstetter, „Wohnsituation in Baden-Württemberg - Ergebnisse der Mikrozensus-Zusatzerhebung 2014", *Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg*, Nr. 7, S. 37–43, 2017.

[148] P. Du und A. Wood, „Downtown high-rise vs. suburban low-rise living: a pilot study on urban sustainability", Chicago, IL, CTBUH Research Report, 2017.

[149] J. Jacobs, *The economy of cities*. New York: Random House, 1969.

[150] W. Sobek, H. Trumpf, und F. Heinlein, „Recyclinggerechtes Konstruieren im Stahlbau", *Stahlbau*, Bd. 79, Nr. 6, S. 424–433, 2010.

[151] F. Heisel und S. Rau-Oberhuber, „Calculation and evaluation of circularity indicators for the built environment using the case studies of UMAR and Madaster", *Journal of Cleaner Production*, Bd. 243, Paper Nr. 118482, 2020.

[152] T. Berger, P. Prasser, und H. G. Reinke, „Einsparung von Grauer Energie bei Hochhäusern", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 108, Nr. 6, S. 395–403, 2013.

[153] D. Schmeer und W. Sobek, „Gradientenbeton", in *Beton Kalender 2019*, K. Bergmeister, F. Fingerloos, und J.-D. Wörner, Hrsg. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2019, S. 455–476.

[154] OECD, „Ziel der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung", 2018. [Online]. Verfügbar unter: http://www.oecd.org/berlin/dieoecd/.

[155] S. Gut, „Ökologischer Nachhaltigkeitsvergleich zwischen Riegelgebäude und Hochhaus bezüglich des statischen Systems", Masterarbeit, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 2010.

Abbildungen

Abbildung 1: Informelle Siedlungen in Kairo, Ägypten 1
Abbildung 2: Untersuchungsobjekte der Studie *Residensity* [16] 3
Abbildung 3: Inhaltlicher Aufbau der Arbeit 6
Abbildung 4: Graphische Übersicht der Parameter erster und zweiter Hierarchie 8
Abbildung 5: Vergleich der Wegzeiten, innerorts, erstellt nach [25] 10
Abbildung 6: Entwicklung des Wohnraums pro Person von 1990-2016 in Deutschland und China auf Basis von [27], [31], grau gestrichelt: lineare Trendlinie China bis 2016 11
Abbildung 7: Korrelation m² Wohnfläche und BIP pro Person, erstellt nach [33] 12
Abbildung 8: Bevölkerungsentwicklung in Städten weltweit seit 1950, Hochrechnung bis 2035, erstellt auf Grundlage der Daten aus [2] 12
Abbildung 9: Durchschnittlicher Pro-Kopf-Rohstoffverbrauch im Leben eines Bundesbürgers im Jahr 2010 (in Tonnen), erstellt nach [38] 14
Abbildung 10: Recyclingquoten der deutschen Bauabfälle, erstellt nach [64] 21
Abbildung 11: Materialverbrauch in urbanen Strukturen pro Jahr gegliedert nach Weltregionen [68] 23
Abbildung 12: Flächennutzung von ausgewählten Städten, erstellt nach [73] 24
Abbildung 13: Anbindung gemäß Zentrale-Orte-Konzept nach Christaller, erstellt nach [57] 26
Abbildung 14: Korrelation urbanes DMC und BIP pro Person, erstellt nach [68] 29
Abbildung 15: Unterschiedliche Bebauungsstrukturen; von links nach rechts: London, Prag, Los Angeles, Bern; Zeichnungen der Verfasserin, erstellt auf Grundlage von Google maps. 41
Abbildung 16: Bebauungsstrukturen: Punkt, Baublock, Zeile 41
Abbildung 17: Gebäudetypologien nach M. Korda [21] 42
Abbildung 18: Schematische Darstellung der gewählten Bebauungsstrukturen mit entsprechenden Gebäudetypologien 43
Abbildung 19: BGF auf Grundlage von DIN 277-1:2016-01 45
Abbildung 20: Grundrisse (maßstabslos) zweier Hochhäuser, links: Vergleichsgebäude 6100/0537 BKI [115], 19 Geschosse; rechts: ADAC Zentrale, 24 Geschosse [116] 47
Abbildung 21: Vergleich der Effizienzangaben, Werte von Davis Langdon & Everest auf Basis von [112] und [113]; gemittelte Datenpunkte mit interpolierten Linien 49
Abbildung 22: EFH - links: Baukörper, rechts: Grundriss (maßstabslos) 50
Abbildung 23: Zeile - links: schematische Darstellung des Baukörpers, rechts: exemplarischer Grundriss eines Einzelgebäudes (maßstabslos) 51
Abbildung 24: Schematische Darstellung eines Baublocks (maßstabslos) 52
Abbildung 25: Exemplarischer Grundriss eines 3-Spänners (maßstabslos) 52
Abbildung 26: 20- und 40-geschossiges Hochhaus, oben links: exemplarische Grundrissaufteilung eines Regelgeschosses mit identisch großen Wohneinheiten, unten: schematische Darstellung der Baukörper 53

