

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN



Munich School of Engineering

Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Erfassung und Steuerung von Stoffströmen im urbanen
Wohnungsbau –
Am Beispiel der Wohnungswirtschaft in München-Freiham

Matthias Arnold Heinrich

Vollständiger Abdruck der von der Munich School of Engineering der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
2. Prof. Dr.-Ing. Natalie Eßig
Hochschule München

Die Dissertation wurde am 17.10.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Munich School of Engineering am 11.03.2019 angenommen.

*„Es kommt nicht darauf an, die Zukunft vorherzusagen, sondern auf die Zukunft
vorbereitet zu sein.“*

Perikles (um 500 – 429 v. Chr.)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für nachhaltiges Bauen (ZNB) und dem Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) an der Technischen Universität München (TUM) unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Werner Lang. Ohne Unterstützung vieler akademischer Lehrer und Betreuer wäre sie mir nicht möglich gewesen und es gilt für mich, einer Reihe an Personen meinen Dank auszudrücken.

Es war zunächst der leider allzu früh verstorbene Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser, der das zur Doktorarbeit eingereichte Thema genehmigte, auf Grund seines überraschenden Ablebens jedoch den Fortschritt der Arbeit nicht mehr verfolgen konnte. Insbesondere in den Anfangsphasen dieser Arbeit war er maßgeblich an deren Entstehung beteiligt. Dabei hat er mir die Chance gegeben, mich am Lehrstuhl für Bauphysik zu etablieren. Mit vielen Kolleginnen und Kollegen verbindet mich eine dankbare Erinnerung an ihn.

Besonderer Dank gilt meinem Erstbetreuer, Prof. Dr.-Ing. Werner Lang, der mir nach dem Tod Prof. Hausers einen unkomplizierten Wechsel an den von ihm geleiteten Lehrstuhl ermöglichte, die für mich stets angenehme Betreuung meiner Arbeit übernahm und mir dabei auch die nötigen Freiräume genehmigte.

Prof. Dr.-Ing. Natalie Eßig, als Zweitbetreuerin meiner Arbeit, möchte ich dafür danken, dass Sie mich 2012 in die Nachhaltigkeitsgruppe des Lehrstuhls für Bauphysik der TUM aufgenommen hat. Ihrem Engagement ist zu verdanken, dass meine Arbeit mit einem Stipendium der Munich School of Engineering (MSE) im Programm des TUM Applied Technology Forums für drei Jahre unterstützt wurde. In diesem Zusammenhang bedanke ich mich besonders bei Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher und Dr. Christiane Hamacher.

Meiner Mentorin Prof. Dr.-Ing. Isabell Nemeth danke ich für die fachliche und mentale Unterstützung. Bei Prof. Dr.-Ing. Thomas Lützkendorf möchte ich mich für die unzähligen Diskussionen, die fachliche Beratung und nützlichen Hinweise bedanken. Trotz eines vollen Terminkalenders hatte er stets für meine Fragen ein offenes Ohr.

Bei der Landeshauptstadt München und seinen Mitarbeitern bedanke ich mich für die Bereitstellung der referatsübergreifenden Daten, die zur Validierung des in dieser Arbeit entwickelten Modells hinzugezogen wurden.

Weiterer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen, die in zahlreichen Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie für Ihre Unterstützung. In besonderem Maß gilt dieser Dank meiner Ehegattin Ilse, die mir in den gefühlten tausenden Stunden der Arbeit mit viel Geduld den Rücken freigehalten hat und mit ihrer therapeutischen Expertise mich immer wieder aufgefordert hat, am Schreibtisch eine ergonomische Sitzhaltung einzunehmen. Ohne sie hätte ich diese Arbeit nicht abgeschlossen.

Kurzfassung

Zur Förderung der Kreislaufwirtschaft (zirkuläre Ökonomie) und der Ressourceneffizienz im Bauwesen werden Informationen zum Verbleib und Auftreten von Stoffströmen (z. B. Rohstoffen, Baustoffen, Abfällen etc.), sowie der materiellen Zusammensetzung des Gebäudebestands benötigt. Dadurch können beispielsweise Prognosen zum Auftreten potentieller Sekundärrohstoffe (z. B. Recyclingbaustoffe) erstellt, sowie Verwertungsstrategien und Stellschrauben für eine gezielte Steuerung (Stoffstrommanagement) identifiziert werden.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines ganzheitlichen, dynamischen Stoffstrommodells zur Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung des Wohngebäudebestands (Rohstoffkataster) und die durch den urbanen Wohnungsbau ausgelösten Stoffströme. Hierbei wurden materielle Kennwerte auf Gebäude-, Bauteil- und Baustoffebene mit geometrischen Kennwerten aus 3D-Stadtmodellen verknüpft, um den IST-Zustand abzubilden. Dieser dient als Basis für die weiteren Berechnungen (z. B. Anteil an verwertbaren Massen, Bauabfällen, Systemverluste etc.).

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell wurde anhand des Stadtteils München / Freiham, eines der größten Stadtentwicklungsgebiete in Deutschland, validiert. Es hat sich gezeigt, dass rund 2,2 Mio. t Baustoffe in den Wohngebäuden des Untersuchungsraums gebunden sind. Davon sind rund 48 % Betone und 24 % Mauersteine. Rund 5 % des untersuchten Bestands bestehen aus Metallen, mit einem derzeitigen Gegenwert von ca. € 20,4 Mio. Rund 50 % der Gesamtmasse sind in Mehrfamilienhäusern der Baualtersklassen 1958 - 1968 (31 %) und 1969 - 1978 (19 %) gebunden.

Anhand des Fallbeispiels konnten die Potentiale von ausgeglichenen Massenbilanzen (Selbstversorgungsgrad urbaner Räume) aufgezeigt werden. Unter den gewählten Voraussetzungen, kann ab ca. 2036 eine autarke Versorgung mit Stahl und ab ca. 2031 mit RC-Splitt zur Produktion für RC-Beton für den Wohnungsbau im Untersuchungsraum sichergestellt und sogar ein Überschuss bereitgestellt werden.

Durch das Wissen zum Verbleib (geographisches und zeitliches Auftreten und Bedarf) von Stoffen kann ein gezielter Einsatz von Sekundärrohstoffen aus dem Bestand forciert werden. Ein systematisches Stoffstrommanagement (z. B. hochwertige Verwertung vor Ort) in urbanen Räumen weist daher ein hohes Potential auf, den Anteil sekundärer Ressourcen zu erhöhen und den Einsatz primärer Ressourcen und Transporte zu verringern. Für eine Umsetzung in die Praxis wird ein gemeinsamer Datenraum (z. B. fortlaufende Datenbank zur materiellen Gebäudezusammensetzung) benötigt, um den Informationsaustausch zwischen den einzelnen Akteuren zu optimieren und das Angebot und die Nachfrage nach Stoffen aufeinander abzustimmen.

Abstract

To promote the circular economy and resource efficiency in the construction industry, information on material flows (e. g. raw materials, building materials, waste, etc.) and the material composition of the building stock is needed. Through this knowledge for example, the occurrence of potential secondary raw materials (e. g. recycled building materials) can be forecast. Furthermore, systematic recovery and utilisation strategies can be identified and further developed (material flow management).

This work describes the development of a holistic and dynamic material flow model for the determination of the material composition of the housing stock (material cadastre) and the associated material flows triggered by urban housing. Material characteristics at building-, component- and material level were combined with geometric data from 3D city models to represent the current condition. This information serves as the basis for further calculations (e. g. proportion of recyclable masses, construction waste, system losses, etc.).

The model developed in this work was validated on the basis of the district of Munich / Freiham, one of the largest urban developments in Germany. It has been shown that around 2.2 million tonnes of building materials are currently bound within the residential buildings of the focus area. Of these, around 48 % are concrete and 24 % bricks. Approximately 5 % of the examined stock consists of metals, with a current equivalent value of approximately € 20.4 million. About 50 % of the total mass is bound in apartment buildings of the age groups 1958 - 1968 (31 %) and 1969 - 1978 (19 %).

Based on the case study, the potentials of mass balances (self-sufficiency of urban spaces with materials) could be demonstrated. Under the chosen conditions, it is possible to achieve a self-sufficient supply of steel from about 2036 for the construction of housing within the focus area and from about 2031 with recycled aggregate for the production of recycled concrete.

By knowing the whereabouts (geographical and temporal occurrence and demand) of materials, a targeted use of secondary raw materials from the building stock can be enforced. Systematic material flow management (e. g. high-quality on-site recycling) in urban areas therefore has a high potential to increase the share of secondary resources and to reduce the use of primary resources and transports. In order to be put these measures into practice, a common data space (e. g. continuously updated database on material composition of buildings) is needed to optimize the exchange of information between the different actors along the value chain and to coordinate the supply and demand for materials.

Zusammenfassung

Den Kreislauf schließen - Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft sieht vor, eine kreislaforientierte Wirtschaft zu forcieren. Hierbei gilt es den Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen so lang wie möglich zu erhalten und dabei so wenig Abfall wie nur möglich anfallen zu lassen. Dies ist ein wesentlicher Beitrag zu den Bemühungen der EU, um eine nachhaltige, ressourceneffiziente, CO₂-arme und wettbewerbsfähige Wirtschaft zu schaffen (Europäische Kommission 2015, S. 2).

Das Bauwesen ist einer der ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren. Weltweit werden 40 % aller Rohstoffe in diesem Bereich verwendet und ein Viertel der CO₂ Emissionen ausgestoßen (Becqué et al. 2016, S. 19). In Deutschland werden pro Jahr - neben einer Vielzahl an unterschiedlichsten Rohstoffen - mehr als eine halbe Milliarde Tonnen mineralische Rohstoffe für Bautätigkeiten eingesetzt (BBS 2016, S. 22). Im anwachsenden Gebäudebestand haben sich allein in Deutschland inzwischen 15 - 16 Mrd. t Baustoffe angesammelt. Unter Berücksichtigung des Tiefbaus (z. B. Straßen) ist ein Rohstofflager von fast 29 Mrd. t. (355 t/Person) entstanden (Schiller et al. 2015, S. XXXf).

Die genaue Zusammensetzung, Mengen und derzeitigen Standorte der gebundenen Stoffe sind nicht ausreichend bekannt. Nur zu einem vergleichsweise geringen Anteil wurden die durch Bautätigkeiten ausgelösten Stoffströme und -lager bisher räumlich erfasst. Um Dynamik und Verhalten von Systemen (z. B. urbaner Raum, Gebäude, Bauteil etc.) besser zu verstehen und zu optimieren ist es unerlässlich, die derzeitigen Stoffströme und -lager zu erfassen und Stellschrauben für eine gezielte Steuerung zu identifizieren (gezieltes Stoffstrommanagement). Diese Informationen bieten die Basis für die Etablierung einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft (zirkuläre Ökonomie), das Sicherstellen der Versorgungssicherheit von Roh- und Baustoffen sowie weiteren Anwendungsbereichen.

Eine systematische und integrale Bewirtschaftung des entstandenen Rohstofflagers mit dem Ziel, aus langlebigen Produkten (z. B. Gebäude) Sekundärrohstoffe zu gewinnen wird als *Urban Mining* (auch *Stadtschürfung* oder *Bergbau im urbanen Raum*) bezeichnet. Dabei kommt es darauf an, möglichst früh, idealerweise vor Inverkehrbringen eines Produkts, Stoffströme zu prognostizieren und zukünftige Verwertungswege zu identifizieren (Müller et al. 2017, S. 1), (Brunn 2017, S. 26).

Durch die Vielzahl der im Bauwesen verwendeten Stoffe, die in gegenseitiger Abhängigkeit stehen, ist eine Erfassung der Stoffströme und -lager ein aufwendiges und interdisziplinäres Unterfangen. Daher wurde der Fokus dieser Untersuchung bewusst auf den urbanen Wohnungsbau gelegt, dessen Bereitstellung (bzw. Bedarfsdeckung) insbesondere für wachsende Regionen und Metropolregionen (z. B. München) eine zunehmende Herausforderung darstellt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher eine Methode zur Erfassung der Stoffströme und -lager des Wohnungsbaus in urbanen Räumen in allen Phasen der Wertschöpfungskette entwickelt (integrales Stoffstrommodell für Wohngebäude). Zur Validierung des Modells wurde als Fallbeispiel der stark wachsende Münchner Stadtteil Freiam gewählt.

Erfassung von nationalen Baustoffstoffströmen

Zur Ermittlung und Quantifizierung der für das Bauwesen relevanten Stoffströme (indirekt und direkt), Identifizierung der Abhängigkeiten (z. B. Einflussfaktoren) und Bestimmung der jährlich akkumulierten Massen im Bauwerksbestand wurden in einem ersten Schritt die gängigsten Stoffströme auf nationaler Ebene ermittelt. Hierbei wurde auf eine überwiegend auf statistischen Daten basierende Auswertung zurückgegriffen.

Für alle in dieser Arbeit betrachteten Stoffe wurde ein Wachstum des durch unseren Gebäudebestand repräsentierten Stofflagers (Bauwerksbestand) verzeichnet. Dabei ist erkennbar, dass mehr Stoffe für die Erstellung und den Erhalt von Bauwerken verwendet werden, als bei Abgängen (z. B. Rückbau) anfallen (Input > Output). Dies ist bei mineralischen Baustoffen ausgeprägter als bei Metallen und liegt unter anderem an den höheren Verwertungsraten und geringeren Sammelverlusten im Vergleich zu mineralischen Stoffen. Es ist daher unter momentanem Wirtschaften nicht möglich, auf nationaler Ebene eine ausgeglichene Massenbilanz (Input = Output) für das Bauwesen anzustreben, geschweige denn von einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft zu sprechen. Die Verwendung von Primärrohstoffen lässt sich daher weiterhin nicht vermeiden, sie lässt sich aber reduzieren.

Rund 98 % der verwendeten Stoffe im Bauwesen (Deutschland) sind mineralischen Ursprungs (2 % Metalle). Der Anteil am nationalen Gesamtverbrauch liegt bei ca. 80 %. Bei den untersuchten Metallen werden rund 11 - 31 % im Bauwesen eingesetzt, mit Ausnahme von Zink dessen Anteil 78 % beträgt. Bei den mineralischen Stoffen werden beispielsweise mehr als doppelt so viel Beton, Ziegel und Ziegeltone eingesetzt, als aus dem Bestand freigesetzt werden. Bei den untersuchten Metallen (Ausnahme Zink) kann durchschnittlich maximal 50 % des Bedarfs aus anfallenden Bauabfällen gedeckt werden, bei Aluminium maximal 60 %.

Bei nationaler Betrachtung kann keine Aussage getroffen werden, an welchem Standort (geographisch) ein Stoff gebraucht bzw. aus dem Bestand freigesetzt wird und welche Logistik (z. B. Transporte, Aufbereitungsanlagen, Deponien), die einer ortsgebundenen Betrachtung unterliegt, benötigt wird. Demnach wurden die auf nationaler Ebene erhobenen Daten, als Basis für teilraumspezifische Analysen (z. B. urbaner Raum) verwendet.

Erfassung von teilraumspezifischen Baustoffströmen

Wie sich im Laufe der Arbeit gezeigt hat, bewegen sich unterschiedliche Stoffe innerhalb unterschiedlich großer Bezugsräume (z. B. international, national, regional etc.). Beispielsweise wird Kies innerhalb regionaler Bezugsräume gehandelt - im Gegensatz dazu erfolgt der Handel mit Metallen international.

Bei der regionalen Betrachtung (Raum München) wurde festgestellt, dass alleine die Kosten für Rohstoffbereitstellung, Transporte, Aufbereitung und Deponierung - selbst innerhalb des gleichen Bezugsraums - einer großen Spanne unterliegen. Hier zeigt sich nochmals die Notwendigkeit Stoffkreisläufe auf regionaler und lokaler Maßstabebene zu betrachten, um gezielt Standortentscheidungen für Unternehmen, Aussagen zu Anlagenkapazitäten (z. B. Deponien, Recyclinganlagen etc.) und Verwertungs- und Versorgungswegen zu machen.

Daher wurden die regionalen und urbanen Einflüsse der durch Bauleistungen ausgelösten Stoffströme untersucht. Hierbei wurden Anlagenstandorte der

„Wertschöpfungskette Bau“ (z. B. Recyclinganlagen, Deponien), der Einfluss der Transporte, Transportdistanzen und Infrastruktur ermittelt. Des Weiteren wurde die Erstellung eines Rohstoffkatasters (Bestandserfassung des Stofflagers) für Wohngebäude anhand von 3D-Stadtmodellen beschrieben, das als Basis für weitere stoffstromrelevante Untersuchungen in dieser Arbeit dient.

Erfassung von gebäudespezifischen Baustoffströmen

Zur Ermittlung von Stoffströmen und -lagern auf der Gebäudeebene wurden stoffspezifische und geometrische Gebäude-, Bauteil- und Baustoffkennwerte untersucht und gebildet (z. B. Materialintensität [z. B. $\text{kg}/\text{m}^3_{\text{BRI}}$ oder $\text{kg}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$). Dabei wurde die stoffliche Zusammensetzung von Wohngebäuden unterschiedlicher Baualtersklassen und Typen über den gesamten Lebenszyklus untersucht. Die entwickelten Kennwerte wurden mit geometrischen Gebäudedaten aus 3D-Stadtmodellen verknüpft. Diese Werte dienen als Datenbasis für das hier entwickelte Rohstoffkataster für Wohngebäude.

In weiteren Modellmodulen wurde die stoffliche Veränderung (dynamische Prozesse z. B. Sanierung, Neubau, Abbruch etc.) des Wohngebäudebestands im Laufe des Lebenszyklus aufgezeigt und quantifiziert (Abbildung 0.1). Dadurch können Aussagen zum zeitlichen und örtlichen Auftreten von aus dem Bestand freigesetzten Stoffen (z. B. potentielle Sekundärrohstoffe, Verlustraten, Abfälle, Selbstversorgungsgrad etc.) gemacht werden. Die zeitliche Freisetzung wurde anhand von Verteilungsfunktionen ermittelt, die auf den Nutzungs- und Lebensdauern von Wohngebäuden und deren Bauteilen basieren. Durch die Verwendung von 3D-Stadtmodellen kann die örtliche Freisetzung von Stoffen ermittelt werden.

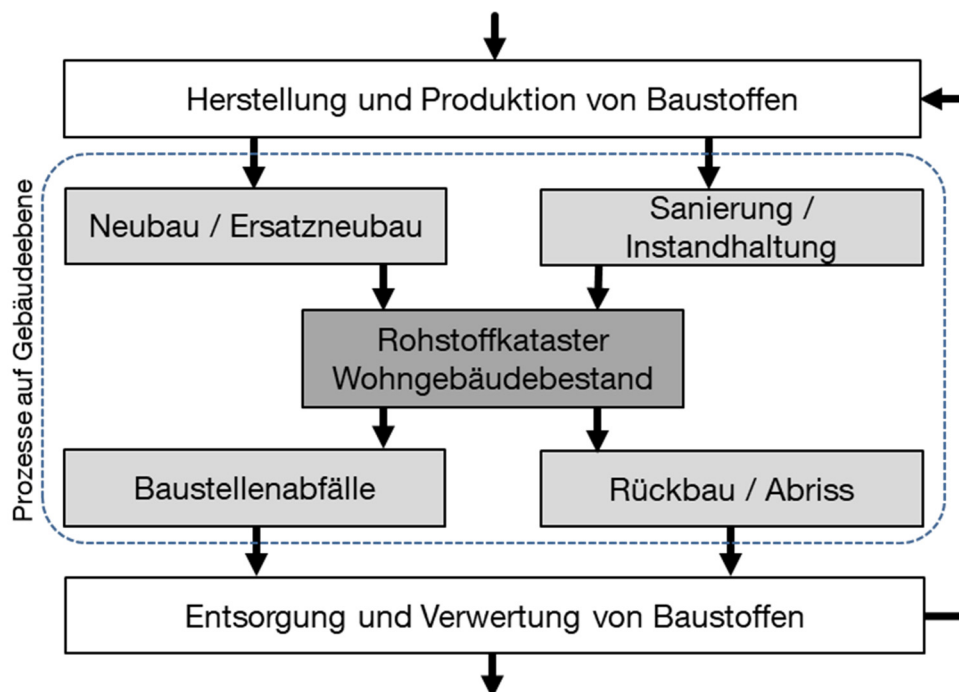


Abbildung 0.1: Hauptmodule des dynamischen Stoffstrommodells auf der Gebäudeebene

Bei der Auswertung auf der Gebäudeebene hat sich gezeigt, dass im Vergleich zu mineralischen Baustoffen, die bei Wohngebäuden überwiegend in der Konstruktion gebunden sind und den größten Anteil (nach Masse) ausmachen, zwischen 0,1 % bis 25 % Metalle vorhanden sind. Mit durchschnittlich 92 % ist Stahl (z. B. Bewehrung) das meistverwendete Metall im Wohnungsbau.

Der Fokus bisheriger Untersuchungen zur stofflichen Zusammensetzung von Gebäuden liegt überwiegend auf der Konstruktion. Da insbesondere in der Anlagentechnik eine Vielzahl an Metallen gebunden ist, die eine strategische Bedeutung für die Wirtschaft haben und ein hohes Potential der Ressourcenschonung aufweisen, ist es zukünftig nötig insbesondere deren materielle Zusammensetzung genauer zu untersuchen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher auch einzelne Wohngebäude gezielt untersucht, um die bestehende Datenbasis bezüglich der stofflichen Zusammensetzung zu erweitern (z. B. Bildung von Kennwerten, Ermittlung von Leitungslängen etc.). Es hat sich beispielsweise gezeigt, dass bei einem der betrachteten Mehrfamilienhäuser rund 280 g/m²_{BGF} Kupfer in den elektrischen Leitungen verbaut sind (ca. 230 g/m²_{BGF} bei den untersuchten Einfamilienhäusern). Durch die gehobenen Nutzeransprüche und Zunahme an elektrischen Geräten wird heute 15-mal mehr Kupfer für diesen Zweck benötigt, als noch vor 50 Jahren.

Validierung anhand des Fallbeispiels München/Freiham

Zur Validierung des in dieser Arbeit entwickelten Stoffstrommodells wurde der Münchner Stadtteil Freiham gewählt - eines der größten Stadtentwicklungsprojekte in Deutschland. Hierbei wurde für Freiham die stoffliche Zusammensetzung (nach Baustoffgruppen) des Wohngebäudebestands (ca. 2.400 Gebäude) ermittelt, die rund 2,2 Mio. t beträgt. Rund 50 % der Gesamtmasse sind in Mehrfamilienhäusern der Baualtersklassen 1958 - 1968 (31 %) und 1969 - 1978 (19 %) gebunden. Mit 48 % haben Betone den größten Anteil, gefolgt von Mauersteinen (24 %). Der Anteil der Metalle beträgt rund 5 % (110.000 t), mit einem monetären Gegenwert von rund € 20,4 Mio. Alleine das derzeit gebundene Kupfer in den elektrischen Leitungen (419 t), hat einen derzeitigen Gegenwert von ca. € 1,8 Mio.

Auf Basis der stofflichen Ist-Zustandsermittlung (Rohstoffkataster Wohngebäude) wurden in weiteren Schritten die zukünftigen Stoffströme und deren Dynamik (z. B. potentielle Sekundärrohstoffe, Baustellenabfälle, Rohstoffbedarf für Neubauten, Selbstversorgungsgrad etc.) bis 2050 erfasst. Dadurch konnten Aussagen zum zeitlichen Auftreten und Bedarf an Stoffen im Untersuchungsraum Freiham gemacht werden. Des Weiteren konnte abgeleitet werden, welcher Anteil aus Abbruchmassen unter Berücksichtigung von Systemverlusten für den Neu- und Ersatzneubau im Untersuchungsraum verwendet werden kann (Selbstversorgungsgrad urbaner Räume).

In Bezug auf das untersuchte Fallbeispiel konnten die Voraussetzungen für ausgeglichene Massenbilanzen (Selbstversorgungsgrad) am Beispiel Beton und Stahl aufgezeigt werden. Unter den gewählten Voraussetzungen der Bestandsdynamik kann beispielsweise eine autarke Versorgung mit RC-Splitt für die Produktion von RC-Beton und Stahlschrott für die Stahlproduktion im Untersuchungsraum sichergestellt werden. Bei tendenzieller Entwicklung kann ab ca. 2036 ein Überschuss bereitgestellt werden und der Stadtteil wird zum Nettostoffexporteur. Dies ist maßgeblich auf die

prädominierende Baualtersklasse der „1960er Jahre Mehrfamilienhäuser“ zurückzuführen, die durch Ihre Bauweise ein bedeutendes Lager an Stahl und Beton bieten.

Neben der Massenermittlung und zeitlichen Veränderung des Rohstofflagers des Wohngebäudebestands wurden potentielle Verwertungswege und Transportdistanzen identifiziert. Dabei wurden die für die „Wertschöpfungskette Bau“ relevanten Anlagen kartographiert und in Bezug zum Untersuchungsraum gesetzt. Im Hinblick auf die Ressourcenschonung ist, durch den regionalen und lokalen Markt für mineralische Massenbaustoffe bedingt, eine möglichst hochwertige Verwertung vor Ort von besonderem Interesse.

Anhand der Auswertung wurde festgestellt, dass durch das Wissen zum Verbleib (geographisches und zeitliches Auftreten und Bedarf) von Stoffen ein gezielter Einsatz von Sekundärrohstoffen aus dem Bestand forciert werden kann. Dies ist für die Etablierung von geschlossenen Kreisläufen (zirkulärer Ökonomie) im Bauwesen von entscheidender Bedeutung. Durch eine lokale Aufbereitung und Verwertung innerhalb des gewählten Bezugsraums reduzieren sich analog die Transportwege, da die derzeitigen Anlagen (z. B. Primärrohstoffstätten, Recyclinganlagen) außerhalb der Stadtgrenzen liegen. Ein gezieltes Stoffstrommanagement (z. B. hochwertige Verwertung vor Ort) in urbanen Räumen weist daher ein hohes Potential auf, den Anteil sekundärer Ressourcen zu erhöhen und den Einsatz primärer Ressourcen und Transporte zu verringern.

Handlungsempfehlungen an die Akteure der Wertschöpfungskette des Bauwesens

Im Rahmen der Analyse und daraus abzuleitenden Handlungsempfehlungen wurden unter den gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen die Einflussmöglichkeiten ausgewählter Akteure auf die Stoffströme des Bauwesens untersucht. Für die Schaffung einer zirkulären Ökonomie und eines gezielten Stoffstrommanagements wird ein gemeinsamer Datenraum benötigt, um Stoffströme, -lager und deren Entwicklung fortlaufend zu dokumentieren. Dadurch können diese Ströme gezielt gesteuert und bewirtschaftet werden (z. B. abgleichen von Angebot und Nachfrage nach Baustoffen). Für ein Gelingen sind alle Akteure angehalten relevante Informationen (z. B. Zusammensetzung von Gebäuden) an andere Akteure der Wertschöpfungskette weiterzugeben und den Informationsaustausch untereinander zu forcieren. Des Weiteren werden akteursübergreifende Geschäftsmodelle benötigt, um einen wirtschaftlichen Anreiz zur Ressourcenschonung zu liefern und damit eine Umsetzung der zirkulären Ökonomie in der Praxis zu gewährleisten.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
Zusammenfassung.....	vii
Inhaltsverzeichnis.....	xiii
Abbildungsverzeichnis	xvii
Tabellenverzeichnis.....	xxv
1 Einleitung	1
1.1 Einführung und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen	2
1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise.....	4
2 Grundlagen stofflicher Kreisläufe	7
2.1 Stoffkreisläufe in Bezugsräumen und Wirtschaftssektoren	8
2.1.1 Metabolismus der Anthroposphäre	11
2.1.2 Stoffstromanalyse.....	13
2.2 Kreislaufwirtschaft im Bauwesen	14
2.2.1 Herstellung.....	17
2.2.2 Errichtung.....	18
2.2.3 Nutzung.....	18
2.2.4 Rückbau und Entsorgung.....	26
2.2.5 Potential für Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling	29
2.2.6 Transporte und Infrastruktur.....	36
2.3 Schließung von Kreisläufen - Hemmnisse ausgeglichener Massenbilanzen.....	40
2.3.1 Korrelation von Angebot und Nachfrage.....	42
2.3.2 Räumliche Verteilung, Kritikalität und Substitution	43
3 Einfluss des Bauwesens bei der Erfassung und Steuerung von Stoffströmen.....	45
3.1. Mineralische Baustoffe.....	46
3.1.1. Steine und Erden	48
3.1.2. Ziegel	51
3.1.3. Weitere keramische Baustoffe.....	51
3.1.4. Beton	52
3.1.5. Glas.....	54
3.1.6. Kreislauf mineralischer Baustoffströme.....	57
3.2. Metalle	59
3.2.1. Stahl.....	61
3.2.2. Aluminium	66
3.2.3. Zink	68
3.2.4. Kupfer	70
3.2.5. Blei	72
3.2.6. Resümee metallurgischer Stoffströme	73
3.3. Organische Baustoffe am Beispiel Holz.....	74
3.4. Zusammenfassung	76

4	Einfluss der regionalen und urbanen Ebene bei der Erfassung und Steuerung von Stoffströmen	79
4.1	Erfassung von Stoffströmen bei der Rohstoffbeschaffung im räumlichen Bezug.....	79
4.2	Erfassung von Stoffströmen in der Herstellung und Produktion im räumlichen Bezug.....	81
4.2.1	Produktionsstandorte von Beton.....	81
4.2.2	Produktionsstandorte von Stahl	82
4.3	Erfassung des Gebäudebestands im räumlichen Bezug.....	83
4.4	Erfassung der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft im räumlichen Bezug.....	85
4.4.1	Recyclinganlagen.....	85
4.4.2	Deponien.....	88
4.5	Verknüpfung der räumlichen Bezugsebenen	90
4.6	Ausgewählte Einflüsse auf Transportradien und Bezugsräume	92
4.6.1	Transportkosten.....	92
4.6.2	Rohstoffkosten.....	94
4.7	Fazit	98
5	Einfluss der Gebäude bei der Erfassung und Steuerung von Stoffströmen	99
5.1	Typologische Kategorisierung.....	105
5.1.1	Gebäudeklassen Wohngebäude	105
5.1.2	Gebäudeklassen Nichtwohngebäude	107
5.2	Stoffliche Zusammensetzung von Wohngebäuden im Bestand.....	108
5.2.1	Einteilung der Baustoffgruppen.....	110
5.2.2	Stoffliche Zusammensetzung von Einfamilienhäusern im Bestand	111
5.2.3	Stoffliche Zusammensetzung von Mehrfamilienhäusern im Bestand	112
5.2.4	Weitere Erhebungen von Gebäuden	113
5.3	Bemessung von Lebens- und Nutzungsdauer.....	121
5.3.1	Zeitraum zwischen Einbau zum Abfallanfall	121
5.3.2	Einflüsse auf Lebens- und Nutzungsdauer	123
5.3.3	Lebens- und Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen	124
5.3.4	Lebens- und Nutzungsdauer von Gebäuden	125
5.4	Stoffströme durch Sanierungsmaßnahmen	126
5.5	Stoffströme durch Gebäuderückbau	128
5.6	Stoffströme durch Neubau und Ersatzneubau	129
5.6.1	Neubau	129
5.6.2	Ersatzneubau	130
5.6.3	Bauabfälle aus Neubau und Ersatzneubau	131
5.7	Stoffströme durch potentielle Problemstoffe	131
5.7.1	Asbest.....	134
5.7.2	Künstliche Mineralfasern (KMF).....	135
5.7.3	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	136
5.7.4	Polychlorierte Biphenyle (PCB).....	136
5.7.5	Pentachlorphenol (PCP) und Lindan	136
5.7.6	Einsatz von Chemischen Stoffen.....	137
5.7.7	Aktuelle Problemstoffe - Flammenschutzmittel in Polystyrol.....	137
5.7.8	Fazit	137
5.8	Geometrische Erfassung von Gebäuden	138
5.8.1	Erfassung des Brutto-Rauminhalts.....	138
5.8.2	Ermittlung und Ableitung von Flächen	140
5.8.3	Plausibilitätsprüfung von Gebäudegeometrien	147
5.8.4	Fazit	147