Abbildung 27: Exemplarische Querschnitte der vier Straßentypologien; Zeichnungen maßstablos 56

Abbildung 28: Vier der insgesamt neun Untersuchungsgebäude aus der Studie *Residensity* [16] 59

Abbildung 29: Korridor für EFH und MFH 2-6 Geschosse ±20 % von den festgelegten Ausgangswerten 60

Abbildung 30: Premium for height, erstellt nach Fazlur Khan [128] 62

Abbildung 31: DAR's Formula mit gestrichelt dargestelltem Korridor, angewandt auf 22-60 geschossige Hochhäuser [130], Datenpunkte aus Foraboschi et al. [131] 63

Abbildung 32: Gesamtgewichtsverlauf für Hochhäuser in t/m² BGF; Vergleichswerte aus [16] und [84] 64

Abbildung 33: Ressourcenverbrauch der fünf untersuchten Bebauungstypologien pro Person 67

Abbildung 34: Ausschnitt aus RStO-12 [141] mit zutreffenden Bauklassen und angenommenen Schichten 69

Abbildung 35: Übersicht der fünf unterschiedlichen Bebauungsarten für eine Dichte von ±400 EW/km²: links: Rastereinteilung, Mitte: Schwarzplan, rechts: Erschließungsplan, alle Zeichnungen maßstabslos, genordet 74

Abbildung 36: Szenario 1: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 75

Abbildung 37: Szenario 2: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 76

Abbildung 38: Szenario 3: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 77

Abbildung 39: Szenario 4: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 78

Abbildung 40: Szenario 5: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 79

Abbildung 41: Übersicht der fünf unterschiedlichen Bebauungsarten für eine Dichte von ±4.000 EW/km²: links: Rastereinteilung, Mitte: Schwarzplan, rechts: Erschließungsplan, alle Zeichnungen maßstabslos, genordet 80

Abbildung 42: Szenario 6: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 81

Abbildung 43: Szenario 7: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 82

Abbildung 44: Szenario 8: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 83

Abbildung 45: Szenario 9: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 84

Abbildung 46: Szenario 10: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 85

Abbildung 47: Übersicht der fünf unterschiedlichen Bebauungsarten für eine Dichte von ±20.000 EW/km², links: Rastereinteilung, Mitte: Schwarzplan, rechts: Erschließungsplan, Zeichnungen maßstabslos, genordet 86

Abbildung 48: Szenario 11: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 87

Abbildung 49: Szenario 12: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 88

Abbildung 50: Szenario 13: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 89

Abbildung 51: Szenario 14: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 90

Abbildung 52: Szenario 15: links: Rastereinteilung, Mitte: Baukörperplatzierung, rechts: Straßenverlauf 91

Abbildung 53: Korrelation zwischen Geschossflächeneffizienz und Gewicht pro Einwohner. Als Vergleichswert dient der Ressourcenverbrauch eines MFH (6) bei 68 % Effizienz und 1,3 t/m² BGF 95

Abbildung 54: Korrelation zwischen Ressourcenaufwand pro m² BGF und -verbrauch pro Person. Als Vergleichswert dient der Ressourcenverbrauch eines MFH (6) bei 68 % Effizienz und 1,3 t/m² BGF 96

Abbildung 55: Korrelation zwischen Wohnfläche pro Person und Ressourcenverbrauch pro Person. Als Vergleichswert dient der Ressourcenverbrauch eines MFH (6) bei 68 % Effizienz und 1,3 t/m² BGF 97

Abbildung 56: Korrelation zwischen den einzelnen Einflussfaktoren des Ressourcenverbrauchs pro Einwohner 98

Abbildung 57: Ressourcen- und Flächenverbrauch pro Person für die einzelnen Baukörper dieser Untersuchung (Datenbereiche zwischen den Erhebungspunkten sind linear interpoliert) 99

Abbildung 58: Korrelation zwischen den einzelnen Einflussfaktoren des Flächenverbrauchs pro Einwohner 100

Abbildung 59: Ressourcenverbrauch pro Person für Gebäude und Straßen der Dichte 400 (Datenbereiche zwischen den Erhebungspunkten sind linear interpoliert)..... 103

Abbildung 60: Ressourcenverbrauch für Gebäude und Straßen der Dichte 4.000 pro Person (Datenbereiche zwischen den Erhebungspunkten sind linear interpoliert)..... 105

Abbildung 61: Ressourcenverbrauch für Gebäude und Straßen der Dichte 20.000 pro Person (Datenbereiche zwischen den Erhebungspunkten sind linear interpoliert)..... 108

Abbildung 62: Ressourcenverbrauch der drei untersuchten urbanen Dichten (Datenbereiche zwischen den Erhebungspunkten sind linear interpoliert) 109

Abbildung 63: Flächenverbrauch der drei untersuchten urbanen Dichten (Datenbereiche zwischen den Erhebungspunkten sind linear interpoliert) 110

Tabellen

Tabelle 1: Parameterabhängigkeiten, 1= direkter Einfluss der Spalte auf die Zeile, 0= sekundärer, indirekter Einfluss 32

Tabelle 2: Parameteruntersuchung mit Zuordnung von Maßeinheiten; R = direkte oder indirekte Auswirkung auf den Verbrauch von natürlichen Ressourcen innerhalb urbaner Strukturen 34

Tabelle 3: Einwohnerdichten pro km² der vier deutschen und weiterer europäischer Millionenstädte 39

Tabelle 4: Eigenschaften der Bebauungstypologien 43

Tabelle 5: Verhältnis Netto-/Bruttofläche [112] 45

Tabelle 6: Gebäudeeffizienz (vermietbare Fläche/BGF) [113] 45

Tabelle 7: Untersuchte Hochhäuser mit verfügbaren Flächenangaben 47

Tabelle 8: Angaben zu NUF und NGF für die weiteren Untersuchungen (Mittelwerte); Angaben zu NUF und NGF in % von der jeweiligen BGF 48

Tabelle 9: Kennzahlen eines EFH aus vorliegender Untersuchung 50

Tabelle 10: Kennzahlen einer Zeile aus vorliegender Untersuchung 51

Tabelle 11: Kennzahlen eines Baublocks aus vorliegender Untersuchung 52

Tabelle 12: Kennzahlen eines 20- und 40-geschossigen Hochhauses aus vorliegender Untersuchung 54

Tabelle 13: Zusammenfassung der relevanten Kennzahlen für die fünf unterschiedlichen Baukörper (BK) 54

Tabelle 14: Flächenbedarf in m²/EW für fließenden Verkehr in Wohngebieten; erstellt auf Basis von [21] 55

Tabelle 15: Gewicht in t/m² BGF für EFH und MFH in vorliegender Untersuchung 60

Tabelle 16: Materialzusammensetzung von EFH/MFH Bauzeit 1978-1999 nach [126] 60

Tabelle 17: Materialzusammensetzung EFH/MFH 61

Tabelle 18: Gewicht in t/m² für 20- und 40-geschossigen Wohnhochhäuser in dieser Untersuchung 65

Tabelle 19: Materialaufstellung 20- und 40-geschossiges Hochhaus 65

Tabelle 20: Materialverbrauch EFH gesamt, je WE, EW und m² NUF 66

Tabelle 21: Materialverbrauch vier MFH (4) in Zeilenstruktur gesamt, je WE, EW und m² NUF 66

Tabelle 22: Materialverbrauch 12 MFH (6) in Blockrandbebauung gesamt, je WE, EW und m² NUF 66

Tabelle 23: Materialverbrauch 20-geschossiges Hochhaus gesamt, je WE, EW und m² NUF 66