6	Validierung des Stoffstrommodells	151
6.1	Geometrische Abbildung des Wohnbestands	151
6.2	Stoffliche Zusammensetzung des Wohngebäudebestands im Bezugsraum	156
6.2.1	Stofflager Einfamilienhaus (EFH)	156
6.2.2	Stofflager Mehrfamilienhaus (MFH)	159
6.2.3	Stofflager des Wohnbestands im Bezugsraum	161
6.3	Stoffliche Lagerexploitation	172
6.3.1	Ausgewählte mineralische Fraktionen – Betone und Mauersteine	179
6.3.2	Transportdistanzen	181
6.3.3	Ausgewählte metallische Fraktionen	187
6.4	Erschließung von Wohngebäuden durch Neubau	189
6.4.1	Neubau	189
6.4.2	Ersatzneubau	191
6.4.3	Baustellenabfälle bei Neu- und Ersatzneubauten	193
6.4.4	Sanierung	195
6.4.5	Gesamtrohstoffbedarf von Wohngebäuden	197
6.4.6	Infrastruktur – Erschließung durch Gemeindestraßen	198
6.5	Ermittlung des Selbstversorgungsgrades (SVG)	199
6.5.1	Selbstversorgungsgrad (SVG) von RC-Splitt zur Betonproduktion	199
6.5.2	Selbstversorgungsgrad (SVG) von Metallen	201
6.6	Fazit	202
7	Akteure und ihre Handlungsmöglichkeiten unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen	203
7.1	Bauherr	204
7.2	Planungsbeteiligte	205
7.3	Finanziers und Investoren	205
7.4	Bauausführende Betriebe	206
7.5	Öffentliche Verwaltung	207
7.6	Gesetzgeber	208
7.6.1	Beispiel 1 – Mantelverordnung	209
7.6.2	Beispiel 2 – Gewerbeabfallverordnung	209
7.6.3	Beispiel 3 – Besteuerung	209
7.6.4	Beispiel 4 – Subventionen	210
7.6.5	Beispiel 5 – Einführung Gebäudestoffpass	210
7.6.6	Weitere Beispiele	210
7.7	Primärrohstoffproduzierendes Gewerbe	211
7.8	Baustoff- und Produkthersteller	211
7.9	Transportunternehmer	212
7.10	Abbruchunternehmen	212
7.11	Recyclingunternehmen	213
7.12	Entsorger, Deponien und Abfallwirtschaft	214
7.13	Maschinenbauer	214
7.14	Bauteilbörsen	215
7.15	Fazit	217
8	Fazit und Ausblick	219
8.1	Fazit	219
8.2	Ausblick	221
	Abkürzungsverzeichnis	225

Literaturverzeichnis	229
Glossar	255
Anhang	261
A Anhang Baustoffe - Ergänzende Erhebung	261
A.1 Natursteine	261
A.1.1 Kalkstein und Dolomitstein	262
A.1.2 Gipsstein und Anhydritstein.....	263
A.2 Zusammenfassung Baustoffe Gesamt.....	265
B Fallbeispiel Mehrfamilienhaus 1962	267
B.1 Gebäudedaten.....	267
B.2 Gründung (KG 320) und Keller	268
B.2.1 Fundament.....	269
B.2.2 Bodenplatte und Kellerwände	269
B.3 Baukonstruktion – Außen- (KG 330) und Innenwände (KG 340).....	269
B.3.1 Balkonbrüstungen – Loggias.....	270
B.3.2 Rückbaupotentiale.....	270
B.3.3 Baukonstruktion – Außentüren und Fenster (KG 334).....	271
B.3.4 Baukonstruktion – Innentüren und Fenster (KG 344).....	273
B.4 Baukonstruktion – Decken (KG350)	274
B.4.1 Fußboden- und Wandverkleidungen	274
B.4.2 Rückbaupotentiale.....	275
B.5 Baukonstruktion – Dächer (KG 360).....	275
B.5.1 Dächer Gesamt.....	276
B.5.2 Rückbaupotentiale.....	277
B.6 Baukonstruktive Einbauten (KG 370)	278
B.7 Technische Anlagen – Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen (KG 410)	278
B.7.1 Geometrische Kennwerte	279
B.7.2 Massen und stoffliche Kennwerte	279
B.7.3 Sanitärobjekte.....	279
B.7.4 Rückbaupotentiale.....	280
B.8 Technische Anlagen – Wärmeversorgungsanlagen (KG 420).....	280
B.8.1 Geometrische Kennwerte	280
B.8.2 Massen und stoffliche Kennwerte	280
B.8.3 Heizkörper.....	281
B.8.4 Rückbaupotentiale.....	281
B.9 Technische Anlagen – Starkstromanlagen (KG 430).....	281
B.9.1 Massen und stoffliche Kennwerte	282
B.9.2 Rückbaupotentiale.....	282
B.10 Zusammenfassung des Gebäudebeispiels	283
B.10.1 Vergleich mit synthetischem Gebäudesteckbrief	284
B.10.2 Bewertung der Abweichungen	285
C Gebäudevergleich	287
D Ergänzende Werte Fallbeispiel München/Freiham	289
D.1 Flächen- und Volumen Kennwerte	289
D.2 Einzelwerte für Sanierungsmaßnahmen.....	291
D.3 Jahreswerte Stoffinput und -output	292
D.4 Standorte Altholzaufbereiter.....	295

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 0.1: Hauptmodule des dynamischen Stoffstrommodells auf der Gebäudeebene	ix
Abbildung 1: Übersicht zum Aufbau der Arbeit	4
Abbildung 2: Ökosystem der Stadt Brüssel.....	7
Abbildung 3: Übersicht des Begriffs natürliche Ressourcen in Anlehnung an ProgRes	8
Abbildung 4: Stofflicher Austausch in Bezugsräumen und Wirtschaftssektoren	9
Abbildung 5: Interaktionen zwischen Anthroposphäre und Umwelt in einer Regionalwirtschaft	12
Abbildung 6: Beschreibung der verwendeten Symbole in der Stoffstromanalyse.....	14
Abbildung 7: Beispielhafter Stoffkreislauf im Bauwesen	15
Abbildung 8: Lebenszyklusbetrachtung von Bauwerken und Bauprodukten	16
Abbildung 9: Untergliederung von Bauwerken	18
Abbildung 10: Verteilung der Wohngebäude in Deutschland nach Wohnfläche.....	19
Abbildung 11: Vergleich des Baualtersklassenanteils von Wohngebäuden innerhalb unterschiedlicher Bezugsräume	20
Abbildung 12: Vergleich der Wohngebäudegröße in unterschiedlichen Bezugsräumen	21
Abbildung 13: Dynamik des Wohngebäudebestands in München von 2011 bis 2014.....	22
Abbildung 14: Dynamik des Gebäudebestands in Deutschland 2015 nach Anzahl der Gebäude	22
Abbildung 15: Dynamik des Gebäudebestands in Deutschland 2015 nach Gebäudefläche (m ²)	23
Abbildung 16: Dynamik des Wohngebäudebestands in München.....	23
Abbildung 17: Dynamik des Wohnflächenbestands in München	24
Abbildung 18: Beschreibung von Rückbau- und Abbruchmethoden.....	27
Abbildung 19: Beispielhafte Stoffgemische aus dem Abbruch anhand unterschiedlicher Abbruchbaustellen.....	28
Abbildung 20: Beispiel für Konstellation von mobilen Aufbereitungsanlagen	30
Abbildung 21: Sortierung von Abbruchabfällen in sortenreine Fraktionen.....	30
Abbildung 22: Betriebswirtschaftlicher optimaler Rückgewinnungsgrad (oben) und ökologisch optimaler Rückgewinnungsgrad (unten).....	32
Abbildung 23: Systemverluste bei der Erfassung und Aufbereitung von Bauschutt.....	33
Abbildung 24: Transformation von Baustoffströmen in Rezyklatströme und Bilanzierung von Angebot und Nachfrage.....	34
Abbildung 25: Beispiele für Hybridbaustoffe und Materialkombinationen: Herausforderungen in der getrennten Erfassung und Aufbereitung	36
Abbildung 26: Beförderungsleistung in Deutschland	37

Abbildung 27: Kaskadennutzung am Beispiel von RC-Beton unter Berücksichtigung von Systemverlusten	41
Abbildung 28: Konzeptionelle Darstellung von Kaskadennutzung und Optimierung.....	42
Abbildung 29: Auswirkungen von Veränderungen auf Angebot und Nachfrage.....	43
Abbildung 30: Übersicht ausgewählter mineralischer Baustoffe.....	46
Abbildung 31: Stoffströme und Verwendung mineralischer Baustoffe	47
Abbildung 32: Stoffströme und -mengen von Sand und Kies (in Tonnen).....	48
Abbildung 33: Stoffströme und -mengen von Spezialkies und Spezialsand (in Tonnen).....	49
Abbildung 34: Verwendung von Ton und Kaolin (in Tonnen).....	50
Abbildung 35: Zusammensetzung von Bauschutt nach Baustoffarten	53
Abbildung 36: Abnehmerstruktur der Zementindustrie 2014 (links) und Zementabsatz nach Baubereich 2013 (rechts) in Deutschland	54
Abbildung 37: Stoffströme in der Glasherstellung (in Tonnen).....	55
Abbildung 38: Verbleib mineralischer Baustoffe in Deutschland 2012 (in Tonnen).....	58
Abbildung 39: Übersicht ausgewählter Metalle im Bauwesen	59
Abbildung 40: Verwendung von Metallen im Bauwesen in Deutschland im Jahr 2014	60
Abbildung 41: Prozentualer Nettoimportwert Deutschlands wichtigster importierter Metalle	60
Abbildung 42: Stoffströme der Stahlerzeugung in Deutschland 2014	63
Abbildung 43: Verwendung von Stahlwerk- und Hochofenschlacke in Deutschland im Jahr 2014.....	64
Abbildung 44: Verwendung von Stahl in Deutschland im Jahr 2015	65
Abbildung 45: Verwendung von Aluminium in Deutschland nach Hauptverwendungsgebieten im Jahr 2014	67
Abbildung 46: Verwendung von Zink in Deutschland nach Hauptverwendungsgebieten im Jahr 2014	69
Abbildung 47: Verwendung von Kupfer in Deutschland nach Hauptverwendungsgebieten im Jahr 2014	71
Abbildung 48: Verwendung von Blei in Deutschland nach Hauptverwendungsgebieten im Jahr 2014.....	72
Abbildung 49: Zusammenfassung der Auswertung metallischer Stoffströme im Bauwesen (in Tonnen/Jahr).....	73
Abbildung 50: Verwendung von Holzhalbwaren im Hochbau (in m ³)	75
Abbildung 51: Kartenausschnitt des Regionalplans München.....	79
Abbildung 52: Rohstoffvorkommen der Region München	80
Abbildung 53: Standorte der Transportbetonhersteller in der Region München	81
Abbildung 54: Standorte der Stahlhersteller in Deutschland.....	83

Abbildung 55: Aufbau des Rohstoffkatasters und Einbindung ins dynamische Stoffstrommodell	84
Abbildung 56: Standorte der Baustoff-Recycling Anlagen in der Region München	86
Abbildung 57: Aufbereitung von Bauabfällen in Bayern 2012	87
Abbildung 58: Aufbereitung und Verfüllung von Bauabfällen in Oberbayern 2012	87
Abbildung 59: Anteil mineralischer Fraktionen in Deponierung, Deponiebau und Verfüllung in Deutschland 2012 (in Tonnen).....	88
Abbildung 60: Deponierung von Bauabfällen in Oberbayern 2012 (in Tonnen)	89
Abbildung 61: Verknüpfung der Lebenszyklusphasen im räumlichen Bezug	90
Abbildung 62: Transportkosten von mineralischen Erzeugnissen im Bezug zur Transportdistanz: Datenauswertung anhand zwei Unternehmen aus Oberbayern	92
Abbildung 63: Durchschnittliche und akkumulierte Transportkosten von Kiesen und Sanden in Oberbayern.....	93
Abbildung 64: Erzeugerpreisindizes für Güterverkehrsleistungen.....	93
Abbildung 65: Ausgewählte Einflussfaktoren auf die Transportkosten im LKW Verkehr	94
Abbildung 66: Index der Erzeugerpreise für Steine- und Erden-Produkte.....	95
Abbildung 67: Beispiele für eine getrennte Sortierung von Bauabfällen auf ausgewählten Baustellen.....	96
Abbildung 68: Gebäuderückbau mit heterogenem Stoffgemisch (links) - Mobile Aufbereitungsanlagen (rechts).....	97
Abbildung 69: Hauptmodule des dynamischen Stoffstrommodells auf der Gebäudeebene	99
Abbildung 70: Hierarchische Aufteilung der Stoffströme in Subkreisläufe.....	100
Abbildung 71: Menge und Zusammensetzung der Trümmer von Wohngebäuden (links) Gesamtzusammensetzung der Trümmer in Berlin (rechts).....	101
Abbildung 72: Zuordnung der Baustoffgruppen zu den Kostengruppen 300	104
Abbildung 73: Einfamilienhäuser - Erteilte Baugenehmigungen nach überwiegend verwendetem Baustoff bezogen auf den umbauten Raum	108
Abbildung 74: Mehrfamilienhäuser - Erteilte Baugenehmigungen nach überwiegend verwendetem Baustoff bezogen auf den umbauten Raum	109
Abbildung 75: Nichtwohngebäude - Erteilte Baugenehmigungen nach überwiegend verwendetem Baustoff bezogen auf den umbauten Raum	109
Abbildung 76: Stoffliche Zusammensetzung synthetischer EFH	111
Abbildung 77: Stoffliche Zusammensetzung synthetischer MFH.....	112
Abbildung 78: Auswertung der stofflichen Zusammensetzung ausgewählter Gebäude	113
Abbildung 79: EFH Porenbeton (BJ 2014)	114
Abbildung 80: EFH Holzständerbauweise (BJ 1996)	115

Abbildung 81: Stoffliche Zusammensetzung des Beispielgebäudes und Vergleich mit den IÖR Steckbriefen	117
Abbildung 82: Vergleich der Datensätze des IÖR und Weber-Blaschke.....	118
Abbildung 83: Nutzungsdauer anhand des Einbaus eines Bauteils bis zur Entsorgung am Beispiel von WDVS.....	122
Abbildung 84: Beispielhafte Darstellung der Binomialverteilung zur Lebensdauerbemessung	122
Abbildung 85: Einflussfaktoren auf die Nutzungs- und Lebensdauer von Baustoffen, Bauteilen und Bauwerken.....	124
Abbildung 86: Bauschäden an 10 Jahre brachliegendem Gebäude (Baujahr 1964).....	125
Abbildung 87: Stoffintensitäten von Neubauten nach 2011 (in t/WE)	130
Abbildung 88: Stoffintensitäten von Neubauten nach 2011 (in t/m ³ BRI).....	131
Abbildung 89: Entsorgung von gefährlichen Bauabfällen in Deutschland 2014 (in Tonnen).....	133
Abbildung 90: Beispiel für asbesthaltige Bauteile	135
Abbildung 91: Ableitung von Volumen und Flächen aus dem 3D-Stadtmodell	139
Abbildung 92: Lageplan des Beispielgebäudes von 1962 (links) im Vergleich zur digitalen Darstellung aus Vermessungsdaten von 2015 (rechts) zur Ableitung von Grund- und Deckenflächen	140
Abbildung 93: Auszug aus einem CityGML Model im 3DCityDB Webclient des Lehrstuhls für Geoinformation mit Erkennung der Gebäudehülle.....	141
Abbildung 94: Ermittlung der Öffnungsanteile von Fassaden anhand unterschiedlicher Baualtersklassen	143
Abbildung 95: Auswertung der Geschosshöhen am Gebäudebeispiel.....	145
Abbildung 96: Ermittlung der Dachrinnenlänge bei Schrägdächern	146
Abbildung 97: Übersicht des Untersuchungsraums – Stadtteil München-Freiham/Neuaußing	151
Abbildung 98: Verteilung von Gebäudetypen und Baujahr in Freiham.....	152
Abbildung 99: Entwicklung des akkumulierten Brutto-Rauminhalts in Freiham (in m ³)	153
Abbildung 100: Verteilung des Brutto-Rauminhalts in Freiham nach Baualter und Typ.....	154
Abbildung 101: Vergleich der Verteilung von Wohngebäuden nach Baualtersklasse in unterschiedlichen Bezugsräumen (nach Anzahl der Gebäude)	155
Abbildung 102: Vergleich der Verteilung von Wohngebäuden nach Gebäudetyp in unterschiedlichen Bezugsräumen (nach Anzahl der Wohneinheiten)	155
Abbildung 103: Entwicklung der stofflichen Zusammensetzung der EFH im Bezugsraum.....	156
Abbildung 104: Anteil der durch Sanierung eingebrachten Stoffe bei EFH im Bezugsraum.....	158

Abbildung 105: Ist-Zustand der stofflichen Zusammensetzung der EFH im Bezugsraum	158
Abbildung 106: Entwicklung der stofflichen Zusammensetzung der MFH im Bezugsraum.....	159
Abbildung 107: Anteil der durch Sanierung eingebrachten Stoffe bei MFH im Bezugsraum.....	160
Abbildung 108: Ist-Zustand der stofflichen Zusammensetzung der MFH im Bezugsraum.....	160
Abbildung 109: Stoffliche Zusammensetzung des Wohngebäudebestands im Bezugsraum (Ist-Zustand)	161
Abbildung 110: Stoffliche Zusammensetzung des Wohngebäudebestands im Bezugsraum (in %)	162
Abbildung 111: Entwicklung der Metallpreise von 1960 bis 2016.....	164
Abbildung 112: Gängige Gebäudetypen im Untersuchungsraum.....	171
Abbildung 113: Darstellung der Lebensdauerszenarien anhand der Binomialverteilung.....	173
Abbildung 114: Jährlich freigesetzte Stoffe aus dem Bestand durch Gebäuderückbau im Bezugsraum (Maximal)	173
Abbildung 115: Verlustraten bei der Sammlung und Aufbereitung von Abbruchabfällen im Bezugsraum.....	174
Abbildung 116: Verwertbare Stofffraktionen aus dem Gebäuderückbau im Bezugsraum	175
Abbildung 117: Voraussichtliche Verteilung der freigesetzten Stoffe im Jahr 2047 im Bezugsraum.....	176
Abbildung 118: Jährlich freigesetzte Stoffe aus dem Gebäuderückbau (abzüglich Verluste) und Bau- und Sanierungsabfällen im Bezugsraum.....	177
Abbildung 119: Potentiale der Produktion von RC-Beton (Typ 1).....	180
Abbildung 120: Potentiale der Produktion von RC-Beton (Typ 2).....	181
Abbildung 121: Verkehrstechnische Anbindung des Untersuchungsraums	182
Abbildung 122: Transportdistanzen zu den nächstgelegenen Baustoff-Recyclinganlagen	183
Abbildung 123: Transportdistanzen zu den nächstgelegenen Betonwerken.....	184
Abbildung 124: Transportdistanzen für die Logistikkette zur Herstellung von stationär aufbereitetem Beton aus RC-Material.....	185
Abbildung 125: Transportdistanzen zu den nächstgelegenen Zementwerken	186
Abbildung 126: Transportdistanzen zu den nächstgelegenen Deponien.....	187
Abbildung 127: Jährlich verwertbarer Anteil an Metallen im Bezugsraum	188
Abbildung 128: Jährlicher Baustoffbedarf für Wohngebäude in Realisierungsabschnitt 1 und 2.....	190
Abbildung 129: Zurückgebautes Gebäudevolumen pro Jahr im Bezugsraum (nach Volumen und Typ).....	191

Abbildung 130: Jährlicher Rohstoffbedarf des Ersatzneubaus im Bezugsraum (EFH)	192
Abbildung 131: Jährlicher Rohstoffbedarf des Ersatzneubaus im Bezugsraum (MFH)	192
Abbildung 132: Jährlicher Rohstoffbedarf des Ersatzneubaus im Bezugsraum (Gesamt)	193
Abbildung 133: Jährliche Baustellenabfälle aus dem Neubau im Bezugsraum	194
Abbildung 134: Jährliche Baustellenabfälle durch Erstellung von Ersatzneubauten im Bezugsraum.....	194
Abbildung 135: Jährliche Baustellenabfälle durch Erstellung von Neu- und Ersatzneubauten im Bezugsraum.....	195
Abbildung 136: Jährlicher Input für Sanierung im Bezugsraum (Gesamt).....	196
Abbildung 137: Jährlicher Rohstoffbedarf von Wohngebäuden im Bezugsraum (Gesamt)	197
Abbildung 138: Potentieller SVG mit RC-Splitt zur Produktion von RC-Beton im Bezugsraum (Gesamt)	199
Abbildung 139: Potentieller SVG mit RC-Splitt zur Produktion von RC-Beton im Bezugsraum (Typ 1).....	200
Abbildung 140: Potentieller SVG mit RC-Splitt zur Produktion von RC-Beton im Bezugsraum (Typ 2).....	200
Abbildung 141: Potentieller SVG mit Metallen im Bezugsraum.....	201
Abbildung 142: Potentieller SVG mit Stahl im Bezugsraum	202
Abbildung 143: Ausgewählte Akteure im Lebenszyklus von Gebäuden und der Bewirtschaftung urbaner Räume.....	203
Abbildung 144: Standortkarten von Bauteilbörsen in Deutschland.....	217
Abbildung A.1: Verwendung von Natursteinen im Bauwesen	261
Abbildung A.2: Verwendung von Naturstein (in Tonnen).	261
Abbildung A.3: Verwendung von Kalk und Dolomitstein (in Tonnen)	262
Abbildung A.4: Verwendung von Branntkalk und Dolomitmalk (in Tonnen)	263
Abbildung A.5: Verwendung von Gips und Anhydrit (in Tonnen)	264
Abbildung A.6: Zusammenfassung von verwendeten Stoffen im Bauwesen (pro Jahr)	265
Abbildung B.1: Auszug aus dem 3D-Gebäudemodell.....	268
Abbildung B.2: Darstellung des Gebäudes in Google Earth.....	268
Abbildung B.3: Bauteilaufbau der Außenwand	269
Abbildung B.4: Aussortierung von Metallfraktionen und Verunreinigungen in Bauschuttfraktionen	271
Abbildung B.5: Bauteilaufbau der Decken.....	274
Abbildung B.6: Nachträglicher Einbau von Dachgauben und Vor-Ort-Sortierung von Holzfraktionen.....	277
Abbildung B.7: Vergleich mit IÖR Gebäudesteckbrief.....	285

Abbildung D.1: Verteilung von Baualtersklasse und Brutto-Grundfläche in München/Freiham.....	289
Abbildung D.2: Verteilung von Baualtersklasse und Brutto-Rauminhalt in München/Freiham.....	289
Abbildung D.3: Verteilung von Baualtersklasse und Anzahl Wohneinheiten in München/Freiham.....	290
Abbildung D.4: Verteilung von Baualtersklasse und bebauter Fläche in München/Freiham.....	290
Abbildung D.5: Stoffinput durch Sanierung des Bestands von 2012.....	291
Abbildung D.6: Stoffinput durch Sanierung von Ersatzneubauten.....	291
Abbildung D.7: Standorte und Transportdistanzen von Altholzaufbereitern.....	295

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Detaillierungsstufen (LoD) im CityGML Standard	25
Tabelle 2: Beispielhafte Verlustraten bei der Sammlung und Aufbereitung von Baustoffen	35
Tabelle 3: Einteilung der gängigsten Baustoffe im Bauwesen.....	45
Tabelle 4: Fördermaximum und internationale Recyclingraten von ausgewählten Metallen	61
Tabelle 5: Verunreinigungsspektrum von Aluminium-Altschrotten.....	68
Tabelle 6: Jährliches Lagerwachstum von Metallen im Bauwerksbestand in Deutschland 2015	74
Tabelle 7: Vergleich der Entsorgungspraxis und des Entsorgungspotentials von Altholz	76
Tabelle 8: Zusammenfassung von verwendeten Stoffen im Bauwesen.....	78
Tabelle 9: Durchschnittliche Kosten für die Bereitstellung von ausgewählten mineralischen Erzeugnissen in der Region Oberbayern	95
Tabelle 10: Entsorgungskosten mineralischer Fraktionen in Südbayern (in Tonnen).....	97
Tabelle 11: Vergleich der Gesamtmetallkonzentration der betrachteten Gebäude.....	119
Tabelle 12: Vergleich der Metallarten der untersuchten Gebäude	120
Tabelle 13: Jährliche Sanierungsraten nach Baustoffgruppen.....	127
Tabelle 14: Verlustraten durch Sammlung und Aufbereitung nach Baustoffgruppen.....	128
Tabelle 15: Verwendungszeiträume von ausgewählten Problemstoffen in Gebäuden	134
Tabelle 16: Fensterflächen pro m ² Wohnfläche	144
Tabelle 17: Auswertung von Flächen- und Volumenkenwerten anhand von BKI Objekten	147
Tabelle 18: Flächen- und Volumenkenwerte der untersuchten Wohngebäude im Bezugsraum	153
Tabelle 19: Durchschnittliche jährliche Sanierungsraten des Gebäudebestands (nach Baustoffgruppen).....	157
Tabelle 20: Zusammenfassung der stofflichen Zusammensetzung der Wohngebäude im Bezugsraum	162
Tabelle 21: Verteilung der gebundenen Metalle im Bestand (nach Masse und Wert).....	163
Tabelle 22: Ermittlung der jährlichen Preissteigerung von ausgewählten Metallen und Erzen.....	168
Tabelle 23: Kupferanteil im elektrischen Leitungsnetz von ausgewählten Gebäuden	165
Tabelle 24: Masse und Wert von Kupfer im elektrischen Leitungsnetz von Gebäuden im Bezugsraum	165
Tabelle 25: Mittelwerte der spezifischen Materialkenwerte von Heizungsleitungen	166

Tabelle 26: Ableitung und Verhältnis von BGF und WF im Bezugsraum	166
Tabelle 27: Stoffliche Zusammensetzung der Heizungsrohre im Bezugsraum.....	167
Tabelle 28: Ermittlung von Dachrinnen- und Fallrohrängen sowie der Masse im Bezugsraum	168
Tabelle 29: Kennwerte für Dachrinnen und Fallrohre.....	169
Tabelle 30: Ermittlung der Außenwand- und Fensterflächen	169
Tabelle 31: Stoffliche Zusammensetzung unterschiedlicher Fensterkonstruktionen	170
Tabelle 32: Massenermittlung der Fenster im Bezugsraum	171
Tabelle 33: Ermittlung von Grund- und Dachflächen.....	172
Tabelle 34: Zusammenfassung der anfallenden Fraktionen aus dem Gebäuderückbau von 2020 bis 2050 im Bezugsraum.....	176
Tabelle 35: Zusammenfassung der verwertbaren Stoffe aus dem Gebäuderückbau und Bau- und Sanierungsabfällen von 2020 bis 2050 im Bezugsraum.....	178
Tabelle 36: Gesamtmasse an verwertbaren Metallen von 2020 bis 2050 im Bezugsraum.....	188
Tabelle 37: Übersicht der Realisierungsabschnitte des Neubaugebiets bis 2030	189
Tabelle 38: Gesamtbedarf an Baustoffen für die jeweiligen Realisierungsabschnitte.....	190
Tabelle 39: Zusammenfassung der für die Sanierung benötigten Stoffe von 2020 bis 2050 im Bezugsraum.	196
Tabelle 40: Rohstoffbedarf und Verteilung im Bezugsraum (ausgewählte Jahre).....	198
Tabelle 41: Rohstoffbedarf für die Erschließung durch Gemeindestraßen im Bezugsraum	198
Tabelle B.1: Gebäudedaten - MFH Baujahr 1962 München.....	267
Tabelle B.2: Stoffliche Kennwerte des Fundaments.....	269
Tabelle B.3: Stoffliche Kennwerte der Bodenplatte und Kellerwänden.....	269
Tabelle B.4: Stoffliche Kennwerte der Außen- und Innenwände	270
Tabelle B.5: Stoffliche Kennwerte der Balkonbrüstungen (Loggias)	270
Tabelle B.6: Flächenkennwerte für Außentüren und Fenster.....	271
Tabelle B.7: Stoffliche Kennwerte der Fenster	272
Tabelle B.8: Stoffliche Kennwerte der Fensterbeschläge.....	272
Tabelle B.9: Stoffliche Kennwerte der Türen und Zargen.....	273
Tabelle B.10: Stoffliche Kennwerte der Türgriffe und Beschläge	273
Tabelle B.11: Stoffliche Kennwerte der Decken	274
Tabelle B.12: Stoffliche Kennwerte der Fußboden- und Wandbekleidungen	275
Tabelle B.13: Stoffliche Kennwerte des Dachs (nach Bauteil / Gewerk)	276
Tabelle B.14: Stoffliche Kennwerte des Dachs (nach Baustoff)	277

Tabelle B.15: Stoffliche Kennwerte der Treppengeländer	278
Tabelle B.16: Abmessungen und Kennwerte der Wasserver- und -entsorgung	279
Tabelle B.17: Stoffliche Kennwerte der Wasserver- und -entsorgung	279
Tabelle B.18: Stoffliche Kennwerte der sanitären Objekte	279
Tabelle B.19: Abmessungen und Kennwerte der Heizungsrohre	280
Tabelle B.20: Stoffliche Kennwerte der Heizungsrohre	281
Tabelle B.21: Stoffliche Kennwerte der Heizkörper	281
Tabelle B.22: Stoffliche Kennwerte und Kupferanteil der elektrischen Leitungen	282
Tabelle B.23: Stoffliche Kennwerte des Beispielgebäudes (Gesamtgebäude)	283
Tabelle B.24: Zusammenfassung der metallischen Fraktionen des Beispielgebäudes	284
Tabelle B.25: Stoffliche Kennwerte ohne Aufstockung	284
Tabelle B.26: Stoffliche Kennwerte der Aufstockung	285
Tabelle B.27: Verwendete Rohdichten nach Baustoff	286
Tabelle B.28: Vergleich der Gebäudekennwerte mit Daten des IÖR	286
Tabelle C.1: Stoffliche Zusammensetzung ausgewählter Gebäude	287
Tabelle D.1: Jahresbezogener Stoffbedarf (Input) in München/Freiham	292
Tabelle D.2: Jährlicher Stoffausgang (Output) in München/Freiham	293
Tabelle D.3: Jährlich maximaler Selbstversorgungsgrad in München/Freiham	294

1 Einleitung

1.1 Einführung und Problemstellung

Den Kreislauf schließen - Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft sieht vor, eine kreislaufforientierte Wirtschaft zu forcieren. Hierbei gilt es den Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen so lang wie möglich zu erhalten und so wenig Abfall wie möglich zu erzeugen. Dies ist ein wesentlicher Beitrag zu den Bemühungen der EU, um eine nachhaltige, ressourceneffiziente, CO₂-arme und wettbewerbsfähige Wirtschaft zu schaffen (Europäische Kommission 2015, S. 2).

Einer der ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren ist das Bauwesen. Weltweit werden 40 % aller Rohstoffe in diesem Bereich verwendet und ein Viertel der CO₂ Emissionen ausgestoßen (Becqué et al. 2016, S. 19). In Deutschland werden pro Jahr - neben einer Vielzahl an unterschiedlichsten Rohstoffen - mehr als eine halbe Milliarde Tonnen mineralische Rohstoffe für Bautätigkeiten eingesetzt (BBS 2016, S. 22). Im anwachsenden Gebäudebestand haben sich allein in Deutschland inzwischen 15 - 16 Mrd. t Baustoffe angesammelt. Unter Berücksichtigung des Tiefbaus (z. B. Straßen) ist ein Rohstofflager von fast 29 Mrd. t. (355 t/Person) entstanden (Schiller et al. 2015, S. XXXf).

Schätzungen zufolge finden sich etwa 10⁴ bis 10⁵ chemisch definierte Substanzen in verschiedenen Kombinationen und Funktionen in anthropogenen Lagerstätten (z. B. Gebäude). Dies beinhaltet Rohstoffe, die etwa aus dem Bergbau gewonnen werden, wie z. B. Zwischenprodukte, sowie Verbrauchs- und Gebrauchsgüter (Baccini und Brunner 1991, S. 10). Viele dieser Stoffe, die in Abhängigkeit zueinander stehen, finden sich auch in unseren Bauwerken wieder.

Die genaue Zusammensetzung, Mengen und derzeitigen Standorte der gebundenen Stoffe sind nicht ausreichend bekannt. Nur zu einem vergleichsweise geringen Anteil wurden die durch Bautätigkeiten ausgelösten Stoffströme und -lager bisher räumlich erfasst (z. B. auf globaler, nationaler, regionaler oder urbaner Ebene). Eine systematische und integrale Bewirtschaftung des entstandenen Rohstofflagers mit dem Ziel, aus langlebigen Produkten Sekundärrohstoffe zu gewinnen wird als *Urban Mining* (auch *Stadtschürfung* oder *Bergbau im urbanen Raum*) bezeichnet. Es geht darum, möglichst früh, idealerweise vor Inverkehrbringen eines Produkts, Stoffströme zu prognostizieren und zukünftige Verwertungswege zu identifizieren (Müller et al. 2017, S. 1), (Brunn 2017, S. 26).

Neben Bestrebungen der EU zeigt sich die Relevanz der Thematik auch auf nationaler Ebene. Als Nettoimporteur ist Deutschland besonders abhängig bei der Versorgung mit Rohstoffen, die als Grundvoraussetzung wirtschaftlicher Wertschöpfung gilt. Versorgungssicherheit und Preisstabilität ist eine wichtige Voraussetzung für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit (DIHK 2017, S. 2f). Im Jahr 2012 wurde das *Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess)* verabschiedet, das mittlerweile in seiner zweiten Ausführung vorliegt. ProgRess befasst sich mit Zielen, Leitideen und Handlungsansätzen zum Schutz natürlicher Ressourcen und bezieht sich dabei auf Indikatoren der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie (BMUB 2016). Laut Zielen der Bundesrepublik soll die Rohstoffproduktivität, die ausdrückt, wieviel Bruttoinlandsprodukt je eingesetzter Tonne an abiotischen Primärmaterial erwirtschaftet wird, bis 2020 verdoppelt werden (in Bezug auf das Referenzjahr 1994)

(Bundesregierung 2012, S. 65), (Destatis 2014, S. 8). Unter momentanen Voraussetzungen wird dieses Ziel nicht erreicht werden.

Am 1. Juli 2013 trat die neue Bauprodukte-Verordnung (BauPVO) in Kraft, welche die Bauproduktenrichtlinie von 1988 ablöste. Darin wurden die bestehenden sechs Grundanforderungen an Bauwerke um eine weitere Anforderung ergänzt. Diese besagt, dass ein Bauwerk so zu entwerfen und zu errichten sei, dass die eingesetzten natürlichen Ressourcen nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können (Europäisches Parlament 2011, S. 34). Dennoch werden zunehmend Gebäude gebaut, dessen Bauteile und Baustoffe immer komplexer und dessen Stoffe immer stärker miteinander verbunden werden, was eine zukünftige Kreislaufführung erschwert. Des Weiteren werden zunehmend Stoffe in unseren Gebäuden verbaut, über die es noch keine Langzeiterfahrungen gibt (z. B. Nanomaterialien).

Durch diese Gegebenheiten hat das Bauwesen eine zentrale Verantwortung in der Umsetzung der genannten Ziele. Stoffströme werden durch die Nachfrage nach Bauleistungen ausgelöst. Die Basis einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft bildet dabei das Wissen über den Verbleib von Stoffen und deren Dynamik. Zur Forcierung der Kreislaufwirtschaft Bau sind Werkzeuge nötig, um Stoffströme und Stofflager (Metabolismus) zu identifizieren und zu quantifizieren. Derzeit existieren keine standardisierten Methoden, die dies ermöglichen. Des Weiteren können durch die modellhafte Darstellung des Metabolismus Steuerungsmechanismen und Strategien für den Weg zu einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft (*zirkuläre Ökonomie*) identifiziert werden.

In den *Handlungsfeldern der Stadt der Zukunft* des VDI, wird insbesondere die Bausubstanz in Städten (urbaner Raum) als Potential gesehen, um im Sinne einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft Primärmaterial einzusparen. Durch die räumliche Nähe von Gebäuderückbau und Neubau können beispielsweise die Transportaufwendungen merklich reduziert werden (VDI 2015, S. 37).

Um den urbanen Raum am Leben zu erhalten und weiterzuentwickeln, werden eine Vielzahl an Ressourcen benötigt und Emissionen an die Umwelt ausgestoßen. Während Städte lediglich 2 % der Landfläche beanspruchen, werden dort 75 % der natürlichen Ressourcen konsumiert und 50 % des globalen Abfalls produziert (UNEP 2016, S. 1). 2015 lebten 54 % der Weltbevölkerung in Städten (mit steigender Tendenz) und 80 % des Bruttoinlandsproduktes werden dort generiert (World Bank 2018, S. 1). Durch die hohen Konzentrationen an Rohstoffen auf vergleichsweise geringen Flächen haben Städte eine einmalige Position, den Übergang zu einer zirkulären Ökonomie anzutreiben (Ellen MacArthur Foundation 2017, S. 4).

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Zentrales Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode (integrales Stoffstrommodell) zur Erfassung der Stoffströme und Stofflager des Bauwesens in urbanen Räumen in allen Phasen der Wertschöpfungskette. Durch die Vielzahl der im Bauwesen verwendeten Stoffe, die in gegenseitiger Abhängigkeit stehen, ist eine Erfassung der Stoffströme aktuell ein aufwendiges und interdisziplinäres Unterfangen. Daher wurde der Fokus dieser Untersuchung bewusst auf den urbanen Wohnungsbau gelegt, dessen Bereitstellung (bzw. Bedarfsdeckung) insbesondere für wachsende

Regionen und Metropolregionen (z. B. München) eine zunehmende Herausforderung darstellt.

Um Dynamik und Verhalten von Systemen besser zu verstehen und um diese zu optimieren, ist es unerlässlich, die derzeitigen Stoffströme und -lager zu erfassen und Stellschrauben für eine gezielte Steuerung zu identifizieren. Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- **Wie können Stoffströme und Stofflager des urbanen Wohnungsbaus erfasst und gezielt beeinflusst werden, um eine geschlossene Kreislaufwirtschaft im Bauwesen zu forcieren?**

Die Antwort auf diese Frage wird gezielt dafür verwendet, um folgende untergeordnete Forschungsfragen im Bezug zum urbanen Wohnungsbau zu beantworten:

- **Welche Zusammensetzung haben die Stoffströme und -lager?**
- **Zu welchem Zeitpunkt werden an welcher Stelle (geographisch) welche Stoffe freigesetzt oder benötigt?**
- **Welche Daten werden für eine Erfassung der Stoffströme und -lager benötigt und welche Datenlücken müssen geschlossen werden?**
- **Welche Stoffe aus dem Gebäudebestand können in welchem Umfang und unter welcher Voraussetzung wieder im Gebäudebestand eingesetzt werden?**
- **Wie und unter welchen Voraussetzungen kann in ausgewählten räumlichen Grenzen eine ausgeglichene Massenbilanz (Input = Output) für spezifische Stoffgruppen angestrebt werden?**

Aus der Fragestellung heraus ergibt sich folgende **Hypothese**:

- **Gezieltes Stoffstrommanagement in urbanen Räumen kann dazu beitragen, den Einsatz primärer Ressourcen und Transporte zu verringern.**

Die Ergebnisse dieser Arbeit können von Akteuren der Kreislaufwirtschaft Bau (z. B. Abbruch-, Rohstoff-, Recyclingunternehmen u. a.) verwendet werden, um einen Überblick über Stoffströme und -lager der gebauten Umwelt zu bekommen. Dadurch können Einschätzungen zum zukünftigen Angebot und Bedarf an Stoffen, potentiellen Ver- und Entsorgungsempässen, Sekundärrohstoffquellen sowie deren Verwertungspotential gemacht werden.

Durch die räumliche Betrachtung können Aussagen über den zukünftigen Bedarf für Standorte von Rohstoffminen (z. B. Kiesgruben), Deponien und Recyclinganlagen getroffen werden (z. B. Anlagenkapazitäten). Dies kann unter anderem zur Entwicklung von neuen Technologien beitragen, falls wirtschaftlich vertretbare Mengen eines bestimmten Stoffes zukünftig anfallen sollten.

Des Weiteren können die Ergebnisse zur Formulierung von politischen Zielen sowie zu deren Überprüfung verwendet werden. Durch Identifizierung von potentiellen Schwachstellen können Maßnahmen zur Systemoptimierung eingeleitet werden. Die Erfassung und Bewertung von Stoffströmen bietet dafür eine Basis.

Erfahrungen mit Materialflussbilanzen in Österreich haben gezeigt, dass dieses Instrument den politischen Zielfindungsprozess unterstützen kann, indem das Bewusstsein der Akteure über die Dimensionen des materiellen Durchsatzes geschärft wird und Handlungsfelder für ihre Reduktionen ermittelt werden können (Bringezu 2000, S. 41), (Schuster 1998). Dies forcierte eine Operationalisierung von Nachhaltigkeitsindikatoren.

1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise

Die Arbeit ist in insgesamt 8 Kapitel aufgeteilt. Der Aufbau ist schematisch in Abbildung 1 aufgezeigt.

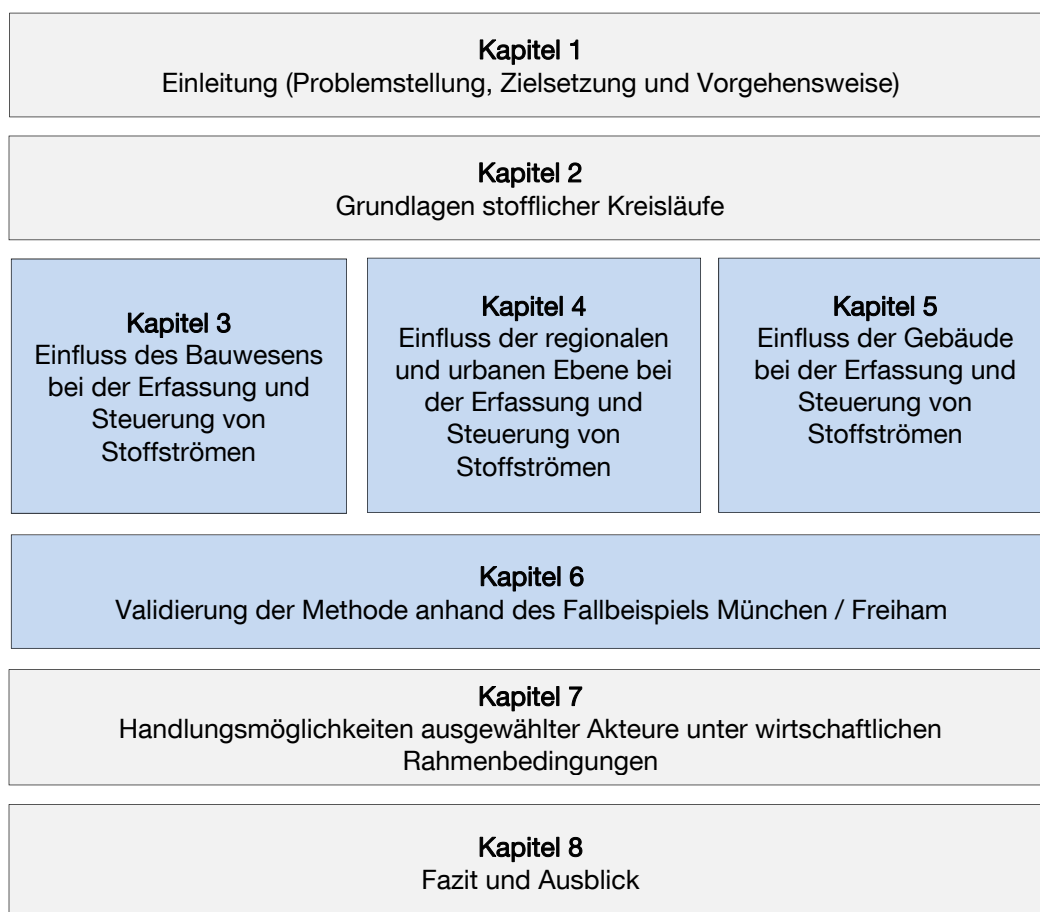


Abbildung 1: Übersicht zum Aufbau der Arbeit

Kapitel 1 leitet das Thema ein, beschreibt den Untersuchungsgegenstand und die Vorgehensweise dieser Arbeit. In **Kapitel 2** werden die Grundlagen und der Stand der Technik aufgeführt. Hierbei werden stoffliche Kreisläufe in allen Lebenszyklusphasen und bestehende Werkzeuge (z. B. Stoffstromanalyse, Geoinformationssysteme [GIS]) beschrieben, welche eine Basis für das in dieser Arbeit entwickelte Stoffstrommodell bilden.

In **Kapitel 3** werden die gängigsten Stoffströme des Bauwesens auf nationaler Ebene erfasst (Stoffstromanalyse). Das Ziel ist neben einer Quantifizierung, die Abhängigkeiten der untersuchten Stoffe untereinander und zu anderen Wirtschaftszweigen (z.B. Automobilindustrie) zu ermitteln. Hierbei wird auf eine, überwiegend auf statistischen Daten basierende, Auswertung zurückgegriffen. Die auf nationaler Ebene erhobenen Daten zu stoffbedingten Fragestellungen können in einem nächsten Schritt, als Referenz für teilraumspezifische Analysen (z. B. urbaner Raum) herangezogen werden (Bringezu 2000, S. 144, 148).

Kapitel 4 untersucht den regionalen und urbanen Einfluss, der durch Bauleistungen ausgelösten Stoffströme. Wie sich im Laufe der Arbeit gezeigt hat, bewegen sich unterschiedliche Stoffe innerhalb unterschiedlich großer Bezugsräume (z. B. international, national, regional, urban u.a.). Beispielsweise wird Kies innerhalb regionalerer Bezugsräume gehandelt - im Gegensatz dazu werden Metalle international gehandelt. Hierbei spielen Anlagenstandorte (z. B. Aufbereitungsanlagen, Deponien, Produktionsstandorte u. a.), der Einfluss der Transporte, Transportwege und Infrastruktur eine maßgebende Rolle. Des Weiteren wird die Vorgehensweise zur Erstellung eines dynamischen Gebäuderohstoffkatasters beschrieben, das einen Teil des in dieser Arbeit entwickelten Stoffstrommodells ist. Die Erkenntnisse aus diesem Kapitel werden im Fallbeispiel in Kapitel 6 verwendet.

In **Kapitel 5** wird auf stoffstromspezifische Fragen der Gebäudeebene Bezug genommen. Hier wird untersucht, wie Stoffströme und -mengen in Wohngebäuden über den gesamten Lebenszyklus systematisch erfasst und beeinflusst werden können. Neben der stofflichen Zusammensetzung (Materialität) werden stoffspezifische und geometrische Kennwerte auf Gebäude-, Bauteil- und Baustoffebene ermittelt, die für weiterführende Untersuchungen in das Modell integriert werden. Ziel des Kapitels ist die Entwicklung einer Erfassungsmethodik von Gebäudestoffströmen und -lagern.

Die Ergebnisse der voranstehenden Kapitel werden genutzt, um in **Kapitel 6** ein ganzheitliches Stoffstrommodell für den urbanen Wohnungsbau anhand eines Fallbeispiels darzustellen und zu validieren. Das entwickelte Modell wird beispielhaft anhand des Wohngebäudebestands des Entwicklungsgebiets München Freiam/Neuaubing, eines der größten städtebaulichen Entwicklungsprojekte in Deutschland, aufgezeigt. Das Ziel ist die Ermittlung der Dynamik von durch Bauleistungen ausgelösten Stoffströmen und -lagern und des Potentials an Sekundärrohstoffen sowie dessen zeitliche Freisetzung. Des Weiteren werden die Potentiale von ausgeglichen Massenbilanzen (Input = Output) ausgewählter Stoffe innerhalb des betrachteten Bezugsraum untersucht. Daraus kann beispielsweise abgeleitet werden, welcher Anteil aus Abbruchmassen für den Neubau im Untersuchungsraum verwendet werden kann (Ermittlung des Selbstversorgungsgrads urbaner Räume).

Die entwickelte Methodik und die daraus abgeleiteten Ergebnisse aus dem Fallbeispiel werden genutzt, um in **Kapitel 7** Handlungsempfehlungen für ausgewählte Akteure der Wertschöpfungskette abzuleiten. Hierbei wird auf das Erreichen von EU- und nationalen Zielen und das Potential zur Schließung von Stoffkreisläufen in urbanen Räumen Bezug genommen.

Kapitel 8 fasst die Arbeit zusammen, bewertet die Ergebnisse und liefert einen Ausblick.

2 Grundlagen stofflicher Kreisläufe

In seinem 1991 erschienenen Werk *Prinzipien der Ökologie* vergleicht der Ökologe Eugene Odum den urbanen Raum mit einem Parasiten, der sich in die umgebende Natur- und Kulturlandschaft einnistet.

„Sie [Die Stadt] produziert keine Nahrung und reinigt nicht die Luft, und das Wasser, das sie entlässt, ist nur selten sauber genug um wiederverwendet zu werden. Je größer die Stadt, um so höher ist der Bedarf an nicht oder erst wenig entwickeltem Land, das quasi als Wirt für den städtischen Parasiten dient.“ (Odum, S. 29)

Der Vergleich mit einem Parasiten lässt erkennen, dass in der Natur ein Parasit, der seinem Wirt Schaden zufügt, nicht lange überleben wird.

„Der gut angepasste Parasit zerstört seinen Wirt nicht – im Gegenteil, er entwickelt mit ihm einen Austausch oder eine Rückkopplung zu beiderseitigem Nutzen.“ (Odum 1991, S. 29).

Kann der urbane Raum in seiner jetzigen Form von seinem parasitären Dasein befreit und nachhaltig transformiert werden?

Um den urbanen Raum modellhaft darzustellen, müssen die relevanten Stoffströme erfasst und in Beziehung zueinander gebracht werden. Der Ingenieur Abel Wolman prägte den Begriff des *Urbanen Metabolismus*, seit sein viel zitierter Artikel *The Metabolism of Cities* 1965 im *Scientific American* erschien. Dieser stellte ein Konzept vor, die Stadt als komplexen Stoffwechselkreislauf abzubilden (Wolman 1965, S. 156). Das Konzept wurde von Forschern und Forschergruppen weiterverfolgt und an Regionen und Städten angewandt, wie beispielsweise 1977 in der Stadt Brüssel von Duvigneaud und Denaeyer-De Smet (Abbildung 2) oder 1995 durch Dörflinger et al. an

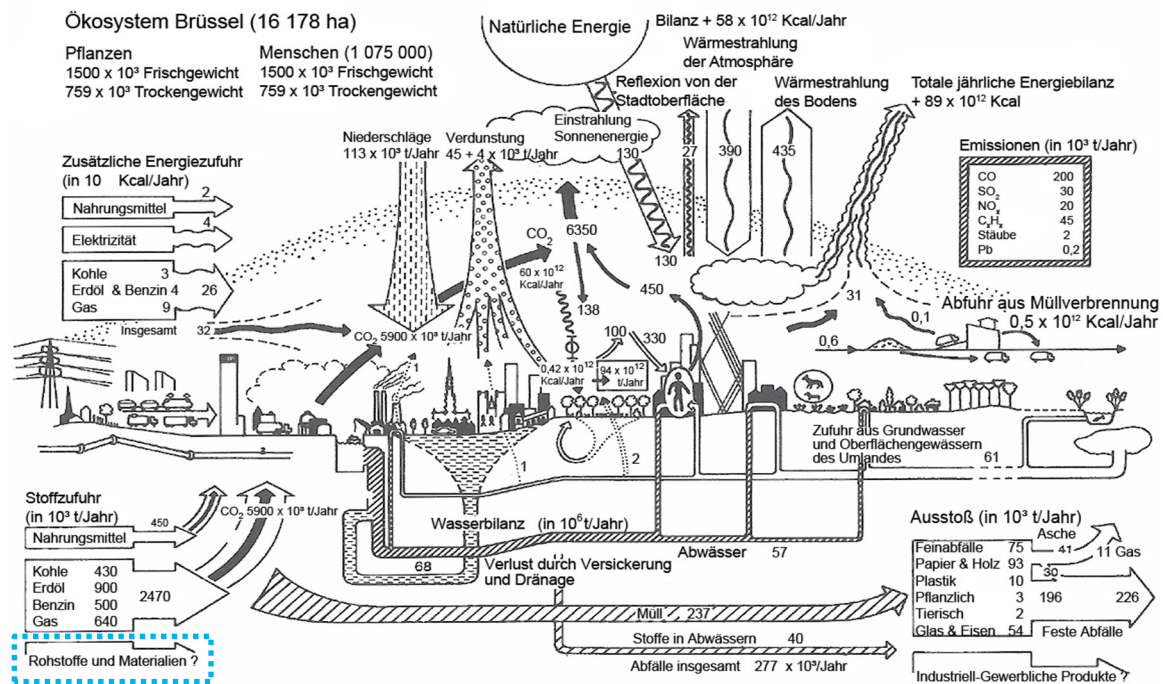


Abbildung 2: Ökosystem der Stadt Brüssel (Duvigneaud und Denaeyer-De Smet 1977)

der Stadt Wien (Duvigneaud und Denaeyer-De Smet 1977) (Dörflinger et al. 1995).

Stoffströme im Bauwesen (z. B. Roh- und Baustoffe) werden durch die Nachfrage nach Bauleistungen ausgelöst. Damit ist das Bauwesen ein wesentlicher Teil des urbanen Metabolismus.

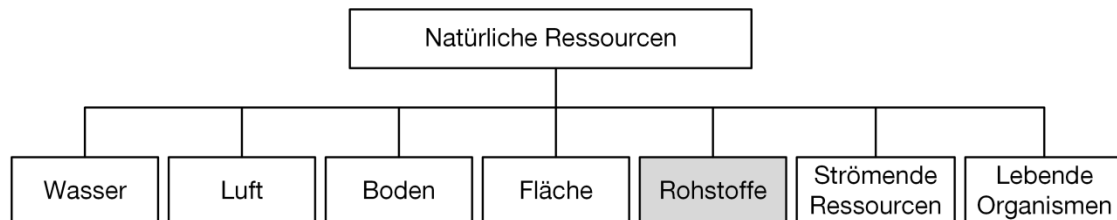


Abbildung 3: Übersicht des Begriffs *natürliche Ressourcen* in Anlehnung an ProgRes (BMUB 2016a, S. 36)

Der in dieser Arbeit verwendete Überbegriff *Stoff* schließt Rohstoffe, Materialien, Güter, Erzeugnisse, Substanzen, Elemente, Produkte, Baustoffe u. ä. mit ein (Brunner und Rechberger 2004, S. 3f). Die VDI Richtlinie 4800 zur Ressourceneffizienz beschreibt Rohstoffe als Stoff oder Stoffgemisch in unbearbeitetem Zustand, das in einen Produktionsprozess einfließt (VDI 4800, S. 9). Laut Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUB) stellen Rohstoffe eine Untergruppe der *natürlichen Ressourcen* dar (Abbildung 3) (BMUB 2016a, S. 36). Natürliche Ressourcen sind laut Definition ein Mittel, das die Natur bereitstellt und das für den Menschen einen Nutzen stiftet (VDI 4800, S. 8).

2.1 Stoffkreisläufe in Bezugsräumen und Wirtschaftssektoren

Ein urbaner Raum, auch als städtischer Raum bezeichnet, ist kein in sich geschlossenes System. Es findet ein stofflicher Austausch zwischen anderen Bezugsräumen (z. B. Regionen, Nationen) statt. Stoffströme bewegen sich nicht ausschließlich innerhalb eines Bezugsraums selbst, sondern auch darüber hinaus (z. B. internationaler Handel).

Ein Bezugsraum stellt einen Überbegriff dar, der z. B. den urbanen Raum, die Region, eine Nation, Handlungsraum eines Unternehmens/Produkts oder eine andere räumliche Ebene beschreibt. Der Bezugsraum ist daher nicht statisch, sondern kann sich in seiner Größe verändern. In der Vergangenheit (z. B. Mittelalter) wurden Stoffe tendenziell innerhalb lokaler Bezugsräume gehandelt. Durch eine zunehmend globalisierte Welt werden heute viele Stoffe global gehandelt (z. B. Stahl), was zu einer Weiterentwicklung von komplexen internationalen Transportnetzen geführt hat.

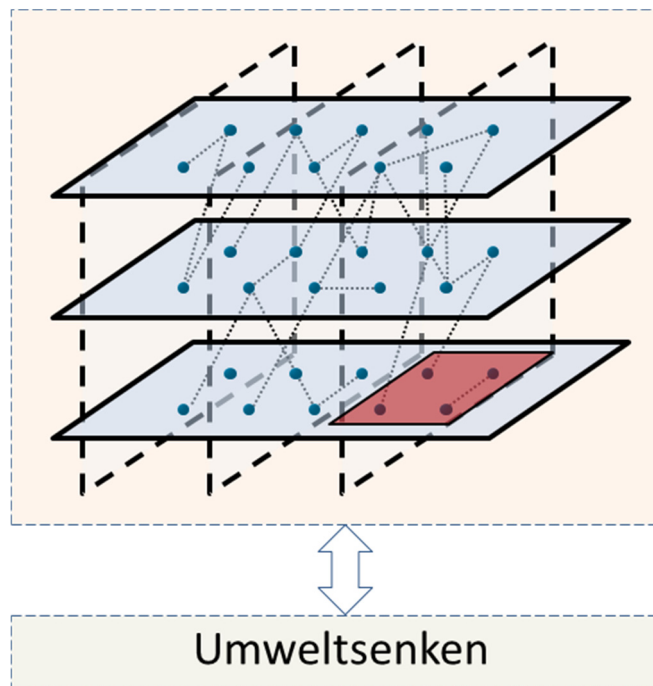
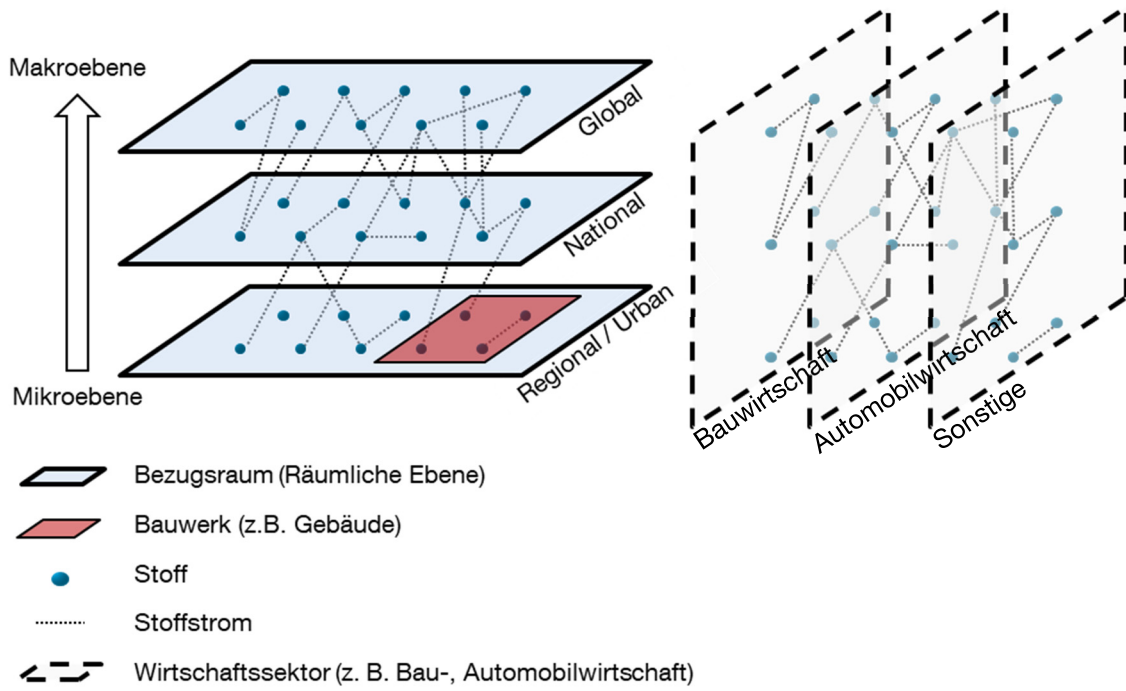


Abbildung 4: Stofflicher Austausch in Bezugsräumen und Wirtschaftssektoren (Eigene Darstellung)

Neben den räumlichen Verstrickungen, werden Stoffströme auch zwischen einzelnen Wirtschaftssektoren (z. B. Automobilindustrie) bewegt. Beispielsweise kann Stahl, der zuvor in einem Automobil verbaut war, zukünftig als Bewehrungsstahl in Gebäuden zum Einsatz kommen.

Durch den stofflichen Austausch zwischen räumlicher und wirtschaftlicher Ebene, ist eine rein isolierte Betrachtung einer einzelnen Ebene nur bedingt aussagekräftig, da es zu einer Problemverschiebung kommen kann. Demnach müssen vorhandene Schnittstellen identifiziert werden.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Stoffströmen des Bauwesens in urbanen Räumen. Im Rahmen dieser Arbeit werden unter bewusster Vernachlässigung der Gesamtheit aller Schnittstellen lediglich beispielhaft Schnittstellen zu anderen Wirtschaftszweigen untersucht. Eine detaillierte Untersuchung würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Kombiniert man die räumlichen und wirtschaftlichen Ebenen, entsteht ein mehrdimensionales Geflecht aus Stoffströmen, das in Abbildung 4 vereinfacht dargestellt wird. Das aufgezeigte anthropogene Stoffstromgeflecht steht wiederum im Austausch mit der Umwelt (z. B. Emissionen, Rohstoffabbau).

Zunehmend sind auch die Verschmelzung des urbanen Raums und ihm umgebenden Regionen zu erkennen. Der urbane Raum wird erweitert - die Region wird zur Stadt. Dies ist beispielsweise am Standort München zu erkennen, wo durch die Erweiterung der Nahverkehrssysteme, eine Ausbreitung des urbanen Raums in das Hinterland (z. B. Region, umliegende Landkreise) stattgefunden hat. Hier wird auch von der Metropolregion München gesprochen.

Der Begriff „Region“ ist nicht eindeutig und geopolitisch zu definieren. In der Literatur finden sich zahlreiche Definitionen des Begriffs. Häufig wird eine Region als ein bestimmtes „Verbreitungsgebiet“ oder „Wirkungsgebiet“ beschrieben. Es ist zwischen der lokalen und nationalen Ebene angesiedelt und setzt nahe und ferne Elemente zueinander in Bezug (Thierstein und Walser 2000, S. 61).

Gablers Wirtschaftslexikon definiert den Begriff als zusammenhängendes geografisches Gebiet von zumeist „mittlerer“ Größenordnung zwischen aggregierter Volkswirtschaft und disaggregierten Raumpunkten (Lokalitäten) als Kennzeichnung einer bestimmten Maßstabsebene der räumlichen Analyse (Gabler Wirtschaftslexikon 2016, S. 1). Der Begriff „mittlerer“ ist jedoch sehr unpräzise und bietet einen großen Interpretationsspielraum. Regionen können daher unterschiedliche Maßstabsebenen haben, wie zum Beispiel Handelsregionen, die sich über ganze Kontinente erstrecken.

Regionen können unterschiedlich gebildet werden. Thierstein und Walser nennen hier drei mögliche Abgrenzungskriterien: Homogenität, Funktionalität und Normativität (Thierstein und Walser 2000, S. 62).

- Homogene Gliederung: Einteilung nach Gleichartigkeit einzelner Strukturmerkmale
- Funktionale Gliederung: Auf Basis von sozialen oder wirtschaftlichen Beziehungsverflechtungen
- Normative Gliederung: Politisch-institutionelle Grenzen

Zur besseren Verständlichkeit teilt Bätzing den Begriff in drei Maßstabsebenen ein (Bätzing 2001, S. 34):

- Mikroregion: relativ kleine Einheit oberhalb der Gemeinde (Planungsregionen)
- Mesoregion: Einheit in der Größe von Bundesländern oder kleineren europäischen Staaten
- Makroregionen: Große Teilräume in Europa (z. B. Europa kann in 10 Makroregionen gegliedert werden)

In Bezug auf diese Arbeit siedelt sich eine Region zusammen mit dem urbanen Raum auf der Mikroebene (z. B. Metropolregion München oder Landkreis) an (Abbildung 4). Die Region ist mit einem Radius von rund 30 bis 50 km definiert. Dies entspricht einer Einwohnerzahl von ca. 500.000 bis 3.000.000.

Je nach Stoff kommen unterschiedliche Betrachtungsebenen in Frage. Wie sich im Laufe der Arbeit gezeigt hat, werden insbesondere mineralische Baustoffe (z. B. Kiese und Sande; Transportbeton, Bauschutt) innerhalb regionaler Bezugsräume gehandelt. Aus ökonomischen und technischen Gründen ist bei diesen Stoffen eine Transportdistanz von mehr als 30 - 40 km nicht rentabel (siehe Kapitel 4). Daher ist eine gezielte Steuerung dieser Stoffströme auf kommunaler und landesweiter Ebene anzustreben. In Regionen mit hohem Kiesaufkommen werden Recycling (RC) Materialien beispielsweise wenig Chancen eingeräumt, da das Primärmaterial vergleichsweise kostengünstig verfügbar ist.

Ein Beispiel für einen global gehandelten Stoff für Bautätigkeiten ist Stahl. Dessen Verwendung und Verbreitung wird weitgehend von der Weltwirtschaft gesteuert, die unmittelbar mit der Finanzwirtschaft (z. B. Spekulationen, Börse) verknüpft ist. Bei der Stahlherstellung werden verschiedene Stoffe (z. B. Eisenerz, Koks, Legierungsmetalle u. a.) benötigt, die aus unterschiedlichen Teilen der Welt zusammengetragen werden und demnach unterschiedlichen Einflussfaktoren unterliegen. Daher werden Stoffströme zunehmend auch von internationalen Faktoren (z. B. Währungsfluktuationen, Handelsembargos, Konflikte, Umweltkatastrophen u. v. m.) beeinflusst.