Tabelle 24: Materialverbrauch 40-geschossiges Hochhaus gesamt, je WE, EW und m² NUF 67

Tabelle 25: Aufstellung der Baustoffbestandteile 68

Tabelle 26: Bauklassen und Oberbaueigenschaften je Straßentyp [141] 69

Tabelle 27: Ressourcenaufwand nach Bauklasse je m² Straßenfläche 70

Tabelle 28: Festgelegte Anzahl der Baukörper (BK) und Einwohner (EW) für die fünf zu untersuchenden Bebauungsformen in den drei gewählten urbanen Dichten 400, 4.000, 20.000 EW/km²..... 72

Tabelle 29: Massen- und Flächenaufstellung der EFH-Bebauung bei einer urbanen Dichte von 400 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE) 75

Tabelle 30: Massen- und Flächenaufstellung der Zeilenbebauung bei einer urbanen Dichte von 422,4 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE) 76

Tabelle 31: Massen- und Flächenaufstellung der Blockbebauung bei einer urbanen Dichte von 475,2 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE) 77

Tabelle 32: Massen- und Flächenaufstellung der 20-geschossigen Hochhausbebauung bei einer urbanen Dichte von 352 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)..... 78

Tabelle 33: Massen- und Flächenaufstellung der 40-gedschossigen Hochhausbebauung bei einer urbanen Dichte von 528 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)..... 79

Tabelle 34: Massen- und Flächenaufstellung der EFH-Bebauung bei einer urbanen Dichte von 3.999,6 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE) 81

Tabelle 35: Massen- und Flächenaufstellung der Zeilenbebauung bei einer urbanen Dichte von 4.048 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE) 82

Tabelle 36: Massen- und Flächenaufstellung der Blockrandbebauung bei einer urbanen Dichte von 4.276,8 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)..... 83

Tabelle 37: Massen- und Flächenaufstellung der 20-geschossigen Hochhausbebauung bei einer urbanen Dichte von 4.000 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE) 84

Tabelle 38: Massen- und Flächenaufstellung der 40-geschossigen Hochhausbebauung bei einer urbanen Dichte von 4.224 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE) 85

Tabelle 39: Massen- und Flächenaufstellung der EFH-Bebauung bei einer urbanen Dichte von 20.000,2 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)..... 87

Tabelle 40: Massen- und Flächenaufstellung der Zeilenbebauung bei einer urbanen Dichte von 19.993,6 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)..... 88

Tabelle 41: Massen- und Flächenaufstellung der Blockrandbebauung bei einer urbanen Dichte von 20.000 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE)..... 89

Tabelle 42: Massen- und Flächenaufstellung der 20-geschossigen Hochhausbebauung bei einer urbanen Dichte von 20.064 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE) 90

Tabelle 43: Massen- und Flächenaufstellung der 40-geschossigen Hochhausbebauung bei einer urbanen Dichte von 20.064 EW/m²: gesamt, je Einwohner (EW) und je Wohneinheit (WE) 91

Tabelle 44: Baukörpermassen und -flächen pro Person je Bebauungstypologie 93

Tabelle 45: Absolutwerte pro Person der Szenarien 1-5; Angaben zum Flächenverbrauch in m², zum Ressourcenverbrauch in t 102
Tabelle 46: Absolutwerte pro Person der Szenarien 6-10; Angaben zum Flächenverbrauch in m², zum Ressourcenverbrauch in t 105
Tabelle 47: Absolutwerte pro Person der Szenarien 11-15; Angaben zum Flächenverbrauch in m², zum Ressourcenverbrauch in t 107

Anhang

Anhang 1 OECD Länder zum Stand 12/2018 [154]:

Australien, Belgien, Chile, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Israel, Italien, Japan, Kanada, Korea, Lettland, Litauen, Luxemburg, Mexiko, Neuseeland, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakische Republik, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich, Vereinigte Staaten

Anhang 2 EFH und MFH Vergleichsgebäude aus BKI [115]

NUF: Nutzungsfläche; TF: Technikfläche; VF: Verkehrsfläche; NGF: Netto-Grundfläche, KGF: Konstruktions-Grundfläche; BGF: Brutto-Grundfläche