Bei Stahl werden die Einflüsse hauptsächlich durch Regeln des internationalen Handels und Marktes bestimmt; regionale Belange haben einen untergeordneten Einfluss. Dies ist insbesondere für Deutschland relevant, da ein Großteil des Stahls aus dem EU-Ausland (z. B. China) importiert wird (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2017, S. 13).

Die Größe des Bezugsraums ist demnach dynamisch und abhängig von den maximalen Transportradien der betrachteten Stoffe. Die Einflüsse der Transportradien werden in Kapitel 4 werden genauer dargestellt.

2.1.1 Metabolismus der Anthroposphäre

Die Anthroposphäre (vom Menschen gemacht) und die Umwelt bilden ein geographisch definiertes offenes System. Baccini und Brunner definieren dies als „Regionalwirtschaft“ (Abbildung 5). Das Subsystem Umwelt setzt sich aus den Teilbereichen Luft, Wasser und Boden zusammen (Baccini und Brunner 1991, S. 10f). Dieser Teilbereich kann auch mit dem Begriff Umwelt-Senken definiert werden, die die Emissionen und Schadstoffe aus menschlichen Aktivitäten aufnehmen. Die Anthroposphäre ist in weitere vier Subsysteme unterteilt:

- Industrie, Handel, Dienstleistung (IHD)
- Abfallmanagement
- Landwirtschaft
- Haushalte

Der Bausektor kann als übergreifendes anthropogenes Subsystem gesehen werden, weil sich Bestandteile in allen der vier ursprünglichen Subsysteme wiederfinden. Wohngebäude sind beispielsweise im Subsystem Haushalte angesiedelt und stehen mit den anderen drei Subsystemen und zusätzlich mit der Umwelt in Wechselwirkung. Aus der Umwelt werden Stoffe entnommen, wieder zugeführt und gleichzeitig Emissionen abgegeben. Im Sektor Landwirtschaft werden beispielsweise nachwachsende Rohstoffe (z. B. Bauholz) bereitgestellt.

Rohstoffe und Energie fließen in das anthropogene Teilsystem der Regionalwirtschaft, um im Subsystem IHD in Produkte umgewandelt zu werden (z. B. Produktion und Herstellung von Baustoffen). Rohstoffe können dabei direkt aus der Umwelt (als Primärrohstoffe) oder von anderen Subsystemen (z. B. Sekundärrohstoffe) importiert werden. Nach einer Zwischenlagerung im Bestand (z. B. Gebäuden) durchlaufen nicht benötigte Stoffe das Teilsystem Abfallmanagement, wo ein Teil der Stoffe eine erneute Verwendung innerhalb der Systemgrenzen der Regionalwirtschaft finden kann oder an andere Systeme bzw. andere Bezugsräume sowie die Umwelt abgegeben werden kann.

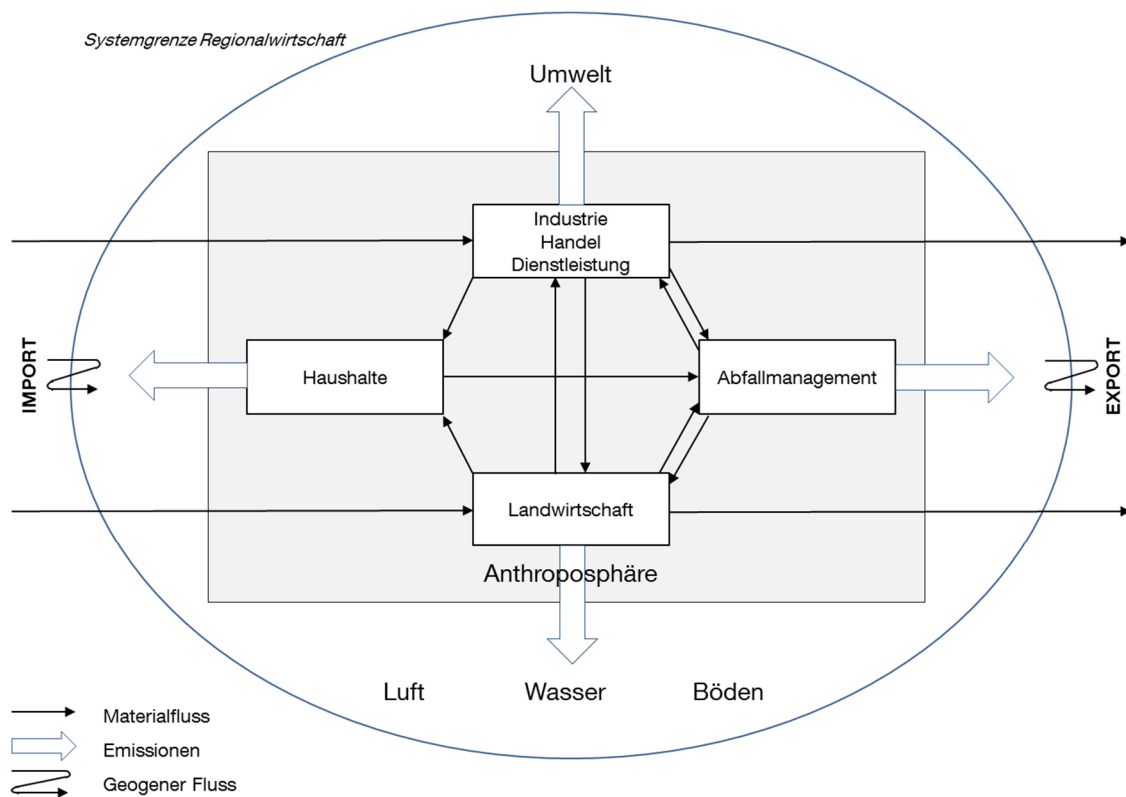


Abbildung 5: Interaktionen zwischen Anthroposphäre und Umwelt in einer Regionalwirtschaft (Eigene Darstellung nach Baccini und Brunner 1991, S.11)

Innerhalb der Regionalwirtschaft können Stoffe, die keine wirtschaftliche Verwendung finden, in Deponien abgelagert werden. Bei diesem Prozess gehen die Stoffe nicht endgültig verloren, da eine Deponie (wie Bauwerke) auch als Zwischenlager angesehen werden kann. Analog zum Begriff des *urban mining* wird bei Deponien von *landfill mining* gesprochen, was unter momentanen Voraussetzungen noch unwirtschaftlich ist (Krüger et al. 2016, S. 1).

Mehrere regionale Subsysteme bilden ein übergeordnetes System der Volkswirtschaft ab (z. B. Deutschland), das sich wiederum durch globalen Handel mit anderen Volkswirtschaften vernetzt, um Stoffe auszutauschen. Daher können Einflüsse und Veränderungen auf einer Ebene auch Auswirkungen auf die Stoffströme anderer Ebenen haben. Dies hängt auch davon ab, wo ein Stoff herkommt, wie er zusammengesetzt ist und wo er hingehet.

In den vier anthropogenen Subsystemen werden Schätzungen zufolge etwa 10^4 bis 10^5 chemisch definierte Substanzen in verschiedenen Kombinationen und Funktionen bewegt. Dies beinhaltet Rohstoffe, die beispielsweise aus dem Bergbau gewonnen werden, bis hin zu Verbrauchs- und Gebrauchsgütern (Baccini und Brunner 1991, S. 10).

2.1.2 Stoffstromanalyse

Die Stoffstromanalyse (analog Materialflussanalyse [MFA]) dient der systematischen Erfassung und Bewertung von Transportflüssen und Stofflagern in einem definierten System mit räumlichen und zeitlichen Bestandteilen (Brunner und Rechberger 2004, S. 3). Eine wichtige Eigenschaft der Stoffstromanalyse stellt der Massenerhaltungssatz dar - ein fundamentales naturwissenschaftliches Prinzip. In einem geschlossenen System folgt keinerlei Änderung der Masse, wenn keine Stoffe hinzugefügt oder entfernt werden (Brunner und Rechberger 2004, S. 5).

Mit dieser Methode lassen sich Massenflüsse und Lager (z. B. Gebäudebestand) visualisieren, wodurch eventuelle Probleme oder Trends frühzeitig erkannt werden können, um ein System zu optimieren (z. B. Minderungspotenziale) (Bringezu 2000, S. 1). Ohne das Wissen zu Stoffströmen und Stofflagern ist eine ressourceneffiziente Optimierung anthropogener Systeme nicht möglich. Die in dieser Arbeit verwendeten Darstellungssymbole werden beispielhaft in Abbildung 6 aufgezeigt. Die verwendeten Zahlenwerte beziehen sich, falls nicht anders angegeben, auf Massen (z. B. Tonnen [t]).

Um Dynamik und Verhalten von Systemen besser zu verstehen, ist eine Untersuchung von Stofflagern und angrenzenden Rückkopplungsschleifen (z. B. Recycling) unablässig. Für eine Aussage zum Verbleib und Verwertungspotenzial der verbauten Stoffe ist es nötig, eine Bestandsanalyse der stofflichen Bauwerkszusammensetzung durchzuführen (z. B. Erstellung eines Rohstoffkatasters).

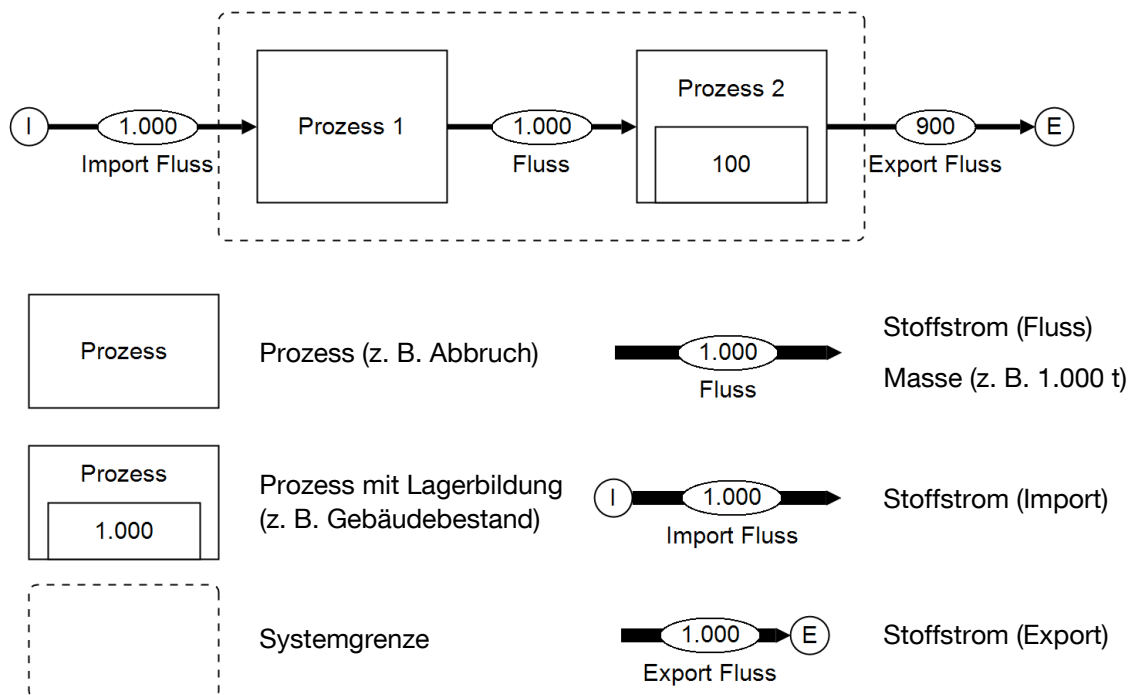


Abbildung 6: Beschreibung der verwendeten Symbole in der Stoffstromanalyse (Eigene Darstellung)

Durch Stofflager (z. B. Gebäudebestand) können sich die Zu- und Abflüsse unabhängig voneinander verhalten und müssen sich, im Gegensatz zum Durchfluss, nicht im Equilibrium befinden. Ein Abfluss kann beispielsweise gesteigert werden, ohne dass der Zufluss verändert wird; es verändert sich lediglich die Größe des Lagers (z. B. Badewanne oder Reservoir). Die Veränderung des Lagers beeinflusst daher die Dynamik des Systems (Meadows et al. 2004, S. 246f); (Meadows und Wright 2009, S. 23f).

In einer wachsenden und auf Wachstum ausgelegten Wirtschaft (z. B. im Bauwesen) erscheint es beispielsweise sehr schwierig, eine ausgeglichene Massenbilanz (Input = Output) zu erreichen. Die Stoffstromanalyse bietet ein mögliches Werkzeug, Massenbilanzen zu analysieren und zu optimieren.

2.2 Kreislaufwirtschaft im Bauwesen

Der Begriff Kreislaufwirtschaft, im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG), steht für die Vermeidung und Verwertung von Abfällen (§ 3 Abs. 19 KrWG). Der Begriff ist mit dem gleichzusetzen, was man früher als Abfallwirtschaft bezeichnet hat.

Ein Kreislauf, laut Duden (z. B. Blutkreislauf), steht für eine sich stets wiederholende, zu ihrem Ausgangspunkt zurückkehrende Bewegung, in der etwas abläuft, oder sich vollzieht (Dudenredaktion o. J.). Im Rahmen dieser Arbeit wird auf diese Definition

zurückgegriffen. Damit ist der Begriff Kreislaufwirtschaft gleichbedeutend mit der *Zirkulären Ökonomie* (engl. *Circular Economy*). Dies bedeutet, dass alle Lebenszyklusphasen berücksichtigt und Abfallfraktionen so aufbereitet werden, um für eine erneute Nutzung (erneuter Kreislauf) zur Verfügung zu stehen (Abbildung 7).

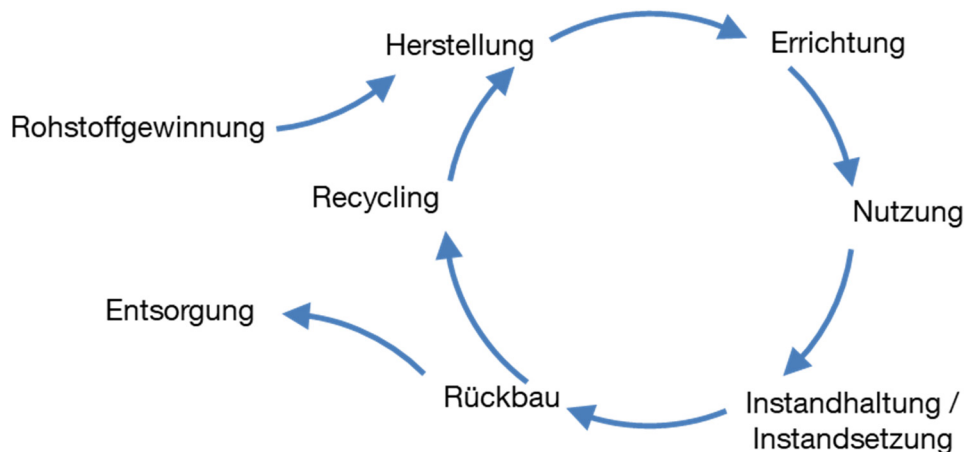


Abbildung 7: Beispielhafter Stoffkreislauf im Bauwesen (Eigene Darstellung nach Lindner 2009, S. 1)

Vor dem Hintergrund des zunehmenden Rohstoffverbrauchs stellt sich die Frage, wie lange der Status Quo der Bautätigkeiten und des Wachstums aufrechterhalten werden kann, ohne dass eine ernstzunehmende Rohstoffverknappung eintritt, die auch wirtschaftliche Nachteile bringt. Ein bekanntes Beispiel ist die Verknappung von Sand, in einer für Bau und Industrie erforderlichen Form, in Teilen der Welt. Sand wird beispielsweise für die Produktion von Beton und Glas benötigt. Beide Materialien kommen überwiegend im Bauwesen zum Einsatz. Glas findet aber auch Eingang in andere Wirtschaftszweige (z. B. Informationstechnik [IT], Automobilindustrie u. a.).

Die Rohstoffproblematik betrifft nicht nur mineralische Rohstoffe. Eine Vielzahl von Elementen ist in unterschiedlicher Form in unseren Bauwerken wiederzufinden. Ein Beispiel hierfür sind Metalle in unterschiedlichen Legierungen, die eine Vielzahl von Elementen enthalten können, ebenso kritische Rohstoffe wie Seltenerdmetalle, die beispielsweise in der Anlagentechnik oder als Beschichtung zum Einsatz kommen.

Durch die Vielzahl der im Bauwesen verwendeten Stoffe, die in gegenseitiger Abhängigkeit stehen, ist eine Erfassung der Stoffströme ein aufwendiges und interdisziplinäres Unterfangen. Um diese dennoch realistisch abzubilden, bedarf es einer Vielzahl von Stoffprofilen, die miteinander verknüpft sind. Jeder der einzelnen Stoffe (z. B. Elemente) ist Teil eines eigenen Kreislaufs (z. B. Kupferkreislauf, Bleikreislauf u. a.), der auch im Gesamtkontext als Subkreislauf oder Substoffkreislauf zu sehen ist.

Der Begriff Substoffkreislauf wurde bereits 1998 im Zusammenhang mit Recyclingfraktionen verwendet (Kohler 1998, S. 45). Hierbei sollte Bauschutt in seine einzelnen ursprünglichen Bestandteile (Substoffkreislaufe) zerlegt werden.

Als Teil des urbanen Metabolismus, haben Bauwerke (z. B. Gebäude, Infrastruktur) einen entscheidenden Einfluss auf die Stoffströme. Der Gebäudebestand in Deutschland befindet sich in einem Stadium des Wachstums (Bigalke et al. 2014) (Destatis 2015) (Destatis 2016b) (Destatis 2016d). Es werden mehr Stoffe benötigt (z. B. durch Neubau, Sanierung) als aus dem Bestand freigesetzt werden (z. B. durch Abriss). In anderen Worten: die Bautätigkeiten sind höher als die Abbruchraten. Dadurch wird der Bestand zu einer immer größer werdenden Rohstoffquelle für die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen (Lichtensteiger 2006, S. 1).

Bei der Stoffstrombetrachtung von Baustoffen und Gebäuden ist eine Einteilung anhand von Phasen (z. B. Prozessschritten) vom Vorteil. Die Lebenszyklusbetrachtung umfasst dabei mehrere Phasen und Komponenten. Auf Gebäudeebene gilt die DIN EN 15978:2010 – Nachhaltigkeit von Bauwerken – und auf Produktebene die DIN EN 15804, für die Erstellung von Umweltproduktdeklarationen. Beide Normen wurden durch das Technische Komitee CEN/TC 350 „Nachhaltigkeit von Bauwerken“ erarbeitet, was zu einer Harmonisierung der Normen und Bewertungsgrundlagen geführt hat.

In beiden Normen ist der Lebenszyklus in jeweils identische Phasen unterteilt, um eine Kompatibilität zu gewährleisten. Die Lebenszyklusphasen sind in Abbildung 8 dargestellt. Die jeweiligen Begriffe werden im Laufe dieser Arbeit verwendet.

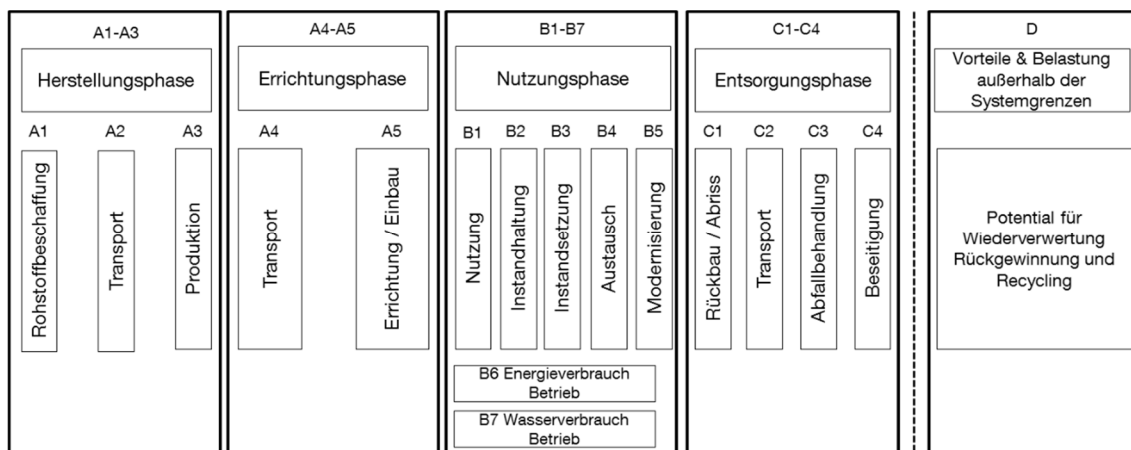


Abbildung 8: Lebenszyklusbetrachtung von Bauwerken und Bauprodukten (Darstellung nach DIN EN 15978 und DIN EN 15804)

Der urbane Raum setzt sich aus Bauwerken und Bauprodukten in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen zusammen. Für die Lebenszyklusbetrachtung von urbanen Räumen gibt es noch keinen normierten Ansatz. Demnach ist es sinnvoll, bestehende modulare Informationen, die bereits auf der Produkt- und Gebäude-Ebene zum Einsatz kommen, soweit wie möglich für die Betrachtung des urbanen Raums und seinen Bestandteilen zu verwenden.

2.2.1 Herstellung

Die Herstellungsphase umfasst die Rohstoffbeschaffung, Transporte und die Produktion von Baustoffen (z. B. Zement) und Produkten (z. B. Fensterelement). Der Abbau von Rohstoffen ist durch die geologischen Gegebenheiten standortgebunden. In der Regel haben neue Abbauprojekte sehr lange Anlaufzeiten, die 10 Jahre überschreiten können (Euroquarz 2010, S. 1). Ein Risikofaktor stellt dabei die zukünftige Preisentwicklung der abzubauenen Rohstoffe dar. Daher ist es notwendig, frühzeitig Information über den Anfall und Bedarf von Primär- und Sekundärrohstoffen für Planung und Erschließung zu sammeln.

Der Rohstoffabbau ist dynamischer Natur und stellt eine vorübergehende Flächeninanspruchnahme dar – d.h., dass Fläche nicht *verbraucht* wird. Nachdem Minen ausgebeutet und verwaist sind, können sie für andere Zwecke (z. B. Erholungsflächen) genutzt werden (Becker-Platen 1993, S. 101).

Für manche potenziellen Rohstoffexplorationsgebiete (z. B. Kiesgruben) ist eine Erschließung durch Infrastruktur notwendig, was einen zusätzlichen Rohstoffbedarf nach sich zieht. Des Weiteren ist eine Flächenkonkurrenz zu anderen Nutzungsarten (z. B. Landwirtschaft, Siedlung, Erholung) vorhanden. Neben Rohstoffen und Flächen, werden auch energetische Ressourcen (z. B. Strom) in allen Lebenszyklusphasen benötigt (z. B. Abbau, Transporte, Aufbereitung), diese stehen jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit.

Eine Verschärfung der Rohstoffverknappung hat zur Folge, dass mit geringer werdenden Stoffkonzentrationen bisher weniger lukrative Vorkommen ausgebeutet werden. Sobald man Lagerstätten mit niedrigen Erzgehalten erschließen möchte, steigt der benötigte Aufwand (z. B. Energie) für den Bergbau stark an (Bardi und Leipprand 2013, S. 102). Ebenfalls steigt die Masse des Abraums, da mehr Material bearbeitet werden muss, um die gleiche Menge an „brauchbaren“ Rohstoffen zu fördern.

Der Großteil des Abraums besteht aus inertem „Abfall“ (z. B. Erde, Gestein) (Weikert und Heinritz 2017, S. 6). Oft werden auch Chemikalien und Hilfsstoffe eingesetzt, die eine Gefährdung für die Umwelt darstellen können. Die Umwelt- und Schadstoffbelastung (z. B. Emissionen) beschränkt sich dabei keineswegs nur auf den Abbau von Rohstoffen, sondern auf den gesamten Lebenszyklus.

Bei der Produktion von End- und Zwischenprodukten wird eine Vielzahl von Stoffen, die oft aus unterschiedlichsten Teilen der Erde gewonnen werden, unter Einsatz von Ressourcen umgewandelt und zusammengeführt. Die Effizienzsteigerung von einzelnen Produktionsprozessen spielt daher im Lebenszyklus ebenfalls eine große Rolle, diese sind aber nicht Fokus dieser Arbeit. Als Beispiel für eine ausgereizte Technik, ist die Produktion von Zementklinker. Von 1950 bis 1980 sank der spezifische Brennstoffenergieeinsatz von 8000 auf ca. 3500 kJ/kg Klinker, danach bewegte er sich weiterhin auf gleichem Niveau (VDZ 2017, S. 12), (Heinz 2016, S. 58).

Zwischen den einzelnen Prozessen des Lebenszyklus, finden Transporte statt (siehe 2.2.6). Die abgebauten Rohstoffe werden zur Umwandlung in Produktionsbetriebe befördert, um anschließend auf die Baustelle geliefert zu werden, um Bauwerke zu errichten.

2.2.2 Errichtung

Aus den sich – insbesondere im urbanen Bereich – notwendigen Bautätigkeiten werden diverse Stoffströme in Gang gesetzt, um dem steigenden Bedarf an Wohn- und Arbeitsraum gerecht zu werden. Bauwerke unterteilen sich in Gebäude und Infrastruktur. Der Gebäudebestand wiederum in Wohngebäude (WG) und Nichtwohngebäude (NWG) (Abbildung 9). In Deutschland wurden 2013 ca. 21,5 Mio. m² Wohnfläche in neuen WG und 27,2 Mio. m² Nutzfläche in NWG geschaffen (Destatis 2016b, S. 65); (Destatis 2016c, S. 50), (Bigalke et al. 2014, S. 58).

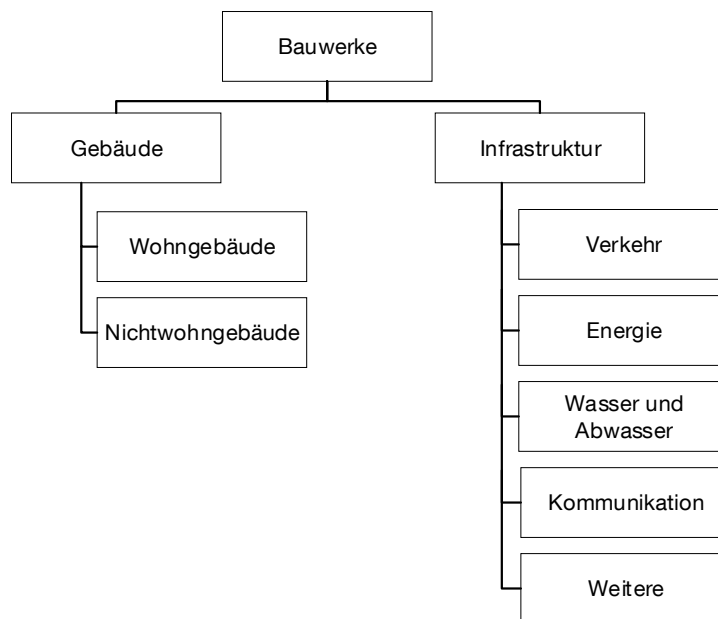


Abbildung 9: Untergliederung von Bauwerken

Für Neubau und Sanierung, wurden deutschlandweit im Jahr 2010, rund 53 Mio. t Rohstoffe für WG aufgewendet und 67 Mio. t für NWG. Demgegenüber stehen Rohstoffabgänge aus dem Rückbau von 20 Mio. t bei WG und 23 Mio. t bei NWG (Schiller et al. 2015, S. XXXI). Die Errichtung und materielle Zusammensetzung (Materialität) von Gebäuden wird in Kapitel 5 behandelt.

Neben dem Stoffbedarf für Gebäude, werden zusätzlich Stoffe für die Erschließung durch Infrastruktur benötigt. Beispielsweise werden bei der Erschließung von Neubaugebieten neben Anlagen zur Ver- und Entsorgung auch Straßen und Wege benötigt. Demnach stehen Gebäude und Infrastruktur in direkter Abhängigkeit zueinander. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 2.2.6.4 detaillierter behandelt.

2.2.3 Nutzung

Die Nutzungsphase beginnt mit der Inbetriebnahme des Gebäudes und endet mit dessen Stilllegung. Im Laufe der Nutzung werden weitere Rohstoffe für Sanierung Instandhaltung, Instandsetzung, Austausch und Modernisierung benötigt. Der

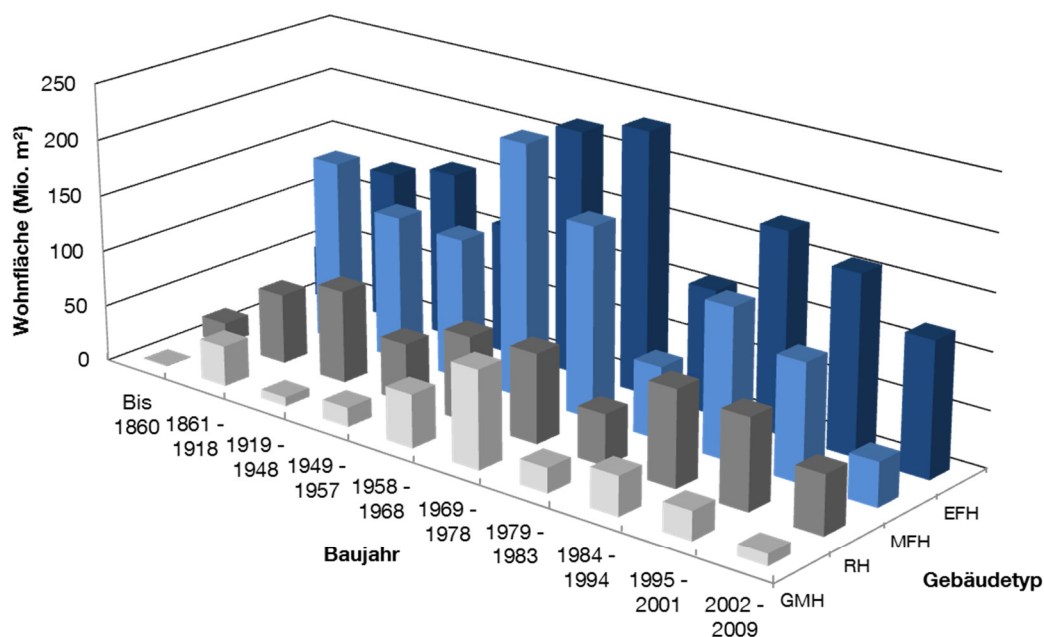
Dämmstoffmarkt beispielsweise profitiert von einer energetischen Sanierung des Bestands, da Stoffströme in Form von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) u. Ä. in Gang gesetzt werden.

Durch die verhältnismäßig langen Lebens- und Nutzungsdauer von Bauwerken, müssen Bauteile im Laufe des Lebenszyklus ausgetauscht oder erneuert werden. Hier fallen neben den benötigten Stoffen auch Abfallstoffe (z. B. Schadstoffe, Baustellenabfälle u. a.) an, die entsprechend behandelt oder entsorgt werden müssen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Datenerfassung von Bestandsgebäuden, die derzeit genutzt werden, in die Nutzungsphase eingeordnet. In Kapitel 5 (Gebäude), wird näher auf die dynamischen Prozesse und auf die Verknüpfung mit Materialkennwerten eingegangen.

2.2.3.1 Bestandsdaten für Gebäude

Deutschland verfügt über fortschreibbare Daten zum Gebäudebestand. Diese werden vom Statistischen Bundesamt erhoben. Hier liegt der Hauptfokus bei Wohngebäuden. Bei der Statistik wird unter anderem nach Anzahl der Gebäude, Anzahl der Wohnungen, sowie nach Wohnfläche unterschieden. Durch die Fortschreibung der Statistik, können Aussagen zum Zu- und Abgang (Neubau und Abriss) von Gebäuden



EHF – Freistehende Wohngebäude (1-2 Wohnungen)

RH – Doppelhaus Wohngebäude (1-2 Wohnungen)

MFH – Wohngebäude mit 3-12 Wohnungen

GMH – Wohngebäude mit 13 oder mehr Wohnungen

Abbildung 10: Verteilung der Wohngebäude in Deutschland nach Wohnfläche (Eigene Darstellung nach Diefenbach 2013, S. 2)

getroffen werden. Daraus ergibt sich eine Übersicht, wie viele Gebäude zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhanden sind (Größe des Stofflagers Gebäude).

Regionale Gebäudedaten werden beispielsweise von Statistischen Landesämtern, Städten, Gemeinden, oder Landratsämtern erhoben. Bei regionalen Erfassungen besteht beispielsweise die Schwierigkeit, dass das Baualter der jeweiligen Gebäude entweder nicht erhoben wird oder nicht öffentlich zugänglich ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Baualtersklassen für die Auswertung von der LHS München zur Verfügung gestellt.