EFH Gebäude Verhältnis NUF, TF, VF, NGF, KGF zu BGF

BKI Gebäude	NUF	TF	VF	NGF	KGF	BGF m²
6100-0977	65	2,9	10,5	78,4	21,6	331,19
6100-0963	64,9	5,2	1,9	78	28	210
6100-0930	66,7	1,6	9,8	78,1	21,9	269,7
6100-0803	62,2	2,7	6,9	71,7	28,3	311,04
6100-0416	74,1	1,1	9,2	84,4	15,6	283,56
6100-0333	64,9	-	14,1	79	21	213
6100-0696	66,5	1,1	11,8	79,4	20,6	407,63
6100-0733	71	1,1	7,8	79,9	20,1	264,09
6100-0747	62,6	1,2	10,8	74,6	25,4	323,8
6100-0748	68,4	1,3	8,2	77,8	22,2	219,8
6100-0755	76,8	3,7	2,4	82,9	17,1	188,06
6100-0822	62,2	2,9	11,5	76,6	23,4	209
6100-0833	61,7	3,5	12,4	77,5	22,5	267,39
6100-0834	57	-	16,6	73,7	26,4	232,85
6100-0860	60,5	5,4	8,5	74,3	25,7	226,17
6100-0869	63,1	5,8	6,2	75,1	24,9	350,33
6100-0876	75	0,4	6,7	82,1	17,9	268
6100-0894	72,5	4,8	12,2	89,5	10,5	295
6100-0900	81,8	0,2	4,6	86,5	13,5	244,62
6100-0955	68,8	4,1	6,5	79,4	20,6	299,25
6100-1376	63,1	2,6	10,2	75,9	24,1	201,08
6100-1364	63,5	1,7	12,7	77,9	22,1	236,74
6100-1358	60,2	0,9	10,7	71,8	28,2	266,34
6100-1324	67,3	3,6	11,5	82,4	17,6	215,36
6100-1315	59,4	2,5	15,9	77,8	22,2	229,12
6100-1309	62,9	5,6	8,4	76,8	23,2	272,4
6100-1295	67,9	1,3	7,7	76,8	23,2	298
6100-1288	77,2	2,6	3,2	83	17	248,26
6100-0565	66,7	1	14	81,7	18,3	251,54

6100-0547	74,7	0,8	11,6	87,1	12,9	197,98
6100-0292	67,9	3	12,7	83,5	16,5	210,27
6100-0285	65,1	0,5	13,1	78,6	21,4	287,3
6100-0274	63,7	3,2	14	80,9	18,1	201,35
6100-0255	74,2	-	7,6	81,9	18,1	346
6100-0150	61	2,6	11,5	75,1	24,9	313
Durchschnitt	**66,87**	**2,53**	**9,81**	**79,15**	**21,00**	**-**

3- bis 4-geschossige Gebäude Verhältnis NUF, TF, VF, NGF, KGF zu BGF

BKI Gebäude	NUF	TF	VF	NGF	KGF	BGF m²
6100-1347	57,0	1,2	21,3	79,4	20,6	2270,75
6100-1292	58,4	3,8	18	80,2	19,8	1575
6100-1198	58,7	0,8	26,5	86,1	13,9	2287,13
6100-1130	63,0	1,5	13,4	77,8	22,2	2338,57
6100-1129	62,5	2,3	14,2	79,0	21,0	1522,03
6100-1070	72,0	1,5	14,7	88,3	11,7	1726,16
6100-0732	71,7	1,0	12,0	84,6	15,4	3019,08
6100-0573	64,5	1,8	18,1	84,4	15,6	1280,72
6100-0241	66,8	3,4	16,3	86,5	13,5	984,28
6100-0217	81,9	0,7	5,5	88,0	12,0	1006,51
6100-0077	69,4	0,5	19,5	89,4	10,6	2841,24
6100-0016	73,7	2,7	9,0	85,3	14,7	2365
6100-0005	72,3	3,2	8,7	84,2	15,8	1231
6100-1313	72,6	1,4	7,7	81,7	18,3	1459
6100-1258	64,9	1,5	18,7	85,1	14,9	1744,77
6100-1235	77,6	1,2	7,1	85,9	14,1	1901,4
6100-1186	77,3	1,2	6,2	84,8	15,2	1513,74
6100-0994	64,5	1,0	19,1	84,5	15,5	1702,9
6100-0893	77,8	2,8	7,6	88,2	11,8	1322,87
6100-0706	72,0	0,8	12,8	85,6	14,4	1092,9
6100-0705	68,9	1,4	17,3	84,6	12,4	2624,2
6100-0335	68,3	0,9	20,4	89,6	10,4	2069,3
6100-0057	65,3	0,8	21,4	84,5	12,5	1915
6100-0006	69,5	1,4	6,1	77,0	23,0	1204
6100-1366	65,6	1,6	14,6	81,9	18,1	2149,24
6100-1290	66,5	1,1	14,0	81,6	18,4	5318,18
6100-0243	74,5	0,8	6,5	81,8	18,2	6509,91
6100-0240	80,2	0,6	9,0	89,7	10,3	9747,39
6100-0154	69,9	0,5	12,7	83,2	16,8	1642
6100-0067	72,9	0,8	2,3	76,0	24,0	3699
6100-0063	75,7	0,7	4,9	81,3	18,7	3290
Durchschnitt	**69,55**	**1,45**	**13,08**	**83,88**	**15,93**	**-**

5- bis 7-geschossige Gebäude, Verhältnis NUF, TF, VF, NGF, KGF zu BGF

BKI Gebäude	NUF	TF	VF	NGF	KGF	BGF m²
6100-1319	68,5	1,6	8,5	78,7	21,3	1357,7
6100-1157	78,0	0,6	5,6	84,1	15,9	3040
6100-1108	67,4	1,8	11,7	81,0	19,0	1838,63
6100-1061	63,6	1,3	14,5	79,4	20,6	2733,7
6100-0800	62,7	1,3	20,3	84,3	15,7	2101
6100-0515	65,8	0,7	16,3	82,7	17,3	2350,4
6100-0089	58,3	0,9	32,3	91,5	8,5	2304,78
6100-1371	62,5	1,6	16,9	81,3	18,7	10712,31
6100-1321	81,5	2,0	4,7	88,1	11,9	19443,23
6100-0242	67,3	1,4	17,2	85,9	14,1	4175,6
6100-0231	67,1	1,2	13,9	82,2	17,8	2503,18
6100-1163	72,7	3,0	8,5	84,2	15,8	1487,83
6100-0997	63,5	1,3	17,5	82,3	17,7	3352,39
6100-0952	68,3	-	10,3	78,6	21,4	1549,3
6100-0047	73,5	0,8	13	87,2	12,8	4763
6100-1161	68,6	1,7	8,2	78,5	21,5	2147,5
6100-1073	60,1	2,0	23,4	85,5	14,5	3197
6100-0003	73,3	0,9	11,0	85,2	14,8	4470
6100-0002	71,1	3,5	10,2	84,7	15,3	5684
Durchschnitt	**68,09**	**1,53**	**13,89**	**83,44**	**16,56**	**-**

Anhang 3 Berechnung Flächenverbrauch Gemeindestraßen Deutschland

Fahrbahn-breite in m	Prozentuale Verteilung der Straßenlängen von 1970	Prozentsatz von 1970 ange-wandt auf 600.000 km Gemein-destraßen 2012	Fläche in km²
3	36,9 %	221.638	665
4,5	28,1 %	168.525	758
5,6	19,1 %	114.818	643
6,7	9,1 %	54.309	364
10,5	6,8 %	40.710	427
Summe			**2.858**

Anhang 4 Daten aus der Studie Residensity *[16], alle absoluten Werte in t*

	Mid-Rise		Low-Rise		Courtyard	
Geschosse	38		20		4	
BGF m²	42.896		24.300		3.756	
	Absolut	Prozent	Absolut	Prozent	Absolut	Prozent
Fundament - Bewehrung	375,0 t	0,78 %	270,6 t	0,83 %	81,3 t	1,39 %
Fundament - Beton	6.979,2 t	14,57 %	4.961,8 t	15,24 %	1.417,7 t	24,17 %
Beton	39.092,74 t	81,62 %	26.416,49 t	81,12 %	3.399,71 t	57,95 %
Bewehrungsstahl	883,22 t	1,84 %	621,57 t	1,91 %	72,81 t	1,24 %
Fassade	402,48 t	0,84 %	155,13 t	0,48 %	5,07 t	0,09 %
CMU Betonblöcke	138,53 t	0,29 %	109,69 t	0,34 %	364,11 t	6,21 %
Ziegel	-	-	-	-	503,97 t	8,59 %
Dämmung	0,34 t	0,001 %	2,20 t	0,01 %	0,63 t	0,01 %
Gipsplatten	-	-	26,02 t	0,08 %	21,08 t	0,36 %
Lamellenpaneele	24,40 t	0,05 %	-	-	-	-
Summe in t	**47.895,9**		**32.563,5**		**5.866,3**	
t/m²	**1,12**		**1,34**		**1,56**	