Aus den Statistiken stellt die Wohnfläche einen Wert dar, um flächendeckend stoffliche Gebäudeinformationen zu erheben. Die Wohnfläche kann für diesen Zweck anhand von Kennwerten in andere Flächen- oder Volumeneinheiten umgewandelt werden. Dennoch wäre eine zusätzliche Erfassung der Brutto-Grundfläche (BGF) oder des Brutto-Rauminhalts (BRI) von Vorteil, um die Umwandlungsunsicherheiten der Kennwerte zu umgehen.

Das Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) stellte mit seiner Gebäudetypologie eine Auswertung der Gebäude- und Wohnungszählung 2011 für den Standort Deutschland auf (Diefenbach 2013, S. 2). Ergebnis ist eine Matrix, die Baualtersklassen und Gebäudetypen gegenüberstellt und in Bezug zur Gesamtwohnfläche und Gesamtgebäudeanzahl setzt (Abbildung 10).

Diese Art der statistischen Erfassung wäre auf regionaler Basis von großem Vorteil. Ebenso vorteilhaft wäre eine detaillierte Erfassung von regionalen Neubau- und Abbruchmaßnahmen, die nicht nur auf die Anzahl der Gebäude bezogen ist, sondern auch auf das Gebäudevolumen (z. B. BRI).

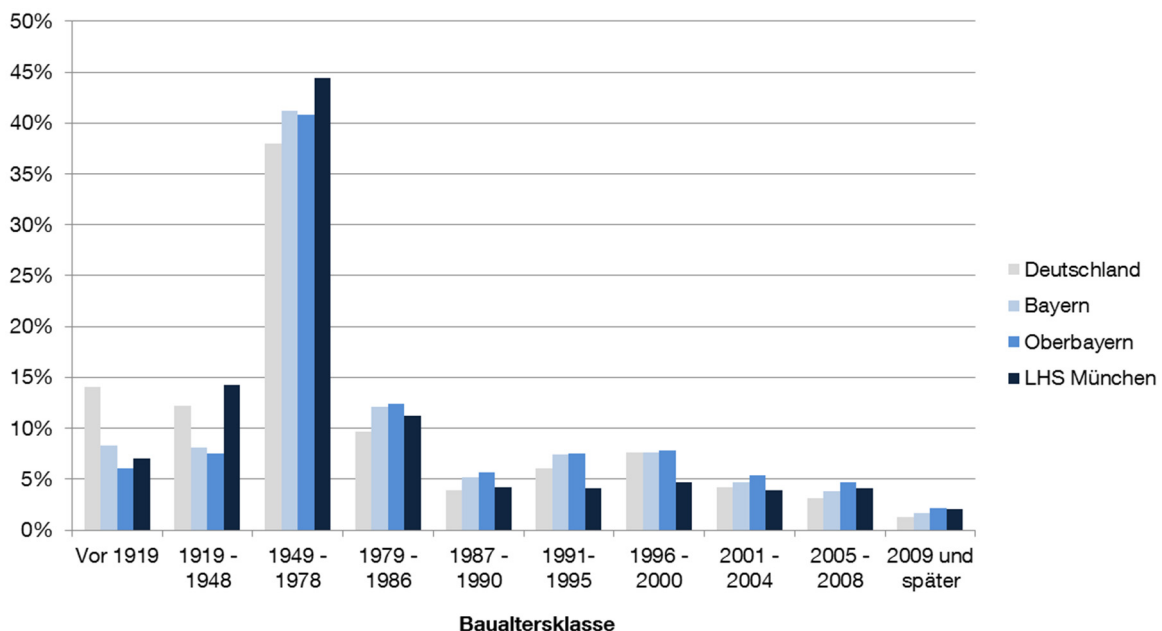


Abbildung 11: Vergleich des Baualtersklassenanteils von Wohngebäuden innerhalb unterschiedlicher Bezugsräume (Eigene Darstellung nach Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2014b; Statistisches Bundesamt 2014b)

Abbildung 11 zeigt die Verteilung der Baualtersklassen von Wohngebäuden innerhalb unterschiedlicher Bezugsräume. Es ist zu erkennen, dass die Verteilung einem ähnlichen Muster folgt. In der LHS München ist der Anteil von Wohngebäuden, die vor 1979 errichtet wurden, höher als in den anderen gewählten Bezugsräumen. Demnach ist davon auszugehen, dass zukünftig mit höheren Abrissquoten zu rechnen ist, da der Wohngebäudebestand ein höheres Durchschnittsalter aufweist und eine Mehrzahl der Wohngebäude ihre maximale Lebensdauer erreicht hat.

Bei einer Betrachtung der Wohngebäudetypen ist zu erkennen, dass der Anteil von Mehrfamilienhäusern (Gebäude mit mehr als 3 Wohneinheiten [WE]) in der LHS München höher ist, als in den anderen ausgewählten Bezugsräumen (Abbildung 12).

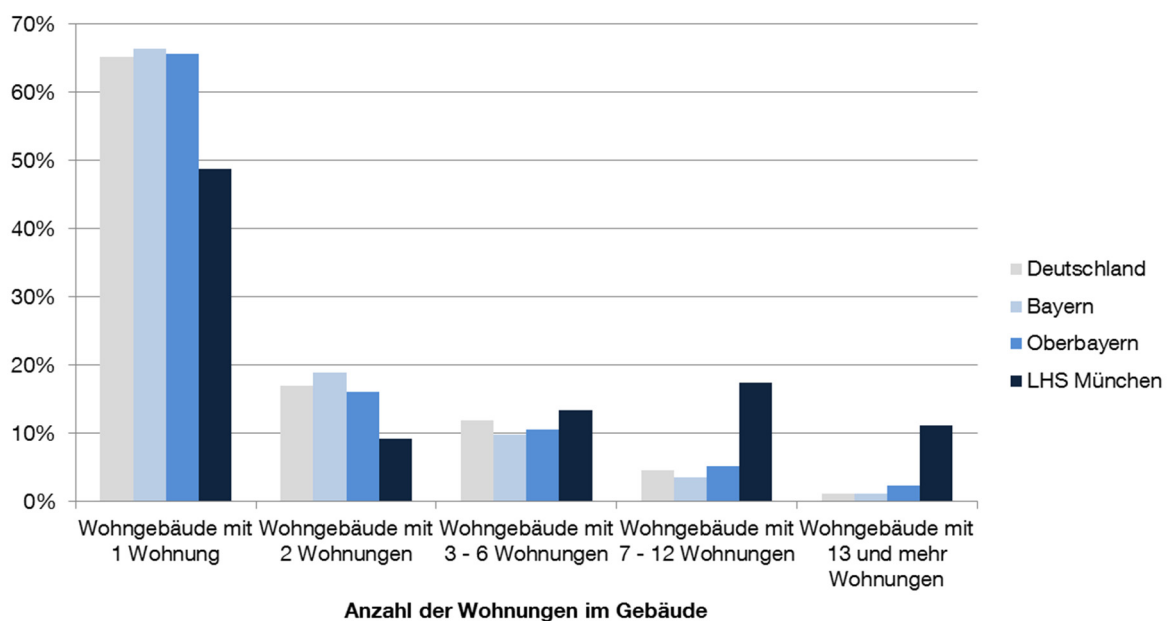


Abbildung 12: Vergleich der Wohngebäudegröße in unterschiedlichen Bezugsräumen (Eigene Darstellung nach Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2014b; Statistisches Bundesamt 2014b)

Dennoch beträgt der Anteil von Einfamilienhäusern (im Bezug zur Gebäudeanzahl) in der LHS München fast 50 %, im Vergleich zu rund 65 % in den anderen Bezugsräumen. Bei einer Betrachtung urbaner Räume ist es demnach sinnvoll, insbesondere Mehrfamilienhäuser in ihrer Zusammensetzung detaillierter zu untersuchen. Dies wird im Gebäudebeispiel (Kapitel 5 und Anhang B) veranschaulicht, in dem ein Mehrfamilienhaus (Baujahr 1962) anhand seiner stofflichen Zusammensetzung untersucht wird.

2.2.3.2 Dynamische Entwicklung des Bestands durch Neubau und Abriss

Für die Analyse von Stoffströmen und Stofflagern ist die dynamische Entwicklung des Gebäudebestands zu berücksichtigen. Anhand von Neubau- und Abbruchstatistiken lässt sich die Dynamik berechnen, die beispielhaft an der Stadt München aufgezeigt ist (Abbildung 13).

$$\text{Bestand } (t+1) = \text{Bestand } (t) - \text{Abbruch} + \text{Neubau}$$

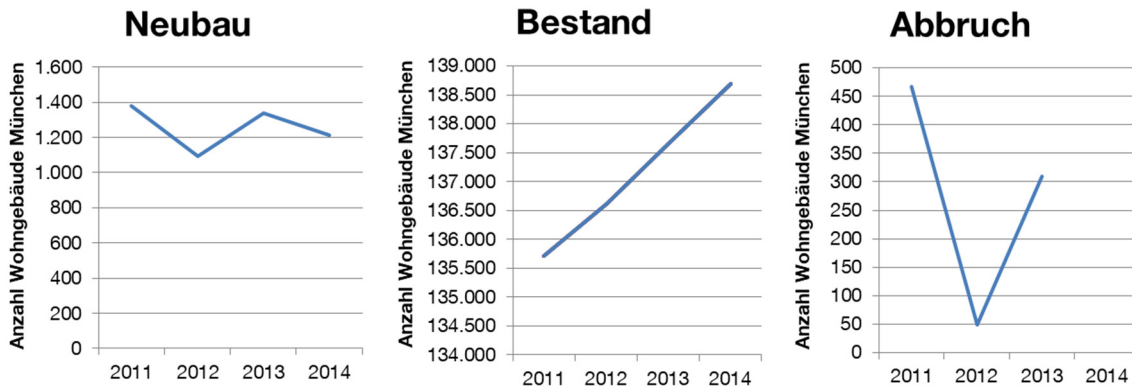


Abbildung 13: Dynamik des Wohngebäudebestands in München von 2011 bis 2014 (Eigene Berechnungen nach Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2016a, 2016b)

Das Statistische Bundesamt erfasst fortlaufend für Deutschland, Neubautätigkeiten und den Bestand sowie den Rückbau von Gebäuden (Abbildung 14). Hier werden sowohl die Anzahl der Gebäude, sowie die Fläche (Wohnfläche bei WG, Nutzfläche bei NWG) erfasst. Zusätzlich werden bei NWG auch die neu erstellten Rauminhalte (m³) erfasst, bei WG hingegen nicht (Abbildung 14 bis Abbildung 15).

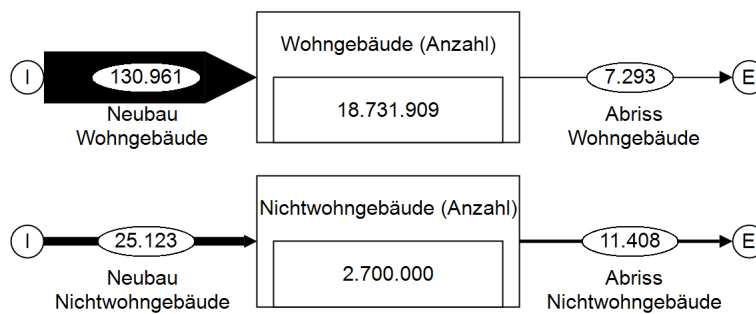


Abbildung 14: Dynamik des Gebäudebestands in Deutschland 2015 nach Anzahl der Gebäude (Eigene Darstellung nach Destatis 2016a; 2016b; Bigalke et al. 2014, S.10ff,136)

Bei den Regional-Statistiken (z. B. Bayern, München) der Landesämter, werden lediglich neu gebaute Wohngebäude (Anzahl und Flächen), sowie der Bestand erfasst. Der Anteil abgerissener Gebäude wird hingegen nicht ausgewiesen.

Anhand der Formel in Abbildung 13 kann aus fortlaufenden Daten der Abgang (Abriss) von Gebäuden berechnet werden. Dies wird exemplarisch an der Stadt München, in Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt.

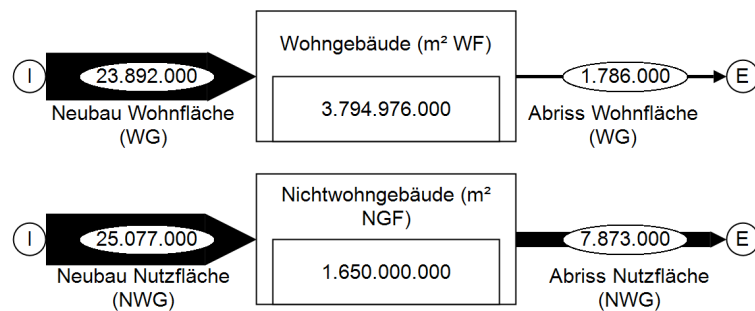


Abbildung 15: Dynamik des Gebäudebestands in Deutschland 2015 nach Gebäudefläche (m²) (Eigene Darstellung nach Destatis 2016a, 2016b, Bigalke et al. 2014, S. 10ff)

In der Statistik werden Bestandsdaten zur regionalen Verteilung und dem Abruch von NWG nicht erfasst. Der Neubau von NWG hingegen wird berücksichtigt (Anzahl und Fläche).

Bezogen auf die Anzahl der Gebäude werden in München rund sechsmal mehr Wohngebäude neu gebaut als abgerissen. Bei der Wohnfläche beträgt dieser Faktor 14,6. Die Abrissraten (2013) bezogen auf den Wohngebäudebestand, ergeben demnach weniger als 0,2 % (Neubaurate: 1 %). Bezogen auf die Wohnfläche sind dies weniger als 0,01 % (Neubaurate: 1 %).

Zum Vergleich: die durchschnittliche Abrissrate von Wohneinheiten in Deutschland beträgt 0,06 % (Neubaurate 0,6 %) (Bigalke et al. 2014, S. 11). Damit ist die Abrissrate in München rund dreimal höher als im nationalen Durchschnitt.

Bei NWG liegen die nationale Neubaurate bei 0,7 % und die Abbruchrate bei 0,2 % (Bigalke et al. 2014, S. 11f). Im Verhältnis zu WG werden anteilig mehr NGW neugebaut bzw. abgerissen. Demnach wächst der NWG-Bestand weniger stark an als der WG-Bestand. Abrissraten für NWG in kleinflächigeren Bezugsräumen (z. B. urban) können hingegen nicht ermittelt werden, da die benötigten Daten nicht verfügbar sind.

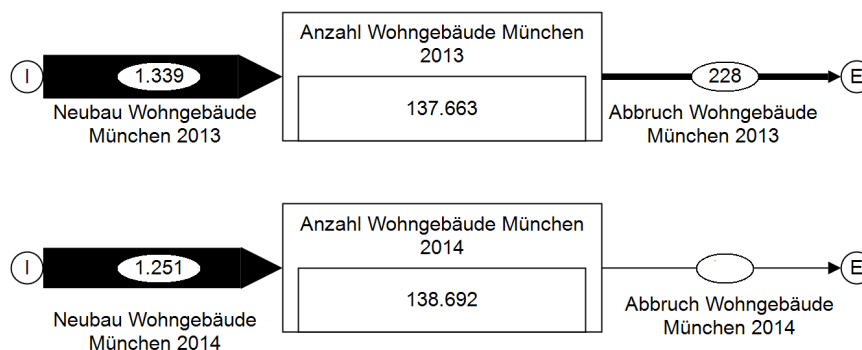


Abbildung 16: Dynamik des Wohngebäudebestands in München (Eigene Berechnungen nach Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2016a, 2016b)

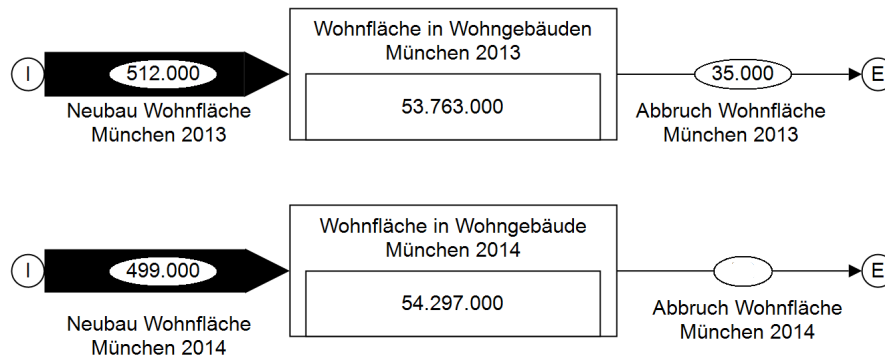


Abbildung 17: Dynamik des Wohnflächenbestands in München (Eigene Berechnungen nach Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2016a, 2016b)

Durch höhere Abrissquoten im urbanen Raum München liegt auch das Potential an Sekundärrohstoffen, die aus Gebäudeabbrüchen gewonnen werden können, höher. Zusätzlich werden proportional gesehen, auch mehr Rohstoffe benötigt, da die Neubauquote ebenfalls höher ist als im nationalen Durchschnitt.

Allein durch diese Gegebenheiten und die unterschiedliche Zusammensetzung und Dynamik des Bestands können pauschale Aussagen zu Stoffströmen und -lagern auf nationaler Ebene nur eingeschränkt auf einzelne urbane Räume übertragen werden. Eine nationale Erfassung kann die regionale und urbane Analyse unterstützen und ergänzen (Bringezu 2000, S. 148).

2.2.3.3 Darstellung des Gebäudebestands in 3D-Stadtmodellen

Mehrdimensionale Stadtmodelle bieten die Möglichkeit, Informationen zu Gebäuden innerhalb frei wählbarer Bezugsräume darzustellen und zu analysieren. Es existieren unterschiedliche Standards und Formate (z. B. CityGML).

Neben der Geometrie und Position (Lage) des jeweiligen Objekts (z. B. Gebäude, Straße, Brücke etc.) können auch semantische Informationen (z. B. Baujahr, Konstruktionsart etc.) im Modell hinterlegt werden. Ursprünglich stand die Erfassung und Präsentation eines Objektes im Vordergrund.





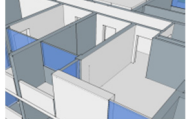
Die EU leitete 2007 die Initiative *Infrastructure for Spatial Information in the European Community* (INSPIRE) ein. Das Ziel ist eine langfristig europaweit einheitliche Geodateninfrastruktur zu schaffen, um eine transnationale Interoperabilität sicherzustellen (EU 2007). Diese verpflichtet die Mitgliedsstaaten uniforme Geodaten bereitzustellen und anzuwenden. CityGML wurde vom Gremium schließlich zum Referenzmodell für das Thema Gebäude bestimmt und findet bereits Anwendung in amtlichen Geodatenstrukturen einiger Länder (Borrmann et al. 2015, S. 181).

Für das Projekt *Techno-Ökonomische Potenziale der Rückgewinnung von Rohstoffen aus dem Industrie- und Gewerbegebäude-Bestand* (PRIGG) der Universität Darmstadt (Schebek et al. 2016) und eine Rohstoffhebung der Gebäude der Stadt Wien durch die TU Wien (Kleemann et al. 2015) fand diese Vorgehensweise bereits Verwendung.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine CityGML basierende Vorgehensweise bereits 2014 vorgeschlagen (Heinrich 2015).

CityGML erlaubt je nach Anwendung die Abbildung von Modellen anhand unterschiedlicher Detaillierungsstufen, auch Level of Detail (LoD) genannt. Derzeit konzentriert sich die Bayerische Vermessungsverwaltung auf die Erstellung eines flächendeckenden Modells der Detaillierungsstufe 2 (LoD 2). LoD 1 Modelle sind für Deutschland bereits vorhanden und wurden daher in dieser Arbeit verwendet. Diese können jedoch durch detaillierte Modelle unproblematisch ergänzt werden. Die Unterschiede der verschiedenen Detaillierungsstufen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Detaillierungsstufen (LoD) im CityGML Standard (SIG3D 2013, S. 3.1)

Detaillierungsstufe	Beschreibung	Beispiel
LoD 0	Regionales Geländemodell mit Bodentexturen	
LoD 1	Klötzchenmodell ohne Dachstrukturen	
LoD 2	3D-Modell der Fassade und Dachstrukturen	
LoD 3	Detailliertes Architekturmodell; 3D Modell der Außenhülle	
LoD 4	Innenraummodell; 3D Modell des Gebäudes (innen und außen)	

Zur Erhebung der Stadtmodelle wurden Gebäudegrundrisse aus der Digitalen Flurkarte (DFK) sowie Daten aus Airborne-Laserscanning als Grundlage verwendet (BVV 2016, S. 1). Daten können vom Bayerischen Landesamt für Vermessung kostenpflichtig erworben werden. Höhere flächendeckende Detaillierungsstufen als LoD 2 sind derzeit nicht angepeilt, da ein hoher Aufwand und Kosten in der Erfassung anfallen.

In einem gängigen 3D-Stadtmodell ist es nicht möglich, in ein Gebäude „hineinzugehen“. Dennoch gibt es Möglichkeiten, detaillierte Modelle (z. B. LoD 3 oder LoD 4) zu erstellen. Die Innennavigation beispielsweise stellt ein Thema der Zukunft dar. Die Erstellung ist allerdings sehr aufwendig und steht in keinem Verhältnis, wenn eine Vielzahl von Gebäuden betrachtet wird. Laserscanning-Methoden, die auch in

Innenräumen angewendet werden können, erstellen z. B. aus sogenannten Punktwolken ein Innenraummodell, das allerdings noch nachbearbeitet werden muss, da dies einen halbautomatischen Prozess darstellt. Für ein klassisches Einfamilienhaus, kann die Erstellung eines solchen Modells durchaus mehrere Tage beanspruchen.

Die Methoden des Vermessungswesens werden stetig weiterentwickelt und die Automatisierung schreitet immer weiter voran. Durch das stetige Anwachsen der Rechnerleistung oder Cloud Computing rücken hochauflösende Modelle immer mehr in den Fokus. Momentan müssen jedoch geometrische Abschätzungen getroffen werden (z. B. Fensterflächen, Innenwände). Diese Thematik wird in Kapitel 5 weiter beschrieben.

Neuere Forschung beschäftigt sich auch damit, verschiedene Modellierungsansätze aus unterschiedlichen Disziplinen (z.B. Geoinformatik und Bauinformatik) einander anzunähern bzw. miteinander zu verknüpfen (Kummer 2014, S. 366). Dies betrifft beispielsweise die Integration von detaillierten *Building Information Modellen* (BIM) in 3D-Stadtmodelle. Das Leonhard Obermayer Center der Technischen Universität München, ein Forschungszusammenschluss unterschiedlicher Teildisziplinen in Vermessungs-, Geo- und Bauinformatik entwickelt in diesem Bereich bereits unterschiedliche Methoden und Werkzeuge.

Bei BIM und CityGML handelt es sich nicht um konkurrierende Systeme, sondern um jeweilige Ergänzungen, da die beiden Systeme unterschiedliche Maßstabebenen betrachten. Sowohl bei CityGML als auch beim BIM-Austauschformat *Industry Foundation Classes* (IFC) handelt es sich um objektorientierte Informationsmodelle, die Gebäude hinsichtlich geometrischer, topologischer und semantischer Aspekte repräsentieren. Der Unterschied liegt in der Skalierbarkeit beider Modelle. Der Fokus von CityGML liegt in großmaßstäblichen Entitäten (Urbane-, Regionale-, sowie Kommunalstrukturen) bis zur Gebäudeebene. IFC hingegen ist auf das Gebäude in seiner technischen und konstruktiven Beschaffenheit bis hinunter zur Materialität elementarer Bauteilkomponenten konzipiert (Borrmann et al. 2015, S. 187). Ein BIM ist demnach in CityGML als LoD 4 Modell einzuordnen.

Momentan, ist es aus Mangel an detaillierten LoD 4 Modellen nicht möglich, flächendeckende Modelle zu beziehen. Daher wird in Kapitel 5 eine Methode beschrieben, wie aus derzeit flächendeckend vorhandenen LoD 1 Modellen Rückschlüsse auf die Materialität und Geometrie einzelner Gebäude und Bauteile gezogen werden können.

2.2.4 Rückbau und Entsorgung

Während es früher vorrangig darum ging, Abfälle zu beseitigen, sind heute Abfälle zu wichtigen Sekundärrohstoffen für viele Wirtschaftszweige geworden. Bei einer effizienten Nutzung können Primärmaterialien und natürliche Ressourcen geschont werden. Mittlerweile ist die deutsche Abfallwirtschaft zu einem bedeutenden und hoch technisierten Wirtschaftszweig geworden. Viele Lösungen und Methoden stehen zur Verfügung, um eine effektive Nutzung von Abfällen und eine Beseitigung von anfallenden Reststoffen zu gewährleisten. Die Entsorgungsphase im Lebenszyklus, umfasst die Teilprozesse, Rückbau / Abriss, Transport, Abfallbehandlung und -beseitigung.

2.2.4.1 Rückbau und Abbruch von Gebäuden

Die gewählte Rückbau- und Abbruchmethode hat entscheidenden Einfluss auf die Rückgewinnbarkeit und das Recycling von Baurestmassen. Die Sortenreinheit der Abbruchmassen kann in diesem Prozess maßgeblich gesteuert werden.

Der derzeitige Stand der Technik ist der selektive Abbruch, bei dem eine strukturierte Entkernung des Abbruchobjekts erfolgt. Dies ermöglicht, dass Abbruchfraktionen bereits vor und während des Abbruchs sortiert werden können (Schröder 2015, S. 243). Abbildung 18 zeigt eine Übersicht der derzeit gängigsten Methoden.

Abbruchmethoden		
<p>Konventioneller Abbruch</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anwendung bei einfachen Konstruktionen • Meist durch Zertrümmern • Ohne Anforderungen an vorherige Entkernung sowie Separierung von Abbruchmaterial • Geringe Qualitätsanforderungen • Nachträgliche Sortierung benötigt 	<p>Selektiver Abbruch (Stand der Technik)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Häufigste Verfahren • Strukturierte Vorgehensweise mit vorhergehender Entkernung des Abbruchobjekts • Sortierung von Baumaterial, vor und während dem Abbruch • Selektive Erfassung aus wirtschaftlichen und entsorgungstechnischen Gründen 	<p>Selektiver Rückbau</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baumaterialien werden hochgradig sortenrein vor dem Abbruch ausgebaut und erfasst • Erfordert hohes Maß an Handarbeit und Kleingeräten und Spezialwerkzeuge • Entsprechend hoher Zeitaufwand / Kosten • Hohe Sortenreinheit kann erreicht werden

Abbildung 18: Beschreibung von Rückbau- und Abbruchmethoden (Eigene Darstellung nach Schröder 2015, S. 242f)

Bei einem selektiven Rückbau werden Materialien bereits vor einem Abbruch hochgradig sortenrein (gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz [KrWG] und Gewerbeabfallverordnung [GewAbfV]) ausgebaut und erfasst. Diese Methode erfordert einen entsprechend hohen Zeit- und Kostenaufwand (Schröder 2015, S. 243). Durch die verhältnismäßig sortenreinen Fraktionen können beispielsweise im Vergleich zu gemischten Fraktionen Kosten bei der Entsorgung eingespart werden.



Abbildung 19: Beispielhafte Stoffgemische aus dem Abbruch anhand unterschiedlicher Abbruchbaustellen (Eigene Darstellung)

Der Erfassung der einzelnen Stoffe aus dem Rückbau sind Grenzen gesetzt (Abbildung 19). Hierbei entstehen Verluste (z.B. Dissipative, kontaminationsbedingte Ausschlüsse technischer Natur). Als Beispiel: Das Umweltbundesamt geht von einem sortenrein erfassbaren Anteil von 80 % der Gesamtmasse Beton und Ziegel aus Gebäudeabgängen aus (20 % Verlustrate). Dieser Wert basiert auf Expertenbefragungen (Schiller et al. 2010, S. 121).

2.2.4.2 Entsorgung

Nach dem Gebäuderückbau fallen Stoffe zur Entsorgung an. Zahlen des Zentralverbands des Deutschen Baugewerbes belegen, dass es bereits erhebliche Entsorgungsengpässe bei mineralischen Bauabfällen gibt und eine Ausweitung der Deponiekapazitäten dringend notwendig ist. Durch fehlende politische Regelung und regionale Engpässe müssen immer mehr Boden und Bauschutt deponiert werden (BDE 2015, S. 1).

Das Bayerische Baugewerbe kommt zu ähnlichen Ergebnissen. Aufgrund nahezu erschöpfter regionaler Verfüllungs- und Deponiekapazitäten herrschen bereits heute Engpässe bei der Ablagerung von mineralischen Bauabfällen, was zu einer Steigerung von Transportwegen geführt hat. Eine Umfrage kam zu dem Ergebnis, dass Deponie- und Verfüllungsgebühren innerhalb von 5 Jahren um bis zu 300 % gestiegen sind. Ursachen für die steigenden Kosten sind insbesondere kostenintensive Anforderungen und Auflagen (Baustoff-Recycling Bayern 2014, S. 3).

Für die Entsorgung von Stoffen stellen Deponien nach wie vor einen unerlässlichen Bestandteil der Wertschöpfungskette dar. Da gesetzlich bedingt (KrWG, GewAbfV), insbesondere Schadstoffe aus dem Kreislauf ausgefiltert werden müssen, bedarf es Deponien auch in Zukunft.

2.2.5 Potential für Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling

Der Lebenszyklus von Gebäuden oder Bauprodukten endet mit der Entsorgung der Bauabfälle aus dem Rückbau. In der Normung werden daher mit Modul D Gutschriften für eine potentielle Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling (z. B. Bereitstellung von Sekundärmaterial) ausgewiesen. Begründet wird dies dadurch, dass Sekundärrohstoffe beispielsweise dazu genutzt werden können, um ein neues Produkt (z. B. Bauteil u. a.) herzustellen - ein erneuter Zyklus wird initiiert.

Durch ein effizientes Recycling kann der Einsatz von Primärrohstoffen und die zu beseitigenden Rohstoffmengen (Abfälle) reduziert werden. Dies führt zu einer Schonung der natürlichen Ressourcen. Dennoch stößt Recycling an gewisse Grenzen. Im Laufe der Arbeit hat sich gezeigt, dass Recyclingmaßnahmen nur bis zu einem gewissen Grad ökonomisch und ökologisch sinnvoll sind. Ebenso beeinflussen zunehmend technologische Faktoren (z. B. Aufbereitungsanlagen) eine Wiedergewinnung von Stoffen.

Auch der zunehmende Materialverbund wird in Zukunft einen entscheidenden Faktor im Rückbau und der Verwertung von Bauwerken und Baustoffen darstellen. Es ist entscheidend, dass Baustoffe wirtschaftlich rückgebaut und aufbereitet werden können, um einer höherwertigen Verwertung (z. B. Hochbau) zugeführt werden zu können. Die Qualität der Stoffe, was auch die Sortenreinheit und die Rückbaufähigkeit beinhaltet, ist daher von grundlegender Bedeutung.

In den Statistiken werden für Deutschland teilweise hohe Verwertungs- und Recyclingquoten für Stoffe aus dem Bauwesen angegeben, etwa bei mineralischen Abfällen (Destatis 2016a). Hier ist allerdings zu beachten, dass ein großer Teil davon als Abraum (z. B. Erde) anfällt, der in der Statistik als Abfall erfasst wird. Da Abraum im eigentlichen Sinne nicht als Abfall zu sehen ist, findet eine Verzerrung der Statistik statt. Die tatsächlichen Recyclingquoten sind daher geringer.

2.2.5.1 Aufbereitung und Wiedergewinnung

Aufbereitungs- und Sortieranlagen haben in den letzten Jahren eine rasante technologische Entwicklung erfahren. Die Bandbreite von Anlagen reicht von klassischen Sieblinien bis hin zu Fragmentations-Systemen auf atomarer Ebene. Magnetscheider in unterschiedlichen Variationen sortieren beispielsweise eisenhaltiges Metall (FE-Material) aus. Dies gehört mittlerweile zum Standard.

Nichteisenmetallscheider trennen Nichteisenmetalle (NE-Metalle), wie beispielsweise Aluminium. Unterschiedliche Sensoren (z. B. Induktion, Röntgen, Farb, Form, Größe, Spektral, Lumineszenz usw.) werden in Verbindung mit Sortieranlagen eingesetzt. Die Sensoren können je nach Bedarf, miteinander kombiniert werden und in bestehende Anlagen eingebunden werden. In der Aufbereitung von Abfällen haben mittlerweile sensorgestützte Sortiersysteme einen hohen Stellenwert in der Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen (Dornauer et al. 2016, S. 611ff).

Flotationsverfahren können beispielsweise Folien oder organische Anteile wie Holz aussortieren. Dichtesortierverfahren können ein Materialgemisch anhand unterschiedlicher Stoffdichten sortieren.



Abbildung 20: Beispiel für Konstellation von mobilen Aufbereitungsanlagen (Eigene Darstellung)

Es existieren sowohl stationäre als auch mobile Anlagen. Mobile Anlagen können direkt auf der Abbruchbaustelle oder an temporären Lagerplätzen, die derzeit nicht genehmigungsfähig sind, eingesetzt werden (Müller 2016, S. 31). Viele Anlagen und Systeme lassen sich miteinander kombinieren, um eine Vielzahl von Stoffgemischen zu sortieren (Abbildung 20 und Abbildung 21). Dennoch ist eine Verwendung von einigen dieser Systeme in der Bauschuttsortierung aufgrund von wirtschaftlichen und praktischen Gründen nicht tragbar (z. B. Röntgensysteme). Je höher die Anzahl der in Serie geschalteten Maschinen und Aufbereitungsschritte, desto höher die Kosten für eine Rückgewinnung der jeweiligen Stoffe. Dies hat Auswirkungen auf den späteren Erlös der Recycling-Baustoffe.

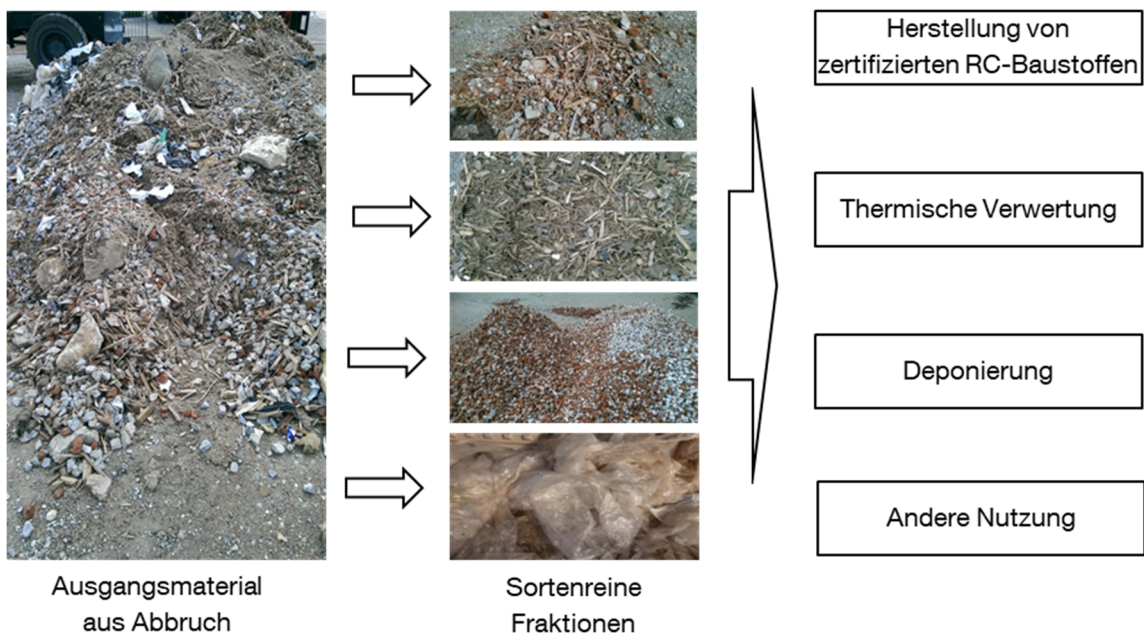


Abbildung 21: Sortierung von Abbruchabfällen in sortenreine Fraktionen (Eigene Darstellung)

Bei Massenbaustoffen (z. B. Kies) werden in der Praxis lediglich die Schritte, *Metallabscheidung*, *Brechen*, *Klassieren* und *Sortieren* verwendet (Müller 2016, S. 21). Der Hauptgrund der Metallabscheidung liegt nicht in der Rückgewinnung von Metallen, sondern als Präventionsmaßnahme, um nachgeschaltete Maschinen nicht zu beschädigen.

Aufbereitungstechnologien erfahren eine zunehmende Weiterentwicklung. Das Fraunhofer Institut für Bauphysik verwendet beispielsweise die Methode der *Elektrodynamischen Fragmentierung* um Beton in seine elementaren Bestandteile aufzuspalten (Seifert et al. 2014, S. 431). Auch die durch die Fraunhofer Projektgruppe IWKS entwickelte *Elektrohydraulische Zerkleinerung (EHZ)* ermöglicht eine molekulare stoffliche Sortierung. Dies beschränkt sich momentan auf den Labormaßstab (Bokelmann et al. 2016, S. 472).

In der Rohstoffbereitstellung bzw. der Aufbereitung von Baustellenabfällen kommt es in zunehmendem Maße zur Verwendung von *optoelektronischen Sortiermaschinen*, die ursprünglich für den Lebensmittelbereich konzipiert wurden. In der computergesteuerten Anlage werden die Fraktionen mit Sensoren erfasst (z.B. Kamera, Röntgen, Spektroskope u.a.) und gezielt per Luftdruck in Teilfraktionen sortiert (Heinrich 2005, S. 18ff).

2005 wurde eine Pilotstudie in Oberbayern durchgeführt, um Edelsplitt nach bestimmten charakteristischen Anforderungen zu sortieren, damit diese für Asphaltdeckschichten verwendet werden können. Durch den relativ hohen Karbonat-Gehalt der Kiese in oberbayrischen Lagerstätten können diese die normativen Anforderungen nicht erfüllen und Edelsplitt (Diabas, Granit etc.) müssen aus anderen Regionen importiert werden. Es hat sich gezeigt, dass der Einsatz dieser Maschinen bei „kostengünstigen“ Massenbaustoffen finanziell nicht lohnenswert ist. Die Kosten der Anlage und deren Betrieb übersteigen den derzeitigen Materialwert. Aus diesen Gründen fand bis zum heutigen Zeitpunkt keine Umsetzung statt. Um bei dieser Anwendung wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen entweder die Kosten für die Sortiermaschinen (incl. Wartung, Bedienung etc.) gesenkt oder die Durchlaufmengen der zu sortierenden Baustoffe erhöht werden (Heinrich 2005, S. 70ff).

In seinem Aufsatz *Recycling ist gut, mehr Recycling ist besser – oder nicht?* untersucht Rainer Bunge die wirtschaftliche und ökologische Optimierung von Recyclingsystemen. Bei zu hohen Rückgewinnungsgraden, steigen die kumulativen Kosten für die zurückgewonnenen Wertstoffe exponentiell an. Analog zu den Kosten steigt auch der ökologische Aufwand (z. B. Bewertung durch die Ökobilanzierung) mit zunehmenden Rückgewinnungsgraden. Der Anstieg des ökologischen Aufwands ist mit zunehmendem Verlauf jedoch viel steiler. Daher liegt das wirtschaftliche Optimum eines Recycling links vom ökologischen Optimum (geringeren Rückgewinnungsgrad) (Abbildung 22) (Bunge 2016, S. 86f).

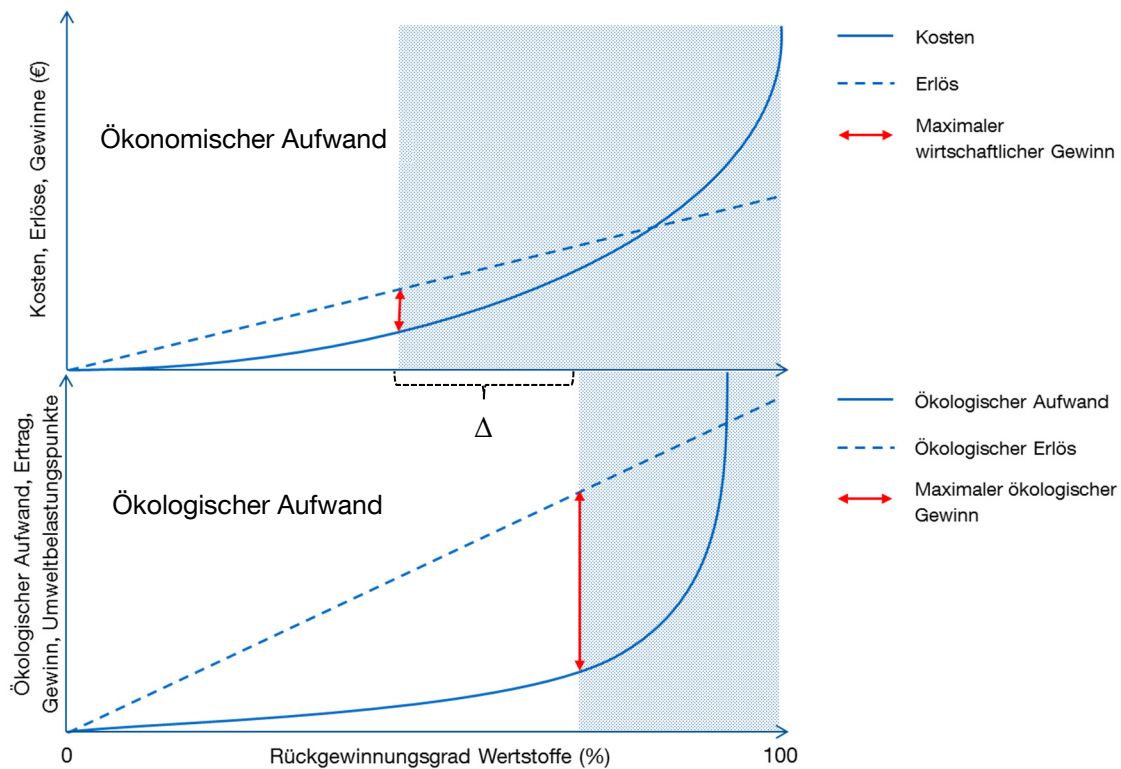


Abbildung 22: Betriebswirtschaftlich optimaler Rückgewinnungsgrad (oben) und ökologisch optimaler Rückgewinnungsgrad (unten) (Eigene Darstellung nach Bunge 2016, S.85f)

Die Gründe hierfür liegen unter anderem am Energieaufwand der Aufbereitung, sowie an den eingesetzten Chemikalien. Übersteigen die Rückgewinnungsgrade das ökologische Optimum, verursacht das Recycling eine höhere Umweltbelastung als der Bergbau und erscheint daher aus ökologischer Sicht wenig sinnvoll. Als Lösung für ein ökologisch optimiertes Recyclingsystem werden von Bunge folgende Schritte vorgeschlagen (Bunge 2016, S. 87):

1. Ermittlung des ökologischen Optimums
2. Ermittlung des wirtschaftlichen Optimums
3. Ermittlung des finanziellen Anreizes, um für einen Recyclingunternehmer den Rückgewinnungsgrad seiner Anlage vom wirtschaftlichen ins ökologische Optimum zu verlagern
4. Zusätzliche Vergütung für den Recyclingunternehmer (inklusive dem unter Punkt 3 ermittelten Betrag)

Um die potenziellen Rückgewinnungsgrade der Wertstoffe zu quantifizieren, müssen daher auftretende Systemverluste berücksichtigt werden, die im Folgenden beschrieben werden.

2.2.5.2 Systemverluste beim Recycling

Bei einer stofflichen Verwertung von Baustoffen ist in der Praxis kein hundertprozentiger Rückgewinnungsgrad möglich. Wie bereits erwähnt, treten Verluste an unterschiedlichen Stellen der Wertschöpfungskette auf, sei es durch dissipative Verluste (z. B. Korrosion bei Metallen), Verluste bei der Materialsammlung oder während des Recyclingprozesses (Abbildung 23 und Abbildung 24).

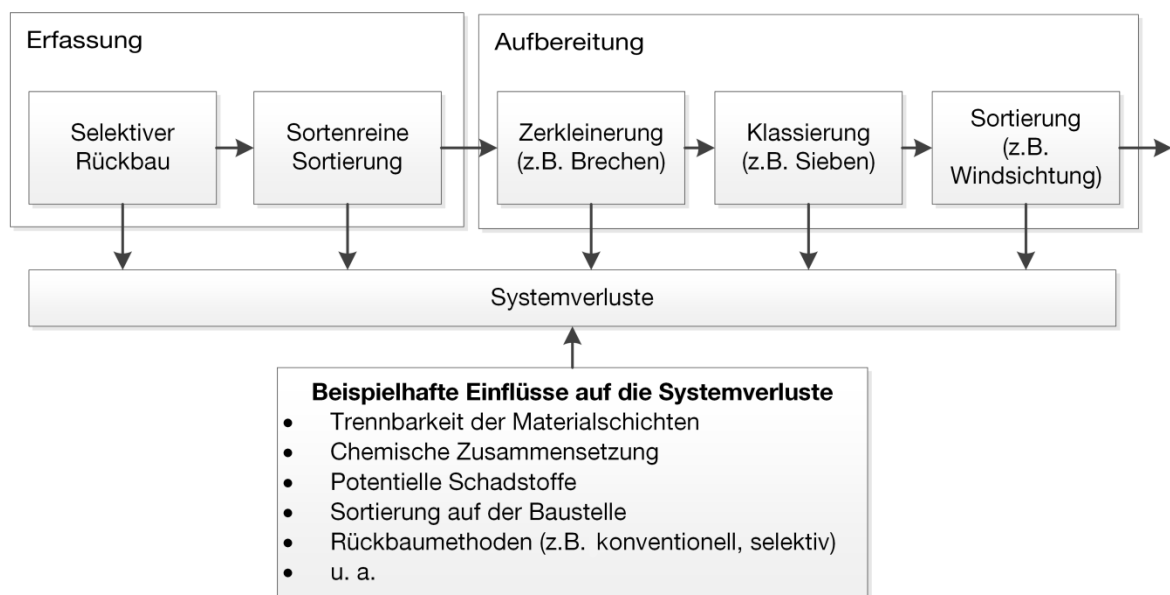


Abbildung 23: Systemverluste bei der Erfassung und Aufbereitung von Bauschutt (Eigene Darstellung)

Begründet wird dies unter anderem durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, der sich auf die dissipative Grundtendenz von Energie und Materie beruft (Bringezu 2000, S. 10). Die Entropie nimmt zu und die vorher konzentrierten Stoffe verteilen sich in der Umwelt (z. B. Staub, Verdünnung, Verunreinigung). Die Stoffe sind zwar noch physisch vorhanden, können aber nicht oder nur eingeschränkt genutzt werden.

Niedrige Stoffkonzentrationen (hohe Entropie) kommen beispielsweise auch in geogenen Lagerstätten vor. Hier kann sich ein Abbau bei zu geringen Konzentrationen mitunter nicht lohnen (z. B. bei Erzen). Bei einem Preisanstieg für den abzubauenen Rohstoff, oder bei einem technologischen Fortschritt (z. B. Aufbereitungstechnologie, Erhöhung des Durchsatzes), der die Kosten reduziert, kann ein Abbau zunehmend an Relevanz gewinnen.

Bei der Aufbereitung von Bauabfällen werden Recycling-Baustoffe mit definierten Eigenschaften hergestellt. Hierbei wird auf die Grundoperationen der mechanischen Verfahrenstechnik zurückgegriffen, die auch bei der Herstellung von Primärgesteinskörnung Verwendung finden (Abbildung 23). Der Recycling-Baustoff hat dadurch eine nahezu identische Zusammensetzung wie das Eingangsmaterial (Müller 2016, S. 3 und S. 21f)

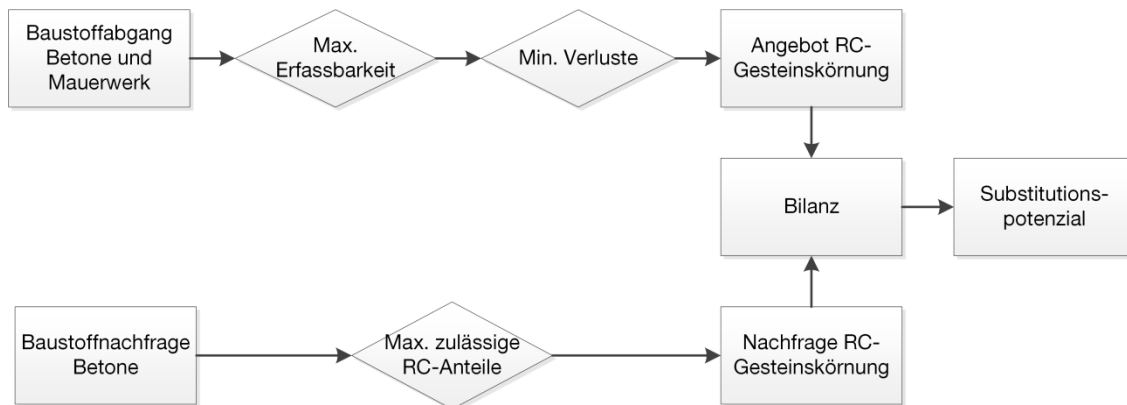


Abbildung 24: Transformation von Baustoffströmen in Rezyklatströme und Bilanzierung von Angebot und Nachfrage (Eigene Darstellung in Anlehnung an Schiller et al. 2010, S.41f)

Bei der Aufbereitung wird der Bauschutt zuerst gebrochen (z. B. Backenbrecher). Durch den Brechvorgang entstehen Feinfraktionen ($< 2 \text{ mm}$), die von einem Einsatz in RC-Gesteinskörnung ausgeschlossen sind (DAfStb 2010, S. 3ff). Bei Untersuchungen von Sieblinien wurden für diese Fraktion zwischen 20 % – 40 % Masseanteil ermittelt. Bei Mauerwerksbruch wird von bis zu 50 % Feinkornanteil ausgegangen (Müller 2016, S. 4), (Heinz 2012, S. 6).

Im *Zukunft Bau Projekt Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau*, wurden Verwertungsmatrizen für mineralische Bauabfälle entwickelt. Die beiden entscheidenden Kenngrößen bei der Rückgewinnung sind die Partikelgröße (Korngröße) und die Sortenreinheit (Müller 2016, S. 17).

Im Forschungsvorhaben *Assessment of Buildings and Construction (ABC) – Disposal* werden ebenfalls Messzahlen für die Entsorgungseigenschaften von Gebäuden und Konstruktionen für die Lebenszyklusbewertung untersucht. Das Untersuchungsziel war die Entwicklung einer Methode zur systematischen Bewertung der Entsorgungseigenschaften von Gebäuden (Mötzl und Pladerer 2009). Die qualitative Bewertung wird in Form einer „Entsorgungsmatrix“ dargestellt. Verlustraten durch Sammlung und Aufbereitung von Baustoffen wurden ebenfalls untersucht und in Tabelle 2 zusammengefasst. Im Projekt wurden keine potentiellen Schadstoffe betrachtet, die eine Rückgewinnung zusätzlich erschweren. Die ausgewiesenen Verlustraten beziehen sich auf Durchschnittswerte, die unter anderem aus Expertenbefragungen stammen (Schiller et al. 2010). Daher können die Werte in der Praxis, (je nach Bauvorhaben) voneinander abweichen.

Weitere Systemverluste auf nationaler Ebene sind beispielsweise durch den Export von Schrotten oder durch illegale Entsorgung zu verzeichnen. Durch die Heterogenität von Gebäuden kann kein allgemein anwendbares Recyclingkonzept erzeugt werden, wie es beispielsweise in der Automobilbranche oder im produzierenden Gewerbe üblich ist. Durch die Serienfertigung ist die genaue Zusammensetzung und Verbindung der einzelnen Teile bekannt und dokumentiert. In der Automobilbranche kommt beispielsweise das Internationale Material Daten System (IMDS) zum Einsatz, indem alle Werkstoffe, die bei der Automobilherstellung zum Einsatz kommen, archiviert und zurückverfolgt werden können (IMDS 2017, S. 9).

Tabelle 2: Beispielhafte Verlustraten bei der Sammlung und Aufbereitung von Baustoffen (Mötzl und Pladerer 2009); (BMUB 2016b); (Schiller et al. 2010); (Müller 2016)

Baustoff	Verlustrate
Alu-Dampfsperren	50%
Aluminium	5%
Armierungsstahl	5%
Asphalt	2-20%
Beschichtete Metallprofile	15%
Beton	5-20%
Edelstahl	5%
Federschienen	50%
Heizkessel, Klima- und Lüftungsanlagen, Fahrstühle	5%
Holz	5%
Kies	5-20%
Mauerziegel	4-50%
Metallprofile und -elemente	5%
Mineralische Baurestmassen mit Verunreinigung	25%
Nägeln, Schrauben	50%
Nägeln, Schrauben (<0,5 kg/m ² Bauteil)	100%
Sonstige mineralische Baurestmassen (sortenrein)	10-20%
Stahlprofile	5%
Türklinken, dünne Bleche	15%
Unterputzrohre und Kabel	10%
Verzinkter Stahl	5%
Zinkblech	4%

Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft höhere Sortiergrade und geringere Verlustraten zu erwarten sind, da sich Aufbereitungstechnologien stetig verbessern. Eine großflächige Anwendung in der Praxis ist nur unter wirtschaftlichen Voraussetzungen gegeben.

Erschwerend kommt hinzu, dass im Bauwesen immer komplexere Hybridbaustoffe und Materialkombinationen eingesetzt werden, die aufwendig zu trennen oder nicht trennbar sind (Abbildung 25). Um diese Materialkombinationen effizienter zu trennen, müssen aufwendigere und mehrstufige Verfahren angewandt werden, die wiederum die Kosten erhöhen und eine Aufbereitung zunehmend unwirtschaftlicher machen.



Abbildung 25: Beispiele für Hybridbaustoffe und Materialkombinationen: Herausforderungen in der getrennten Erfassung und Aufbereitung (Eigene Darstellung)

2.2.6 Transporte und Infrastruktur

Um die Wirtschaftsfähigkeit eines Landes beizubehalten oder zu steigern, müssen Stoffe und Personen zuverlässig und effizient transportiert werden. Die Versorgung mit Ressourcen, sowie ein Abtransport von Abwasser und Abfällen muss sichergestellt werden.

Durch ein Bewegen von Stoffen werden Transportprozesse, zwischen Einzelprozessen in Gang gesetzt. Ein Großteil der für den Bau benötigten Stoffe wird nach wie vor per LKW befördert (Destatis 2017, S. 7). Abgesehen von den verursachten Emissionen (CO₂, Stickoxide, usw.), muss auch die entsprechende Infrastruktur (z. B. Straßen) bereitgestellt und erhalten werden.

Neben natürlichen Stofftransporten, durch Umweltmedien (Wasser, Boden etc.) werden Stoffe auch durch anthropogene Transportprozesse (LKW, Bahn, Schiff etc.) bewegt. Eine Reduzierung und Regionalisierung von Stoffströmen forciert dabei eine Minimierung von Transportprozessen. In anderen Worten: wenn weniger Stoffe benötigt werden, wird auch weniger transportiert und wenn regional verfügbare Stoffe verwendet werden, müssen kürzere Transportdistanzen überwunden werden.

Laut Umweltbundesamt ist der Verkehrssektor der einzige Sektor, der seine Emissionen seit 1990 nicht mindern konnte. Zwischen 1999 und 2012 ist der Güterverkehrsaufwand um 27 % gestiegen (Umweltbundesamt 2015, S. 106). Einschließlich der Schienen und Wasserstraßen beanspruchen die Verkehrsflächen rund 5 % der Gesamtfläche Deutschlands (Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt 2017, S. 1).

Die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung hat zum Ziel, die Gütertransportintensität (Indikator 11 a) gegenüber dem Basiswert des Jahres 1999, bis zum Jahr 2020 um 5 % zu vermindern. Der Anteil der Güterbeförderungsleistung des Schienenverkehrs und der Binnenschifffahrt (Indikator 11c & 11d) sollen hingegen erhöht werden (Bundesregierung 2012, S. 88). Das Erreichen dieser Ziele ist unter momentanen Bedingungen nicht zu schaffen. Die Indikatoren 11c & d entwickeln sich derzeit in die entgegengesetzte Richtung (Destatis 2014, S. 38). Allein im umweltpolitischen Sinne ist es nötig, Transporte zu reduzieren oder auf nachhaltigere Transportwege und -methoden zurückzugreifen.

Ein Großteil der Gütertransporte in Deutschland findet nach wie vor auf der Straße statt (Abbildung 26). Transporte per LKW sind unverzichtbar, da nicht jeder Zielort über einen Hafen oder einen Anschluss an das Eisenbahnnetz verfügt.

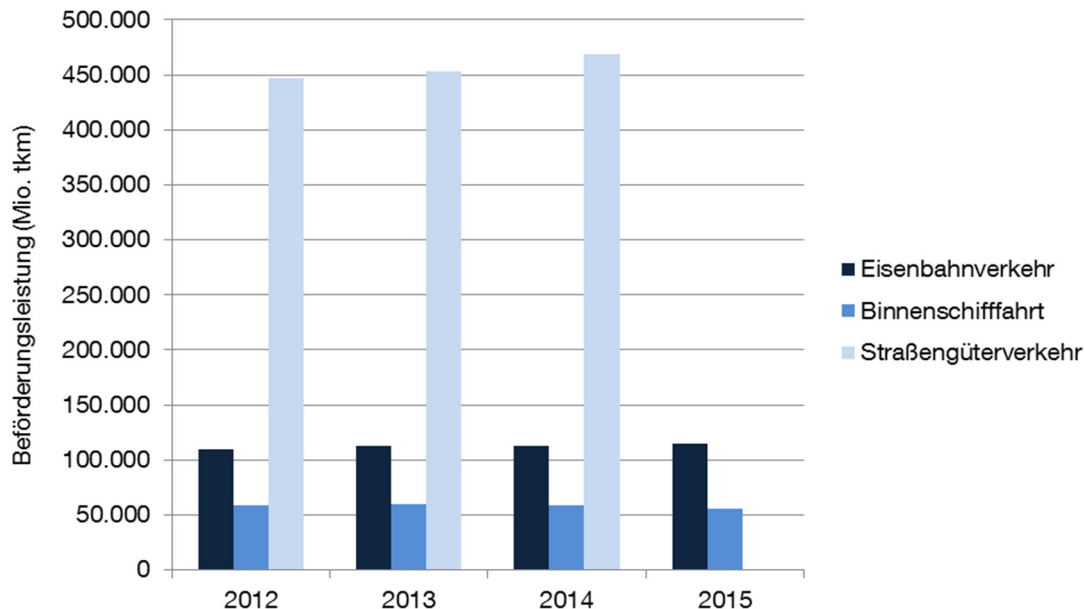


Abbildung 26: Beförderungsleistung in Deutschland (Eigene Darstellung nach Destatis 2017b, 2016d)

Bei Stahltransporten beispielsweise trägt die Bahn mit 51 % den größten Anteil am gesamten Transportvolumen, gefolgt von der Binnenschifffahrt (29 %) und dem LKW-Transport (20 %) (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2017, S. 12). Aus den Statistiken ist nicht zu entnehmen, wie hoch der Anteil der Wertschöpfungskette Bau an den Transportdienstleistungen ist. Das Statistische Bundesamt erfasst folgende Fraktionen, die im Bezug zum Bauwesen stehen:

- Erze, Steine und Erden, Bergbauerzeugnisse (ESEB)
- Holzwaren, Papier, Pappe, Druckerzeugnisse (HPPD)
- Chemische Erzeugnisse
- Metalle und Metallerzeugnisse
- Sonstige Mineralerzeugnisse (Glas, Zement, Gips etc.)
- Sekundärrohstoffe

Bei Transporten von Holzwaren, Metallen und Sekundärrohstoffen ist seit 2009 ein Rückgang zu verzeichnen. Die anderen oben genannten Kategorien verzeichneten in den letzten Jahren unveränderte Beförderungsleistungen im Bahnverkehr (in Tonnenkilometer [tkm]). Bei der Binnenschifffahrt hingegen sind die Fraktionen stark rückläufig. Beim inländischen LKW Verkehr sind ESEB in den letzten Jahren um 24 % angestiegen und machen rund 30 % der gefahrenen Tonnenkilometer auf der Straße aus. Der Anteil der Sekundärrohstoffe, Metalle, HPPD und chemische Erzeugnisse ist hingegen gesunken (Destatis 2017).

2.2.6.1 Straßeninfrastruktur und Transporte

Rund 71 % der gesamten Beförderungsleistung in Deutschland, wird auf der Straße abgewickelt (Abbildung 26). Daher ist der Zustand der Straßen von zentralem gesellschaftlichem und wirtschaftlichem Interesse. Neben den typischen verkehrsbedingten Emissionen (CO₂, Feinstaub u. a.), Unfällen und Staus, führt das erhöhte Verkehrsaufkommen dazu, dass mehr Straßeninfrastruktur benötigt und instandgehalten werden muss, was wiederum den Rohstoffeinsatz erhöht.

Das Bundesfernstraßennetz umfasst rund 13.000 km Bundesautobahnen und rund 40.000 km Bundesstraßen. Dazu kommen Landstraßen (86.000 km) Kreisstraßen (92.000 km) und Gemeindestraßen (457.000 km) (Lippold 2014, S. A94f). Zwischen 2001 und 2015 wurden 1.305 km Autobahnen neugebaut und 1.182 km auf 6 oder mehr Spuren erweitert. Bei Bundesstraßen sind rund 2.032 km in diesem Zeitraum aus- oder neu gebaut worden (BMVI 2016a, S. 1).

Ebenfalls gilt es, die Straßeninfrastruktur auf durchschnittlich höher werdende Achslasten und Lang-LKW ausulegen (Gerwens 2015, S. 2). Dies hat ebenfalls Auswirkungen auf den Rohstoffverbrauch. Verkehrsflächen werden entsprechend der Verkehrsbelastung in Belastungsklassen (Bk) eingeteilt. Bei höheren Bk werden mehr Rohstoffe benötigt, da z. B. die Asphaltdecke und die Asphalttragschicht großzügiger dimensioniert werden müssen. Die Wahl der Schichtdicke sowie die Anordnung der Schichten ist in den *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen* (RStO) geregelt.

Im Rahmen des Verbundforschungsprojekts *Materialeffizienz und Ressourcenschonung* (MaRes) des Bundesumweltministeriums wurden Hochrechnungen zum Materiallager der Straßeninfrastruktur durchgeführt. Die typischen Querschnitte und ermittelten Materialkoeffizienten wurden dabei mit Daten aus der amtlichen Statistik verknüpft. Mit einer Fläche von 4.500 km² sind fast 1,5 % der Landfläche in Deutschland mit Straßen bedeckt. Rund 7,2 Mrd. t Stoffe, zum Großteil mineralischen Ursprungs, sind in unserer Straßeninfrastruktur gebunden (Steger et al. 2011, S. 56). Dies entspricht fast 90 t pro Einwohner. Eigene Berechnungen anhand der gleichen Berechnungsmethode kommen zu einem ähnlichen Ergebnis.

Die Entstehung des Straßennetzes aus den 1960er und 70er Jahren korreliert mit der wirtschaftlichen Entwicklung in dieser Zeit. Dies bedeutet, dass in den nächsten Jahren eine Grunderneuerung ansteht, um auch zukünftig den Verkehrsanforderungen zu genügen. Im Bundesverkehrswegeplan werden Investitionen daher verstärkt auf die Erhaltung gelegt (Lippold 2014, S. A94f). Der jährliche Materialbedarf für Wartung und Instandhaltung beträgt etwa 104 Mio. t (1,3 t/Einwohner). Für Neubau und Erweiterung kommen nochmal 21 Mio. t hinzu (Steger et al. 2011, S. 17f).

Bei den Brücken ergibt sich ein ähnliches Bild. Laut Bundesanstalt für Straßenwesen hat sich beispielsweise auf Bundesfernstraßen die Zahl der Brücken im Zeitraum von 1970 bis 2015 von 18.262 auf 39.551 Bauwerke erhöht. Dabei hat der Anteil der Spannbetonbauweise, bezogen auf die Gesamtbrückenfläche, mit 70 % die stärkste Steigerung erfahren. Reine Stahlkonstruktionen machen weniger als 6 % der Brückenflächen aus (BAST 2016, S. 1ff).

Aus den Daten zum Zustand der Brücken ist zu entnehmen, dass der Anteil der Bauwerke mit erhöhtem Erneuerungsbedarf zunimmt. Rund 12 % der Brücken sind in

ihrer Standsicherheit beeinträchtigt (Note 3), bzw. ist eine Standsicherheit nicht mehr gegeben (Note 4) (BAST 2016, S. 6f). Laut Strategie zur Brückenertüchtigung müssen bundesweit etwa 2.200 Spannbetonbrücken und etwa 300 Stahlverbundbrücken statisch nachgerechnet und je nach Ergebnis, in den nächsten Jahren instandgesetzt oder erneuert werden (BMVI 2016b, S. 1). Neben den erhöhten Finanzmitteln werden zukünftig auch mehr Rohstoffe für den Erhalt der Brücken benötigt.

Neben den mineralischen und metallischen Baustoffen finden im Straßenbau auch zunehmend Kunststoffe und chemischen Erzeugnisse steigende Verwendung (Lippold 2014, S. G888). Diese können Beton und Mörtelmischungen zugefügt werden, was höhere Festigkeiten und chemische Resistenzen zur Folge hat. Andere Anwendungsbereiche sind beispielsweise Filterfliese, Armierungen, Dichtungsbahnen, Drainagerohre, Fugenbänder u. a. Diese Stoffe müssen bei einem Rückbau wieder entsorgt werden oder verbleiben in der Erde (z. B. Rohre) und tauchen daher nicht mehr in den Bilanzen auf (dissipative Verluste).