	Three Flat		Urban Single-Family		Suburban Single-Family	
Geschosse	3		2		2	
BGF m²	554		216		233	
	Absolut	Prozent	Absolut	Prozent	Absolut	Prozent
Fundament - Bewehrung	8,8	0,85 %	5,6	1,96 %	5,4	1,93 %
Fundament - Beton	152,7	14,91 %	98,1	34,29 %	93,9	33,64 %
Beton	610,93	59,66 %	70,39	24,59 %	86,12	30,85 %
Bewehrungsstahl	25,04	2,45 %	1,71	0,60 %	2,05	0,73 %
Fassade	0,81	0,08 %	0,09	0,03 %	0,11	0,04 %
CMU Betonblöcke	88,35	8,63 %	23,13	8,08 %	12,40	4,44 %
Ziegel	130,74	12,77 %	61,20	21,38 %	55,62	19,93 %
Dämmung	0,16	0,02 %	0,73	0,26 %	0,50	0,18 %
Gipsplatten	5,44	0,53 %	4,52	1,58 %	3,50	1,25 %
OSB-Platten	-	-	5,25	1,83 %	5,78	2,07 %
Holz	1,08	0,11 %	6,92	2,42 %	8,62	3,09 %
Dach	-	-	8,53	2,98 %	5,13	1,84 %
Summe in t	**1.024,0**		**286,2**		**279,1**	
t/m²	**1,85**		**1,33**		**1,20**	

Anhang 5 Materialbestandteile aus Lehmann/Stanetzki [125], alle absoluten Werte in t

Ausgewählte Materialbestandteile eines EFH und eines MFH Baujahr 1969 – 1977 aus Lehmann/Stanetzki: Zukunftsfähiges Bauen [125]:

	EFH		**MFH (4)**	
Geschosse	1,5		4	
BGF m²	180		1.440	
Material	Absolut	Prozent	Absolut	Prozent
Ortbeton	136,1	34,25 %	680,40	40,53 %
Estrich	30,24	7,61 %	151,20	9,01 %
Mörtel	27,25	6,86 %	103,55	6,17 %
Steine	145,22	36,55 %	455,02	27,10 %
Vormauerwerkziegel	22,66	5,70 %	191,56	11,41 %
Dachziegel	13,90	3,50 %	--	
Fliesen	1,40	0,35 %	22,40	1,33 %
Mineralwolle	0,86	0,22 %	5,21	0,31 %
Holz	8,32	2,09 %	22,66	1,35 %
Eisen	9,48	2,38 %	35,83	2,13 %
Farben	0,85	0,21 %	3,23	0,19 %
Teer	0,91	0,23 %	4,67	0,28 %
PVC	0,19	0,05 %	3,04	0,18 %
Summe in t	**397,35**		**1.678,77**	
t/m²	**2,21**		**1,17**	

Anhang 6 Materialaufstellung, Datenerhebung aus [84], [155] alle absoluten Werte in t

	Hochhaus	
Geschosse	22	
BGF m²	15.308	
	Absolut	Prozent
Beton	16.106,90	65,69%
Bewehrung	922,35	3,76%
Fundament Beton	4.756,40	19,40%
Fundament Bewehrung	301,33	1,23%
gedämmte Bodenfläche	3,2	0,01%
gedämmte Außenwand*	2.102,4	8,57%
gedämmte Dachfläche	162,4	0,66%
Fenster, Holz-Alu, 3-fach Isolierverglasung	83,4	0,34%
Prallscheiben 4 mm	80,16	0,33%
Summe in t	**24.518,53**	
t/m²	**1,60**	

*Die gedämmte Außenwand besteht zu 94 % aus Beton