2.2.6.2 Schieneninfrastruktur und Transporte

Mit rund 39.000 km hat Deutschland eines der längsten und dichtesten Schienennetzwerke weltweit (European Commission 2017, S. 1). Der Großteil der Gleisinfrastruktur befindet sich im Eigentum der Deutschen Bahn (DB). In jüngerer Vergangenheit hat sich die Beförderungsleistung nur geringfügig verändert und lag 2015 bei fast 117.000 Mio. tkm (Abbildung 26) (Destatis 2017, S. 7).

Neben einer Beförderungsleistung von rund 17 % an der gesamten transportierten Menge an Gütern stellt die Schieneninfrastruktur ein großes anthropogenes Stofflager dar. Hochrechnungen zufolge sind rund 1,15 Mrd. t Stoffe in der nationalen Schieneninfrastruktur gebunden, was rund 14,3 t pro Einwohner entspricht. Fast 98 % davon sind mineralischen Bestandteils (Sand & Kies, Beton, Granit und Mauerwerk). Metalle, insbesondere Stahl machen fast 2 % des Lagers aus. Buchenholz und Kunststoffe den Rest. Für die jährliche Instandhaltung sowie für Neu- und Ausbau der Schienen Infrastruktur werden nochmal 6,4 Mio. t Baustoffe benötigt (Steger et al. 2011, S. 223).

Auf Grund starker Veralterung von Teilen des Schienennetzes ist dringender Erneuerungsbedarf gegeben. Ebenfalls sind einige Strecken und Bahnhöfe von der Schließung bedroht, was bereits dazu geführt hat, dass Transporte auf die Straße verlagert worden sind. In den nächsten Jahren sollen rund 215 als nicht wirtschaftlich geltende Bahnhöfe und Gleisanschlüsse geschlossen werden. Paradoxerweise auch von einem jahrelangen Zulieferer von Gleisschotter, der nun per LKW ausliefert (Abmayr 2016). Da die DB mit DB Schenker eine der größten LKW-Flotten betreibt, gibt es naturgemäß Bestrebungen, diese Flotte auszulasten. Im Gegensatz zur Schieneninfrastruktur wird der Erhalt der Straßeninfrastruktur von der Allgemeinheit getragen.

2.2.6.3 Binnenschifffahrtsinfrastruktur und Transporte

Wasserstraßen stellen neben Straße und Schiene einen Teil des Verkehrsnetzes dar. Deutschland verfügt im europäischen Vergleich über das umfangreichste und am intensivste ausgebaute Binnenwassernetz mit einer Länge von ungefähr 7.400 km

(5.600 km Flusstrecken, 1.700 km Kanäle) (Steger et al. 2011, S. 46). Fast 6 % der in Deutschland produzierten Güter werden auf diesem Weg transportiert (Abbildung 26). Der Anteil der Transportleistungen der Binnenschifffahrt ist jedoch rückläufig (Destatis 2017, S. 23).

Allein in den Infrastrukturen der Wasserstraßen (Häfen, Schleusen, Uferbefestigung u.a.) sind rund 200 Mio.t an Material gebunden, überwiegend mineralischen Ursprungs (z. B. Beton, Kies u.a.). Für den Sanierungsbedarf von Schleusen werden beispielsweise jährlich rund 32.000 t Beton benötigt (Steger et al. 2011, S. 52ff).

2.2.6.4 Wechselwirkungen des Hoch- und Tiefbaus

Hochbaumaßnahmen führen dazu, dass Tiefbaumaßnahmen, im Folgenden auch Infrastruktur genannt, benötigt werden. Breitet sich beispielsweise ein urbaner Raum aus, muss dieser auch erschlossen werden, damit neue Gebäude an das bestehende Infrastrukturnetz (Straßen, Schienen, Versorgung u. a.) angeschlossen werden können. Hier spielt auch die zukünftige Entwicklung (z. B. Wachstum) des urbanen Raums und der Region eine Rolle.

Des Weiteren stellt der Tiefbau eine wichtige Senkenfunktion im Bauwesen dar. Dabei finden Abbruchmaterialien (Sekundärrohstoffe) aus dem Hochbau zunehmend Verwendung. Ein großer Abnehmer dabei ist der Straßen- und Deponiebau. Gleiches gilt für Verfüllungsmaßnahmen (Kreislaufwirtschaft Bau 2015, S. 12). Die Wechselwirkung zwischen Hoch- und Tiefbau spielen daher auch eine Rolle bei der Schließung von Stoffkreisläufen.

Die LAGA (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall) schreibt die technischen Regeln der unterschiedlichen Einbauklassen von recycelten Baustoffen im Straßenbau in Abhängigkeit von Schadstoffgehalten vor (Lippold 2014, S. 927f). Während sich im Tiefbau ein Einsatz von mineralischen Sekundärrohstoffen seit vielen Jahren etabliert hat, ist der Hochbau in Deutschland noch weit davon entfernt, ernstzunehmende Mengen an Recyclingstoffen einzusetzen (Baustoff-Recycling Bayern 2014, S. 1). In der Schweiz sind beispielsweise bei öffentlichen Bauvorhaben verbindliche Quoten zur Verwendung von Recyclingstoffen vorgeschrieben (Wrap o.J., S. 3); (Knappe et al. 2012, S. 116). Dieser Aspekt wird in Kapitel 7 weiter behandelt.

2.3 Schließung von Kreisläufen - Hemmnisse ausgeglichener Massenbilanzen

Ein *idealer Kreislauf*, wie er in der Natur vorgegeben ist, steht unserem heutigen Wirtschaften gegenüber im Widerspruch. Um den maximalen ökologischen und ökonomischen Nutzen aus Stoffen zu ziehen, muss versucht werden, Stoffkreisläufe weitgehend zu schließen. Um dies umzusetzen, müssen unter anderem Systemverluste und Schadstoffe minimiert werden und Stoffe so lang und hochwertig wie möglich (Werterhalt) im Kreislauf geführt werden. Der Weg von einer linearen in eine zirkuläre Ökonomie rückt dabei immer weiter in das Interesse von vielen Wirtschaftszweigen und Regierungen. Durch diesen Paradigmenwechsel können beispielsweise Primärmaterialien und Energie eingespart, sowie Abfälle und unsere

Abhängigkeit von Importen reduziert werden, indem eine Substitution durch Sekundärstoffe gefördert wird.

Neben den ökologischen Vorteilen und der Ressourceneffizienz - mit dem Ziel einer nachhaltigen Entwicklung - generiert die zirkuläre Ökonomie, Wachstum und Profitabilität, was ökonomische Vorteile (z. B. Schaffung von Arbeitsplätzen, Reduzierung von Rohstoffabhängigkeiten) schafft (Ellen MacArthur Foundation 2015, S. 5).

Laut Baustoffrecycling Bayern e.V. sind wir im Bauwesen noch weit entfernt von einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft (Baustoff-Recycling Bayern 2014, S. 1). Bei einer Betrachtung von Verwertungswegen wird deutlich, dass eine tatsächliche Kreislaufwirtschaft praktisch kaum angewandt wird. Bauschutt aus dem Hochbau wird nur zu sehr geringen Anteilen hochwertig recycelt (z. B. Betonzuschlag für Hochbau). Ein Großteil wird im Straßenbau, Landschaftsbau und zur Verfüllung verwendet (Müller et al. 2017, S. 50) (Knappe 2011, S. 460f).

Ein gänzlich geschlossener Kreislauf ohne Verluste wird sich in der Praxis nur schwer oder gar nicht durchsetzen können (Bringezu 2000, S. 10). Es wird immer Verluste (z. B. dissipative Verluste oder Sammelverluste) entlang der Wertschöpfungskette geben.

Eine weitere Chance stellt die Kaskadennutzung von Stoffen dar (Abbildung 27 und Abbildung 28). Durch Systemverluste reduziert sich bei jeder Kaskade, die Ausgangsmenge an Material, bis ein Stadium erreicht ist, wo eine erneute Nutzung nicht mehr gegeben ist oder unwirtschaftlich wird. Um Stoffe länger im Kreislauf zu halten, müssen die Kaskaden zukünftig in viel kleinere Schritte unterteilt werden, um eine effizientere Mehrfachnutzung von Baustoffen und dessen Werterhalt zu

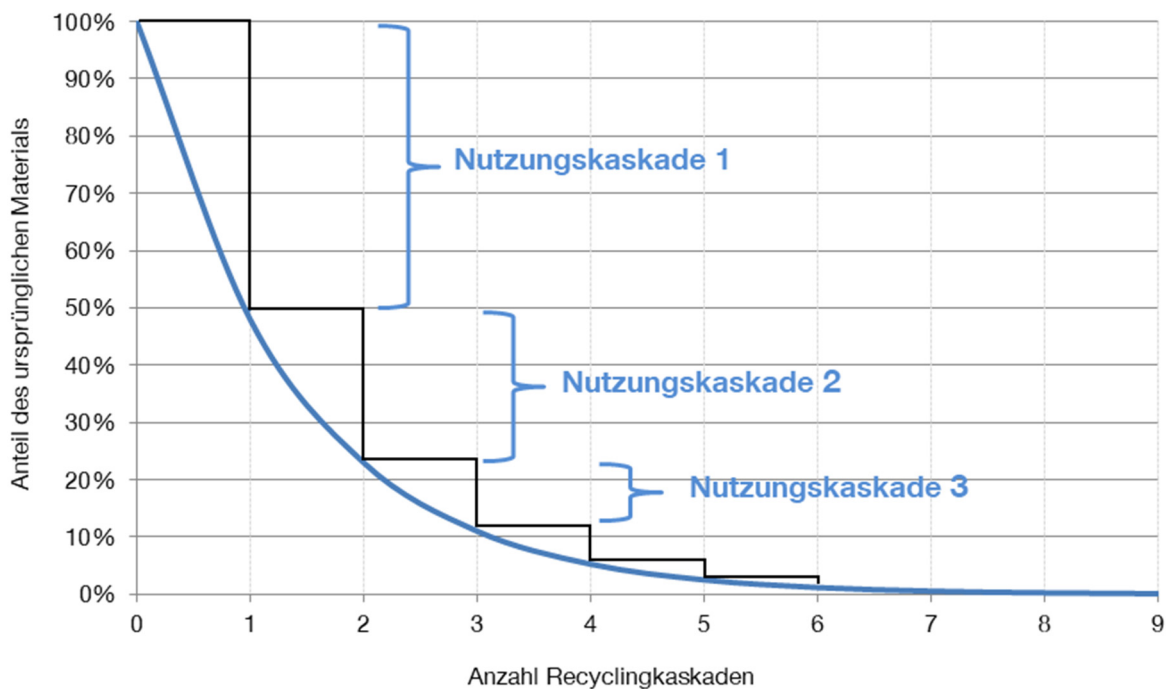


Abbildung 27: Kaskadennutzung am Beispiel von RC-Beton unter Berücksichtigung von Systemverlusten (Eigene Berechnungen und Darstellung)

gewährleisten (Abbildung 28). Eine Optimierung der Kaskadennutzung stellt eine mögliche Option auf dem Weg zu einer zirkulären Ökonomie dar.

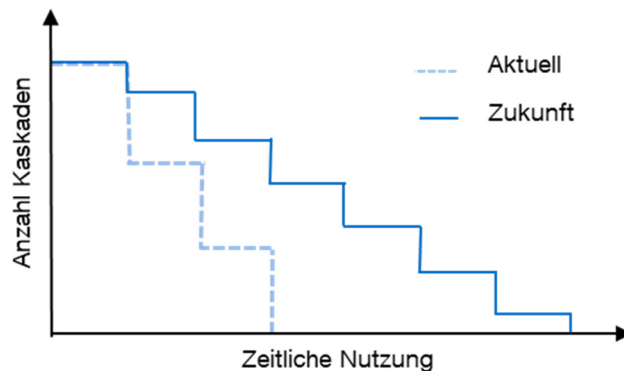


Abbildung 28: Konzeptuelle Darstellung von Kaskadennutzung und Optimierung (Eigene Darstellung)

Für ein Streben nach einer zirkulären Ökonomie im Bauwesen sind Werkzeuge notwendig, die Stoffe in Ihrem gesamten Lebensweg verfolgen. Im EU-Forschungsprojekt *Buildings as Material Banks* (BAMB) werden beispielsweise BIM-fähige Materialausweise und zirkuläre Geschäftsmodelle für den Neubau entwickelt.

Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass für ein Angebot an Sekundärrohstoffen auch ein Markt (Nachfrage) vorhanden ist. Demnach ist neben der Deckung der benötigten Massen durch Sekundärrohstoffe auch das Wissen zum zeitlichen Auftreten von Angebot und Nachfrage von entscheidender Bedeutung.

2.3.1 Korrelation von Angebot und Nachfrage

Bei der Ermittlung von Angebot und Nachfrage spielt eine Vielzahl von Faktoren eine Rolle. Der mächtigste Faktor ist nach wie vor die ökonomische Stellschraube. Abbildung 29 zeigt eine Übersicht, wie sich Angebot und Nachfrage auf Grund von Veränderungen durch Einflussfaktoren verschieben können. Der Schnittpunkt zwischen der Angebots- und Nachfrage-Kurve repräsentiert das Marktgleichgewicht. Unter „normalen“ wirtschaftlichen Gegebenheiten führt eine Zunahme der Nachfrage zu einem höheren Preis. Im Gegenzug führt eine Abnahme des Angebots (z. B. Verknappung) ebenfalls zu einem höheren Preis. Auf eine detaillierte Beschreibung von makroökonomischen Theorien wird an dieser Stelle verzichtet, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Um beispielsweise wirtschaftlich Sekundärrohstoffe bereitzustellen, müssen die Kosten für das Endprodukt gleichwertig zu Primärrohstoffen sein (bevorzugt geringer), um Abnehmer zu finden. Transport- und Aufbereitungskosten stellen daher eine wichtige Stellschraube dar, zu welchem Preis Sekundärrohstoffe angeboten werden können. Dieser Aspekt wird in Kapitel 4 behandelt.

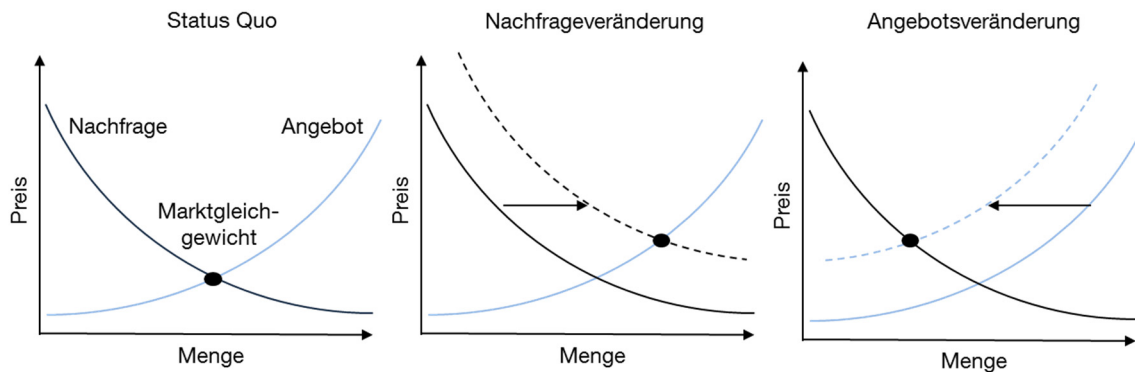


Abbildung 29: Auswirkungen von Veränderungen auf Angebot und Nachfrage (in Anlehnung an John und Mankiw 2011, S.10ff)

Weitere ausgewählte Aspekte die Auswirkungen auf Angebot und Nachfrage, und damit auf die Schließung von Kreisläufen haben sind:

- die räumliche Verteilung und Verfügbarkeit,
- Kritikalität,
- und Substitution

von Stoffen, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

2.3.2 Räumliche Verteilung, Kritikalität und Substitution

Die Europäische Union brachte 2014 einen überarbeiteten Bericht zur Kritikalität von Rohstoffen heraus. Neben den Metallen der Seltenen Erden (SEE) ist hier beispielsweise das Halbmetall Antimon aufgelistet, das als halogeniertes Flammschutzmittel für Kunststoffe (z. B. Kabelisolierungen, Folien) verwendet wird. Ebenso das Halogenidmineral Flussspat, das in der Stahl- und Aluminium-Herstellung benötigt wird (European Commission 2014).

Neben der EU beschäftigen sich unter anderem die KfW-Bankengruppe und die Deutsche Rohstoffagentur mit dieser Thematik. Mehrere Bewertungsmethoden sind hierzu bereits entstanden. Für Deutschland wird die Kritikalität bei einigen Metallen (Antimon, Germanium) als besonders hoch eingestuft – mittlere Kritikalität bei Zink und Kupfer. Den Massenmetallen Stahl, Blei, Aluminium, sowie dem Bereich Steine und Erden (z. B. Gips, Kaolin) werden hingegen geringere Kritikalitätswerte zugeordnet (Erdmann et al. 2011, S. 5).

Einige Elemente können durch andere substituiert werden, was einen Einfluss auf die wirtschaftliche Bedeutung sowie dessen Kritikalität bewirkt. Bei knapp werdenden Rohstoffen bietet die Substitution eine Möglichkeit, der Knappheit entgegenzuwirken. Sollte ein Rohstoff knapp oder unerschwinglich werden, kann versucht werden diesen durch einen häufiger vorkommenden Rohstoff zu ersetzen. Alternativ müssten neue Wege gefunden werden, um Aufgaben auf andere Weise zu lösen (z. B. durch Anpassung von Konstruktionsweisen). Allerdings gibt es derzeit nicht für alle Elemente eine alternative Nutzungsstrategie.

Der Substitution sind auch physikalische und technische Grenzen gesetzt. Göller und Weinberg nennen das Beispiel Kupfer (Goeller und Weinberg 1976, S. 684). Kupfer lässt sich beispielsweise durch Aluminium, das in der Erdkruste häufiger vorkommt, ersetzen. Aluminium ist ein guter Leiter von Strom, allerdings erhitzen sich Aluminiumdrähte viel schneller, was in der Vergangenheit zu Kurzschlüssen und Brandgefahr geführt hat (Kring 2016, S. 1). Problematisch stellt sich auch die energieintensive Produktion von Aluminium im Vergleich zu Kupfer dar. Ebenfalls gilt es zu bedenken, dass Aluminium Strom schlechter leitet als Kupfer, was eine größere Differenz im Energieaufwand pro funktionale Einheit (Transport von Strom) bedeutet (Bardi und Leipprand 2013, S. 269).

Die räumliche Verteilung eines Rohstoffs hat ebenfalls Auswirkungen auf dessen Kritikalität im räumlichen Kontext. Naturgemäß sind durch geologische Gegebenheiten regionale Unterschiede vorhanden. Während in Südbayern beispielsweise ein Mangel an natürlichem Sand herrscht, ist in Nordbayern ein Überschuss zu verzeichnen (StMWVT 2002, S. 33ff); (Elsner 2018, S. 7). Um die Kritikalitätsaspekte zu reduzieren, kann Sand durch das Brechen von Kies und Gestein hergestellt werden. Der Herstellungsprozess ist allerdings mit Kosten verbunden, da zusätzliche Arbeitsschritte notwendig sind. Andererseits können Sande auch von weiter weg gelegenen Werken transportiert werden, was jedoch eine Steigerung der Transportkosten zur Folge hat und sich auf die Gesamtkosten eines Bauprojekts auswirkt.

Ebenso sind regionale Unterschiede bei unterschiedlichen Gesteinssorten (z. B. Kalksandstein) vorhanden. Bei der Verteilung von Metallen (z. B. Eisen-, Kupfererzen) und SEE beispielsweise, sind ganze Länder und Gemeinschaften (z. B. EU) betroffen.

Eine Rohstoffkonkurrenz ist dabei nicht auf die räumliche Ebene begrenzt (z. B. zwischen Ländern), sondern auch zwischen einzelnen Wirtschaftssektoren vorhanden. Auch das Entstehen neuer Märkte, die beispielsweise innerhalb kurzer Zeiträume eine steigende Nachfrage eines bestimmten Stoffes mit sich bringen, kann zu einer Stoffstromverschiebung führen (z. B. Silicium für die Herstellung von Mikroprozessoren oder Glas). Es kann der Fall eintreten, dass ein Stoff, der sich bereits standardgemäß für eine Anwendung etabliert hat, nicht mehr wirtschaftlich einsetzbar ist.

Im Bauwesen kommen viele unterschiedliche Stoffe zum Einsatz und die Technologisierung sowie die Komplexität der Gebäude schreiten immer weiter voran. Eine immer größer werdende Anzahl von Elementen und Verbindungen werden verbaut. Daher wird sich zukünftig auch das Bauwesen vermehrt mit der Thematik von Kritikalität und Substitution auseinandersetzen müssen.

Durch Stoffströme entstehen komplexe Systeme, die an vielen Stellen beeinflusst werden können. Um Veränderungen und Optimierungen herbeizuführen ist es unerlässlich, die derzeitigen Ströme und deren Dynamik zu erfassen und Stellschrauben für eine gezielte Steuerung zu identifizieren. Im folgenden Kapitel werden die für das Bauwesen relevanten Stoffströme auf nationaler Ebene erfasst und in Beziehung zueinander gebracht. Diese Auswertung kann für teilraumspezifische Analysen (z. B. urbaner Raum) verwendet werden.

3 Einfluss des Bauwesens auf die Erfassung und Steuerung von Stoffströmen

In diesem Kapitel werden die Stoffströme und -mengen der gängigsten, für das Bauwesen relevanten Stoffe in Deutschland analysiert, um die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Stoffen zu identifizieren und eine Aussage zu deren Verbleib zu machen. In den wenigsten Fällen werden abgebaute Rohstoffe direkt im Bauwesen verwendet (z. B. Kies). Viele Rohstoffe werden benötigt, um Bauprodukte und Güter herzustellen (z. B. Zement, Beton, Stahl, Glas u. v. m.). Die dazu verwendeten Rohstoffe werden in den jeweiligen Gütern gebunden und fließen auf indirektem Weg ins Bauwesen (z. B. Sand zur Herstellung für Glas). Die Identifizierung der jeweiligen Stoffströme und assoziierter Prozesse ist nötig, um Einfluss- und Steuerungsmöglichkeiten des Stoffkreislaufsystems zu identifizieren.

Um beispielsweise eine Tonne Primärstahl bereitzustellen, werden neben Eisenerz auch Zuschlagstoffe, Legierungsmittel und energetische Rohstoffe (z.B. Kohle, Koks) eingesetzt. Bei einem Recycling können oft nicht alle eingesetzten Stoffe in ihrer natürlichen Form zurückgewonnen werden. Insbesondere bei nichtmetallischen Erzeugnissen gehen die eingesetzten Rohstoffe bei Herstellungsprozessen dauerhaft neue chemische Verbindungen ein (z. B. Ton wird zu Ziegeln [Brennprozess], Ziegel können nicht mehr zu Ton werden) (Andruleit et al. 2017, S. 27). Für eine Betrachtung der Stoffströme müssen die Materialstoffströme in ihre elementaren Bestandteile zerlegt werden bzw. in Subsystemen (Substoffkreisläufen) dargestellt werden (Kohler 1998, S. 45).

In Deutschland existieren keine einheitlichen Datenquellen zur Rohstoffproduktion. Zudem werden in diesem Bereich nicht alle Unternehmen statistisch erfasst, da derzeit eine Berichtspflicht lediglich für die unter Bergrecht zugelassenen Betriebe gilt (Andruleit et al. 2017, S. 16). Zur Top-Down Auswertung der Stoffströme wurden überwiegend statistische Daten (z. B. von Verbänden, Statistisches Bundesamt, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, gesamtwirtschaftliche Daten [Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung], Import/Export Statistiken, u. a.) ausgewertet.

Tabelle 3: Einteilung der gängigsten Baustoffe im Bauwesen (Wendehorst 2011, S. 3)

Anorganische Baustoffe		Organische Baustoffe
mineralisch	metallisch	
Naturstein, Steine & Erden, Glas, Keramik, Mörtel, Beton	Gusseisen, Stahl, Aluminium, Kupfer, Blei	Holz, Bitumen, Kunststoffe

Eine klassische Unterteilung der Baustoffe erfolgt nach der stofflichen Zusammensetzung. Die steigende Anzahl an Baustoffen macht eine systematische Einteilung und Kategorisierung notwendig (Tabelle 3). Durch den Einsatz von Verbundbaustoffen mit unterschiedlichen Materialkombinationen ist eine Einteilung im klassischen Sinne nicht mehr möglich (Wendehorst 2011, S. 2f).

Der erste Teil dieses Kapitels behandelt ausgewählte mineralische Stoffe, der zweite metallische Stoffe und der dritte beschäftigt sich mit organischen Stoffen. Zur Übersichtlichkeit und Lesbarkeit werden ausgewählte Stoffe in diesem Kapitel betrachtet. Ein weiterer Teil der Auswertungen wird in Anhang A aufgeführt (z. B. Naturstein). Am Ende des Kapitels wird eine Übersicht aufgezeigt und der potentielle Selbstversorgungsgrad (SVG) der einzelnen Stoffe auf nationaler Ebene ermittelt. Durch die Vielzahl der im Bauwesen eingesetzten Stoffe können im Rahmen dieser Arbeit lediglich die gängigsten Stoffe untersucht werden.

3.1 Mineralische Baustoffe

Mehr als 80 % der verwendeten mineralischen Rohstoffe finden als Baustoff Verwendung (BBS 2007, S. 2). Abbildung 30 zeigt eine Übersicht über die in diesem Abschnitt behandelten Stoffe. Die Wechselwirkungen zwischen den ausgewählten mineralischen Rohstoffen und den daraus hergestellten Gütern werden anhand eines Flussdiagramms in Abbildung 31 aufgezeigt.

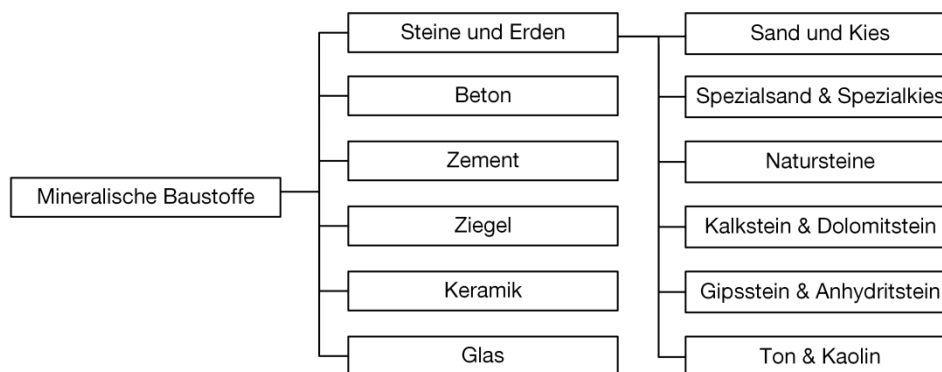


Abbildung 30: Übersicht ausgewählter mineralischer Baustoffe (Eigene Darstellung)

Hier zeigt sich, dass die betrachteten Stoffe in Abhängigkeit zueinander stehen. Um z. B. Mörtel und Estrich herzustellen, bedarf es einer Vielzahl von mineralischen Stoffen (z. B. Naturstein, Kalkstein, Zement u. a.). Demnach beeinflusst dessen Herstellung auch die Stoffströme benachbarter Stoffkreisläufe (Subkreisläufe). In Abbildung 31 werden die einzelnen Subprozesse (z. B. Herstellung von Zement, Beton) als *Black Box* dargestellt. Diese Darstellungsweise erlaubt eine systematische Erfassung von für das Bauwesen und anderen Wirtschaftssektoren relevanten Stoffströmen.

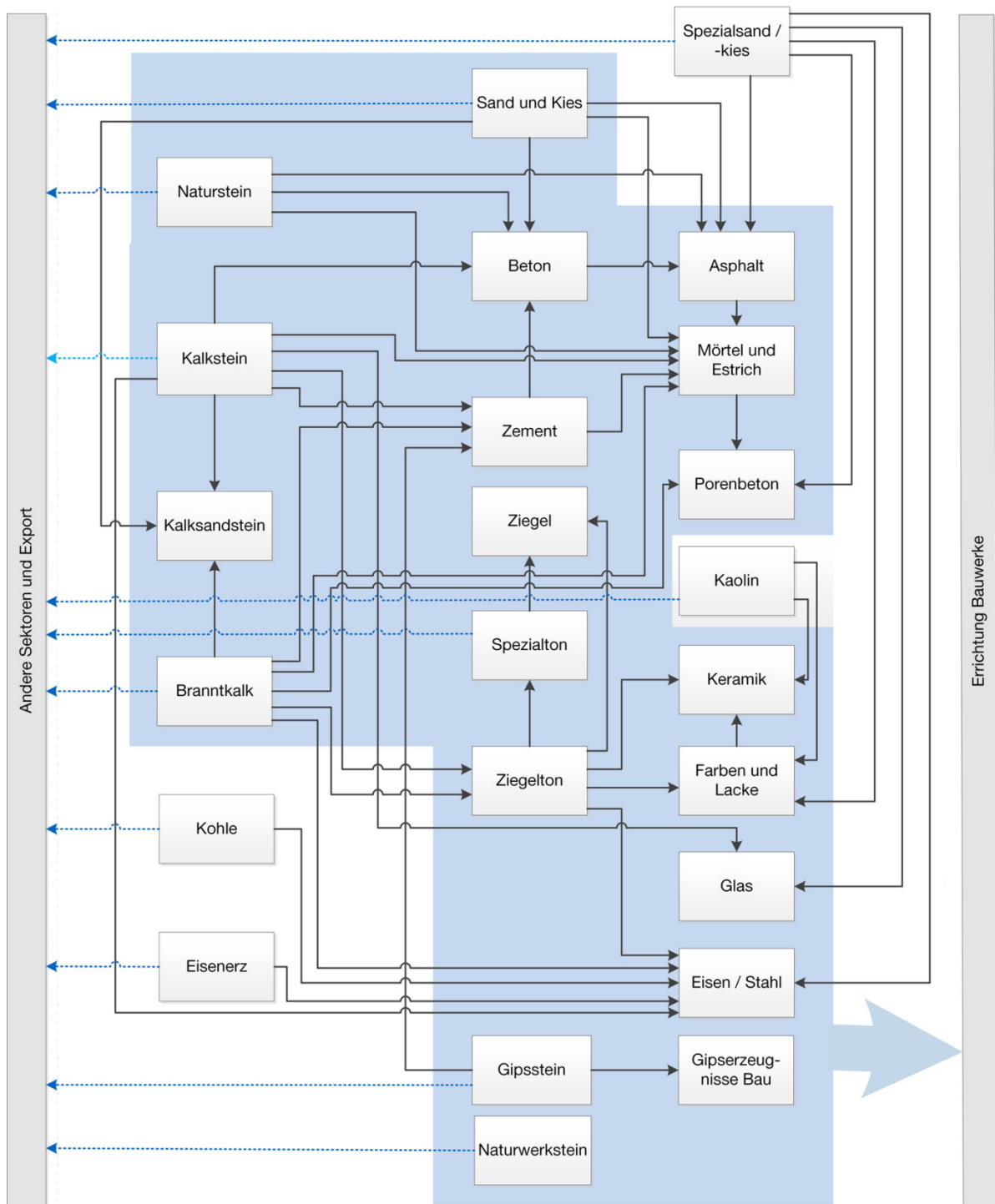


Abbildung 31: Stoffströme und Verwendung mineralischer Baustoffe (Eigene Darstellung)

Bundesweit wurden 2013 rund 540 Mio. t nichtenergetische mineralische Primärrohstoffe (ohne Naturgips- und Anhydritstein) gefördert (BBS 2016, S. 22). Im Gegenzug fielen laut Statistischem Bundesamt 2014 in Deutschland rund 55 Mio. t mineralische Bau- und Abbruchabfälle an (ohne Boddenaushub). Der Großteil gilt als ungefährlich (keine Gefahr für die Gesundheit und/oder die Umwelt) (Destatis 2016a, S. 27).

Des Weiteren wurden insgesamt 121 Mio. t Baggergut und Böden in der Abfallstatistik verzeichnet (davon 2,6 Mio. t als gefährlich eingestuft). Während die als ungefährlich gekennzeichnete Fraktion lediglich an einen anderen Standort verwertet wird (z. B. Verfüllung von Gruben), muss der als gefährlich eingestufte Anteil aufbereitet und überwiegend deponiert werden. Die statistisch ermittelten Verwertungsquoten betragen 85 % (ungefährlich) und 39 % (gefährlich) (Destatis 2016a, S. 27).

3.1.1 Steine und Erden

Mit dem Sammelbegriff, Steine und Erden werden Massenrohstoffe bezeichnet, welche geologisch gesehen als Gesteine und als Mineralgemenge vorkommen (z. B. Natursteine, Kalke, Tone, Sande und Kiese) (Kündig 2012, S. 51).

3.1.1.1 Sand und Kies

Kiese und Sande sind mengenmäßig die bedeutendsten Baurohstoffe mit vielseitigen Anwendungsbereichen (z. B. Zuschlag für Beton, direkte Verwendung im Straßenbau, Asphalt, Putzmörtel und Estrich). Insgesamt wurden in Deutschland 2013 rund

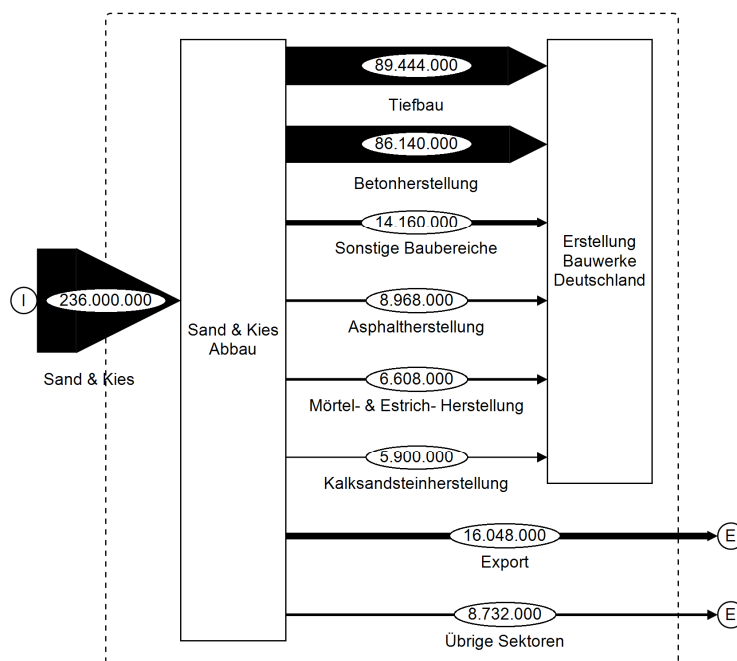


Abbildung 32: Stoffströme und -mengen von Sand und Kies (in Tonnen) (Eigene Berechnungen nach BBS 2016, S. 24f)

236 Mio. t produziert, mit sinkender Tendenz (BBS 2016, S. 24). Rund 211 Mio. t (2,6 t/Person) wurden direkt im Bauwesen eingesetzt (Abbildung 32).

3.1.1.2 Spezialsand und Spezialkies

Spezialkiese und Spezialsande finden im Bauwesen überwiegend in gebundener Form Verwendung. Zu den Verwendungszwecken zählen die Herstellung von Stahl, Glas, Porenbeton sowie von chemischen Erzeugnissen wie Farben und Lacke. Bei einer Gesamtproduktion von 9,7 Mio. t in 2013 (BBS 2016, S. 25), wurden rund 3,5 Mio. t für die Erstellung von Bauwerken aufgewendet (Abbildung 33).

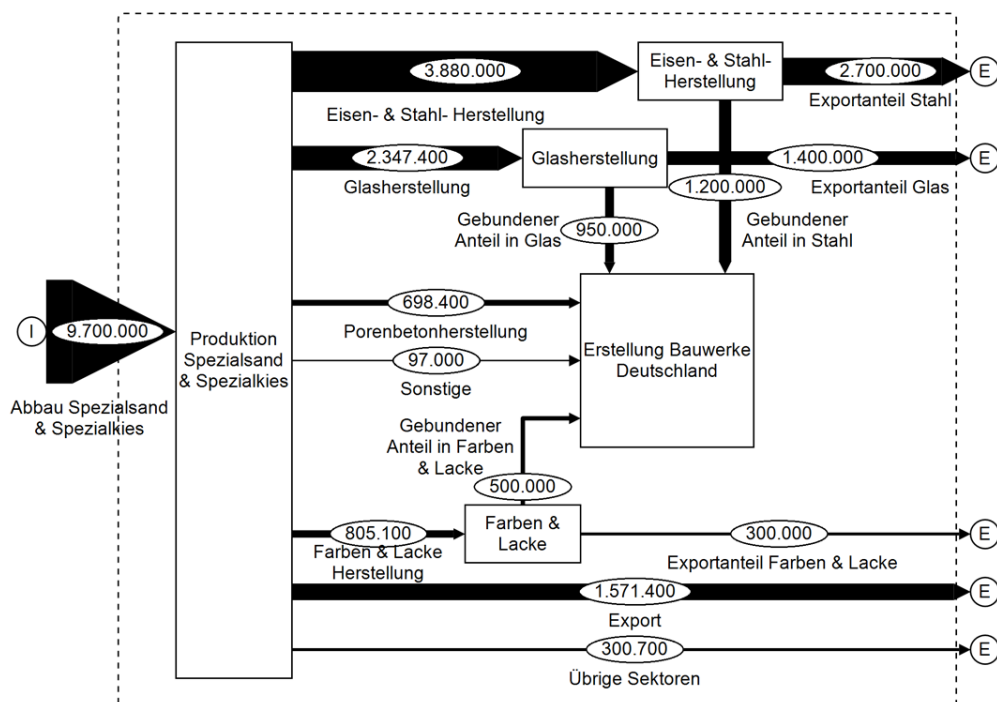


Abbildung 33: Stoffströme und -mengen von Spezialkies und Spezialsand (in Tonnen) (Eigene Berechnungen nach (BBS 2016, S. 25), (BV Glas 2016a), (BV Glas 2016b), (VdL 2016))

3.1.1.3 Ton und Kaolin

Im Bauwesen finden Ton und Kaolin überwiegend in der Herstellung von Ziegeln und Fliesen Verwendung. 2013 wurden rund 13,3 Mio. t Spezialton und Kaolin hergestellt und weitere 11 Mio. t Ziegelton (BBS 2016, S. 30). In gebundener Form wurden fast 13 Mio. t (jährlich) in Ziegeln und 1,3 Mio. t in Fliesen eingesetzt (Abbildung 34).

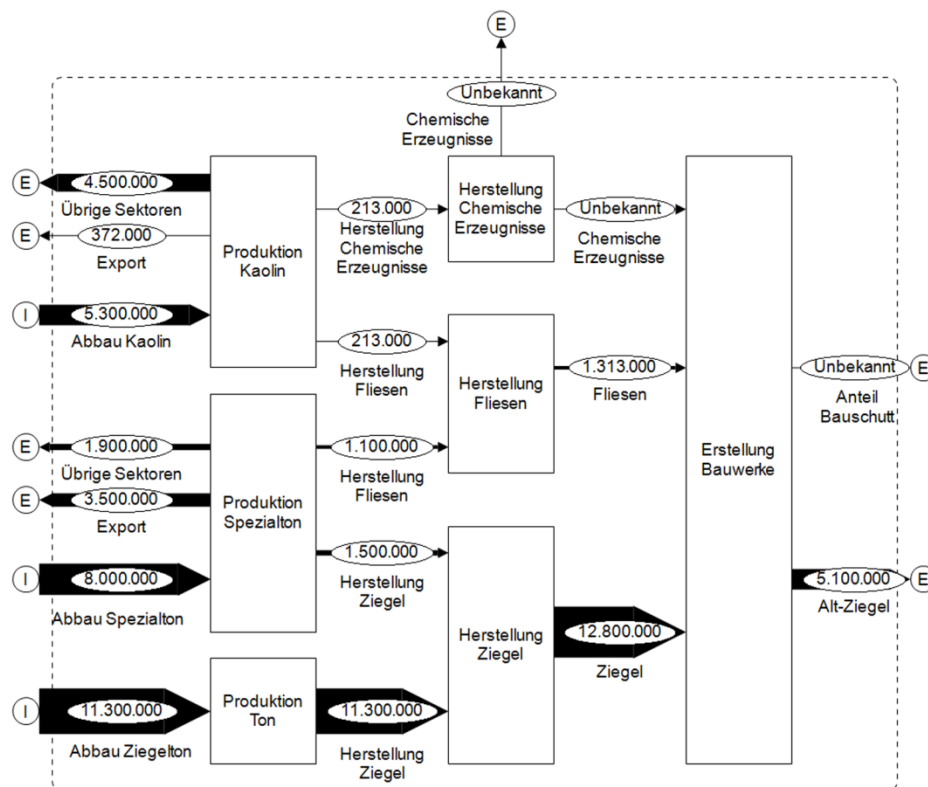


Abbildung 34: Verwendung von Ton und Kaolin (in Tonnen) (Eigene Berechnungen nach (BBS 2016, S. 30), (Grüne-Henze 2013, S. 1), (Destatis 2016c), (Huy et al. 2013, S. 150), (Andrleit et al. 2017, S. 187))

Rund 4 % (213.000 t) des produzierten Kaolins wird in der chemischen Industrie verwendet, unter anderem zur Herstellung von Farben und Lacken. Die statistischen Daten lassen keine Einschätzung zu, welcher Anteil davon in chemischen Erzeugnissen, die direkt dem Bauwesen zuzuordnen sind, letztendlich verwendet wurden.

Laut Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie wurden rund 50 – 60 % (0,9 Mio. t), der in Deutschland produzierten Farben und Lacke, im Bauwesen eingesetzt (überwiegend als Dispersions- und Innenwandfarben) (VdL 2016, S. 1). Da die Bauchemie unzählige Stoffe für viele Anwendungsbereiche bereitstellt, ist eine direkte Zuordnung von chemischen Erzeugnissen zum Bauwesen nicht möglich.

Es ist davon auszugehen, dass chemische Erzeugnisse, die im Bauwesen Verwendung finden, nur schwer, oder nicht wiederaufbereitet werden können. Diese Erzeugnisse gehen eine Verbindung mit anderen Baustoffen (z. B. Beton, Ziegel etc.) ein, werden während ihrer Nutzung an die Umwelt abgegeben oder enden als Verunreinigung in den Bauabfällen.

3.1.2 Ziegel

Laut Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie wurden 2012 rund 700 Mio. Stück Dachziegel produziert - Tendenz sinkend (Grüne-Henze 2013, S. 1). Des Weiteren wurden 2013 11,3 Mio. t Ziegelton und 1,5 Mio. t Spezialton zur Ziegelherstellung abgebaut (Abbildung 34). Seit 2000 ist die Menge an produziertem Ziegelton um fast 40 % zurückgegangen, da die Ziegelproduktion überwiegend an den Hochbau gekoppelt und von baukonjunkturellen Schwankungen abhängig ist (BBS 2016, S. 31).

Die Menge an anfallenden Dach- und Mauerziegeln wird unter unterschiedlichen Abfallschlüsseln statistisch erfasst. Laut Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) sind diese Fraktionen unter EAV 170102 einzuordnen. 2014 fielen rund 5,1 Mio. t Alt-Ziegel an (Destatis 2016a, S. 52) (Destatis 2016b, S. 26). Durch ihren mineralischen Gehalt können Ziegel auch als Gemisch mit Keramik und Fliesen (EAV 170103) oder zusammen mit Beton, Natursteinen, Fliesen und Keramik (EAV 170107) entsorgt werden. Demnach kann keine genaue Aussage darüber getroffen werden, wie viele Ziegel letztendlich anfallen.

Die Reinheit und Korngröße sind entscheidend dafür, in welcher Form Alt-Ziegel in den Stoffkreislauf zurückkehren können (Rasch 2016, S. 20f). Ziegel werden zerkleinert und nach Korngrößen klassiert. Je sortenreiner die Fraktionen einer Aufbereitung zugeführt werden, desto einfacher kann die Qualität des Endprodukts gesteuert werden. Bei Mauerwerksabfällen finden sich oft anhaftender Putz und Mörtel, die eine Verwertung beeinträchtigen können. Mauerwerksabfälle werden heute überwiegend verfüllt (Downcycling). Des Weiteren schränken erhöhte Sulfatgehalte einen späteren Einsatz ein (Müller 2016, S. 5ff).

Funktionsfähige historische Ziegel werden beispielsweise an Baustoffbörsen gehandelt. Aus alten Ziegeln können Substrate, Schüttungen für den Landschaftsbau und Oberflächen für Sportanlagen (z. B. Tennisplätze) hergestellt werden. Bei Dachziegeln können diese, je nach Beschaffenheit, wieder zum Eindecken von Dächern verwendet werden. Als Beispiel: Bei einem Bauvorhaben der Holzbau Heinrich GmbH in Lindau wurden historische Biberschwanzziegel abgedeckt, gereinigt und am neuen Dach wiederverwendet. Dies ist mit einem hohen Aufwand verbunden, insbesondere wegen des Reinigens (Hochdruckreiniger) und das vorsichtige Vorgehen beim Abdecken, um Beschädigungen zu vermeiden. Ein Ausschuss ist dennoch unvermeidbar, da nicht alle Dachziegel die Anforderungen für eine Wiederverwendung erfüllen.

3.1.3 Weitere keramische Baustoffe

Zu weiteren keramischen Baustoffen zählen Fliesen und Sanitäreinrichtungen (z. B. Waschbecken). Keramische Erzeugnisse finden auch indirekte Verwendung im Bauwesen, beispielsweise als feuerfeste Erzeugnisse, die zur Auskleidung von Hochöfen in der Stahl- und Glasindustrie verwendet werden (Hülseberg 2014, S. 16). Da ein Großteil des Stahls (Abschnitt 3.2.1) und des Glases (Abschnitt 3.1.5) im Bauwesen verwendet wird, werden die Stoffströme von feuerfesten Keramiken auch von der Produktion von Stahl und Glas beeinflusst.

Ton stellt den wesentlichen Bestandteil von keramischen Baustoffen dar (Hülsenberg 2014, S. 11). 2013 wurden etwa 1,3 Mio. t Fliesen im Bauwesen verwendet. Dies basiert auf der Auswertung der Stoffströme und ist vergleichbar mit den statistisch erfassten Mengen von 53,4 Mio. m² (Baulinks 2018, S. 1). Die Stoffströme werden in Abschnitt 3.1.1.3 beschrieben.

3.1.4 Beton

Die Nachkriegszeit war geprägt durch die Stahlbeton-, Beton- und Spannbetonbauweise. Die Entwicklung von hochwertigen Zementen und Betonstahls galt als wesentliche Voraussetzung (Wendehorst 2011, S. 2). Neben Stahl ist Beton einer der wichtigsten Konstruktionsbaustoffe. Heute bestehen mehr als die Hälfte aller Bauwerke aus Beton. Um Beton herzustellen, werden Gesteinskörnungen (Sand, Kies, Splitt) durch ein anorganisches Bindemittel (Zement) und Wasser zu einem künstlichen Konglomerat zusammengefügt. Zur Verbesserung der Betoneigenschaften können eine mittlerweile große Anzahl an Zusatzstoffen hinzugefügt werden (Wendehorst 2011, S. 247).

3.1.4.1 Zusatzstoffe

Zusatzstoffe sind überwiegend chemischer Natur und können in der Regel nicht mehr zurückgewonnen werden, da die Wirkstoffe absorbiert werden. Eine Wiederverwendung von Altbetonen wird durch Zusatzstoffe hingegen nicht beeinträchtigt (Scholz et al. 2011, S. 377).

Heute existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Betonrezepturen für diverse Anwendungen. Chemische Admixturen, Verflüssiger, Beschleuniger und Verzögerer sind nur einige Stoffe, die zum Einsatz kommen (VDZ 2014, S. 1ff), (Scholz et al. 2011, S. 271). Durch die vielzähligen Rezepturen ist auch die Spannweite der Wasserzementanteile groß, was einen Einfluss auf die Massen der eingesetzten Bestandteile hat (Hegger et al. 2005, S. 58).

3.1.4.2 Transportbeton

Der Bundesverband für Transportbeton (BTB) stellt jährlich aktualisierte Daten zur Verfügung. Im Jahr 2014 wurden in Deutschland 46,8 Mio. m³ Transportbeton in rund 1.900 Werken bereitgestellt. Über 83 % des Transportbetons wird heute im Hochbau eingesetzt, gefolgt vom Tiefbau mit 15 % (Betonwaren und Fertigteile unter 2 %). Mit einem Anteil von 22 % (10,3 Mio. m³) wird in einem bundesweiten Vergleich der meiste Transportbeton im Freistaat Bayern hergestellt. Bei einer durchschnittlichen Dichte von 2.400 kg/m³ (IBU 2013, S. 3) wurden demnach in 2014 rund 110 Mio. t (1,4 t/Person) Transportbeton bereitgestellt. Die durchschnittliche Entfernung vom Werk zur Baustelle betrug dabei 16,9 km (BTB 2015, S. 7f, S. 48ff, S. 52f).

3.1.4.3 Betonbruch und -recycling

Beton kann je nach Sortenreinheit unter verschiedenen Abfallschlüsseln (Abfallkategorien) entsorgt werden. Als reiner Betonabfall (EAV 170101) fielen 2014 rund 21,9 Mio. t an (Destatis 2016b, S. 26). Da Beton, wie andere mineralische

Bauabfälle, auch als Gemisch (z. B. EAV 170106* und 170107) entsorgt werden kann, können anhand von Statistiken keine genauen Aussagen zu dessen Verbleib gemacht werden.

Gemischter Bauschutt 100 % (EAV 170107)	
Betonbruch 53 %	Mauerwerkbruch 47 %
	<ul style="list-style-type: none"> • Ziegel & Dachziegel 20 % • Kalksandstein 13 % • Mörtel & Putz 9 % • Leichtbeton 5 % • Porenbeton 1 %

Abbildung 35: Zusammensetzung von Bauschutt nach Baustoffarten (Eigene Darstellung nach Müller 2016, S. 50)

Nach Berücksichtigung der Zusammensetzung gemischter Bauschuttfractionen (Abbildung 35) werden weitere 13,8 Mio. t Beton unter EAV 170107 (gemischter Bauschutt) entsorgt. Demnach wurden 2014 rund 36 Mio. t Beton entsorgt.

Der derzeitige Stand der Technik sieht ein Verfüllen (z. B. Straßenbau) vor (Müller 2016, S. 6). Unter Einhaltung der geltenden Richtlinien und Vorschriften, kann aus den entsprechenden Fraktionen auch Recycling-Beton (RC-Beton) hergestellt werden. In Kapitel 6 werden mögliche Optionen für einen Einsatz von RC-Beton im Hochbau anhand von Szenarien beschrieben.

3.1.4.4 Zement

Bei einem Gesamtumsatz von € 2,5 Mrd. (2014) wurden in Deutschland 23,9 Mio. t Klinker und 32,1 Mio. t Zement in 55 Produktionsstandorten von 22 Unternehmen hergestellt. Unter Berücksichtigung von In- und Exporten entspricht dies einem inländischen Verbrauch von ca. 27,3 Mio. t (0,3 t/Einwohner) (VDZ 2016, S. 2).

Deutschlands Außenhandel mit Zement erstreckt sich überwiegend auf dem innereuropäischen Markt. Der Zementverbrauch in Deutschland ist seit 2005 relativ ausgeglichen und lag im Bereich von jährlich 24,7 Mio. t (Minimum 2010) und 28,9 Mio. t (Maximum 2006). Zum Vergleich: Der weltgrößte Produzent China verbraucht insgesamt zehnmal so viel, was 2,2 Mrd. t (1,6 t/Einwohner) pro Jahr entspricht (VDZ 2016, S. 3). Abbildung 36 zeigt eine Übersicht des Verwendungszwecks.

Zur Herstellung von Zement kommen je nach Zementart unterschiedliche Stoffe zum Einsatz. DIN EN 197-1 zeigt eine Aufstellung der Bestandteile der jeweiligen Sorten. 2013 wurden in deutscher Produktion 37,2 Mio. t Kalkstein für die Zementherstellung eingesetzt (BBS 2016, S. 29f). Die Herstellung ist sehr energieintensiv. Um eine Tonne herzustellen werden durchschnittlich 2.882 MJ/t thermische Energie und 110 kWh/t an elektrischer Energie aufgewendet und 0,56 t CO₂/t freigesetzt. Insgesamt werden in Deutschland 39 Öfen (Zyklonvorwärmer) mit einer Kapazität von 100.460 t/Tag

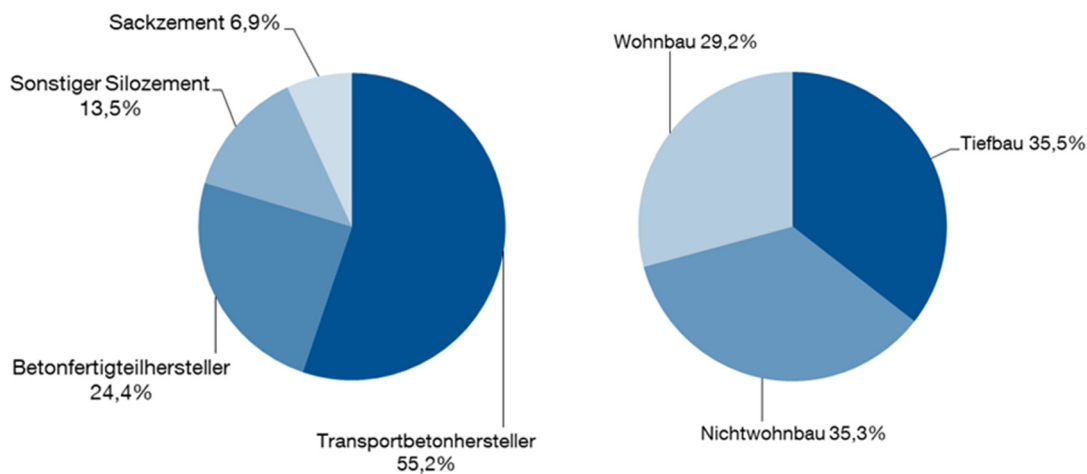


Abbildung 36: Abnehmerstruktur der Zementindustrie 2014 (links) und Zementabsatz nach Baubereich 2013 (rechts) in Deutschland (Eigene Darstellung nach VDZ 2016, S. 3)

betrieben. Weitere sechs Öfen mit Rostvorwärmern und acht Schachtofen weisen eine jeweilige Kapazität von 5.500 und 1.200 t/Tag auf (VDZ 2016, S. 2). Damit beträgt die maximale Produktionskapazität ca. 1,4 Mrd. t (18 t/Einwohner) pro Jahr. Deutschland besitzt daher genügend Produktionskapazitäten, um ausreichend Zement bereitzustellen - vorausgesetzt, dass die dafür benötigten Rohstoffe verfügbar bleiben.

3.1.5 Glas

Durch die erhöhte Nachfrage nach Architektur- und Automobilglas hat sich die Produktion von Flachglas in Deutschland seit 1950 fast verzehnfacht. Die Glasveredelungs- und Glasverarbeitungsindustrie verzeichnete in den letzten Jahrzehnten hohe Zuwachsraten, insbesondere bei der Flachglasveredelung, die den höchsten Anteil am Produktionswert aller Nachbearbeitungsprozesse stellt (Glocker 2012, S. 33f). Im Bauwesen kommt Glas überwiegend in Form von Flachglas, Glasbausteinen, Glasfasern und Mineralwolle zum Einsatz.

3.1.5.1 Glasherstellung und -nutzung

Mit einem Gesamtumsatz von € 9,2 Mrd. in 2015 und rund 53.000 Beschäftigten, ist die deutsche Glasindustrie ein bedeutender Wirtschaftszweig. Rund 40 % des Umsatzes entfällt auf die Flachglasveredelung, 11 % auf die Flachglasherstellung und weitere 9 % auf die Glasfaserherstellung (BV Glas 2016a, S. 10ff, S. 19f). Bei einer Betrachtung des Produktionswertes (ca. € 9 Mrd.) beträgt der Anteil der Flachglasveredelung 35 %, Mineralfaserherstellung 16 % und die Flachglasherstellung 10 %. Der Anteil der Bauindustrie am Produktionswert beträgt 40,1 % (BV Glas 2016a, S. 29f). Damit ist das Bauwesen der wichtigste Abnehmer der Deutschen Glasindustrie (Abbildung 37).

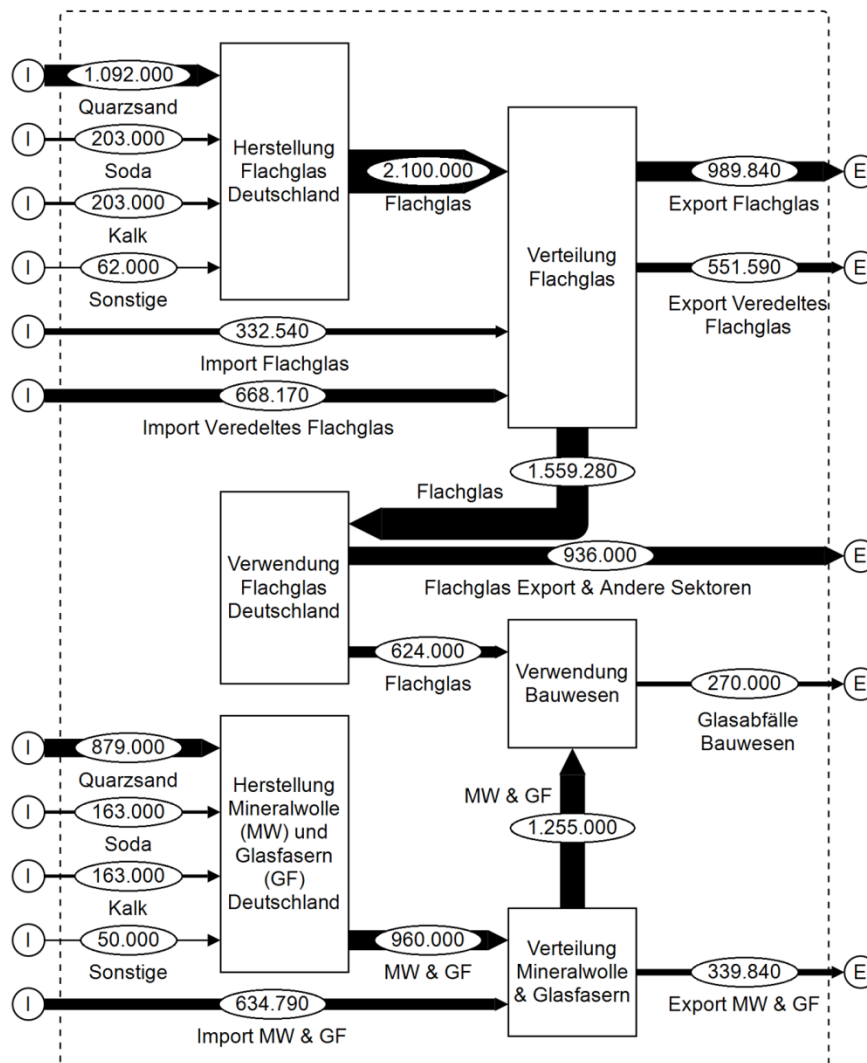


Abbildung 37: Stoffströme in der Glasherstellung (in Tonnen) (Eigene Berechnungen nach (BBS 2016), (Destatis 2016b, 2016a, 2016c), (BV Glas 2016a, 2016b))

Als Hauptrohstoffe in der Glasherstellung werden Quarzsand (70 %), Soda (13 %), Kalk (10 %) und geringere Anteile Dolomit, Feldspat und Pottasche verwendet (BV Glas 2016b, S. 1). Laut Bundesverband Glasindustrie wurden 2015 in Deutschland rund 2,1 Mio. t Flachglas und 0,96 Mio. t Mineralfasern hergestellt. Mengemäßig ist die Hohlglasherstellung (z. B. Flaschen) der größte Absatzmarkt (BV Glas 2016a, S. 19). Durch die Veredelung (z. B. Beschichtung oder Verbund) von Flachglas werden beispielsweise Verbundsicherheitsglas, Einscheibensicherheitsglas oder Wärmeisolierglas hergestellt (Glocker 2012, S. 32).

Unter Berücksichtigung von In- und Exporten wurden in Deutschland 2015 rund 1,3 Mio. t Glasfasern und Mineralwolle sowie 1,6 Mio. t Flachglas verwendet. Die Herstellung von Glasfasern für die optische Nachrichtenübertragungen wird hingegen

der Spezialglasindustrie zugeordnet (Glocker 2012, S. 33). Während die Verwendung von Mineralwolle gänzlich dem Bauwesen zuzuordnen ist, kommt Flachglas auch in anderen Industriezweigen zum Einsatz (z. B. für Automobile, Züge, Spiegel, Photovoltaikanlagen, Displays u.a.). Anhand der Verteilung des Produktionswerts wird eine Aufteilung nach Massen durchgeführt, da die Statistik diesbezüglich keine weitere Disaggregation zulässt.

Fenster und Türrahmen

Über 60 % der in der EU hergestellten Fensterrahmen bestehen aus Kunststoff, gefolgt von Aluminium (19 %), Holz (16,7 %) und Holz-Alu (3,4 %). Bei den Holzfenstern haben Meranti und Kiefer einen Anteil von jeweils 1/3 an der Gesamtproduktion. Das Tropenholz Meranti stammt im Gegensatz zur Kiefer oft aus illegal geschlagenen Beständen (z. B. Indonesien) (Cremers 2015, S. 212).

3.1.5.2 Glasrecycling

Glas eignet sich ideal für Recycling. Es lässt sich leicht zerbrechen und kann wieder eingeschmolzen werden, um neue Produkte herzustellen. Prinzipiell lässt sich dieser Vorgang beliebig oft wiederholen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass Glasrecycling bereits durch die Römer betrieben worden ist, die nicht nur Pioniere der Glasherstellung waren, sondern mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits Recyclingnetzwerke etabliert hatten (Freestone 2015, S. 29), (Wight 2015, S. 29).

Laut Abfallstatistik des Statistischen Bundesamts fielen 2014 rund 0,27 Mio. t Glas aus Bauabfällen, sowie 0,03 Mio. t Glasabfälle an, die importiert wurden (Destatis 2016b, S. 26). Zum Vergleich: Im gleichen Zeitraum fielen 2 Mio. t Verpackungen aus Glas und 0,05 Mio. t Glasfaserabfälle an (ohne Berücksichtigung von Produktionsabfällen) (Destatis 2016b, S. 23ff). Produktionsabfälle können sortenrein erfasst und dem Produktionsprozess wieder zugeführt werden.

Fensterglas ist mittlerweile zu einem komplexen Hightech-Werkstoff mit hohen Anforderungen geworden. Das Recycling von Flachglas aus alten Fenstern und Glasfassaden stellt nach wie vor eine Herausforderung dar. Durch die hohe Anzahl an unterschiedlichen Verbunden, Beschichtungen, Färbungen und anderen Eigenschaften ist eine werkstoffliche Wiederverwertung derzeit kaum wirtschaftlich umsetzbar (Krauß und Werner 2014, S. 27ff), (BauNetz 2016, S. 1).

Aus der Statistik ist nicht ersichtlich, welche Glassorten aus Bauabfällen hergestellt werden und welcher Anteil vor einer erneuten Schmelze aussortiert werden muss (z. B. Verunreinigungen, Schadstoffe). Es ist davon auszugehen, dass der überwiegende Teil zur Herstellung von Behälterglas eingesetzt wird, da die Qualitätsanforderungen geringer sind als für Flachglas, das sortenreines Material benötigt. Durch die unzähligen Verbunde von Glasbaustoffen ist eine sortenreine Erfassung sehr aufwendig. Altglasfraktionen können daher aus Qualitätsgründen nicht für die Herstellung von neuem Flachglas eingesetzt werden (Umweltbundesamt 2016, S. 1).

Im Vergleich: Beim Recycling von Hohlglas (z. B. Flaschen, Behälter) werden derzeit Recyclingquoten von 85 - 100 % erreicht (BMUB 2017, S. 1), (Destatis 2016a, S. 27).

Aus rezykliertem Fensterglas lassen sich beispielsweise Glasbausteine, Glaswolle, Glasschaumgranulat und Dämmstoffe herstellen, die ebenfalls im Bauwesen zum

Einsatz kommen. Da sich die Sortier- und Aufbereitungstechnologien immer weiter verbessern (Erhöhung der Sortenreinheit) wird davon ausgegangen, dass zukünftig Alt-Fenster zu neuen Fenstern werden können.

Auch durch das rasante Wachstum von Photovoltaikmodulen in den vergangenen Jahrzehnten ist mit einem erhöhten Anteil an potentiellen Sekundärrohstoffen zu rechnen. Neben Metallen, wie Aluminium, Kupfer, Zink, Blei und Seltenen Erden stellt Glas mit rund 75 % bis 95 % Masseanteil den größten Bestandteil der Module dar. Derzeit werden Recyclingraten von 95 % angestrebt (BINE 2010, S. 2ff). Der Mitgliederverbund PV Cycle beschäftigt sich mit dieser Thematik.

3.1.6 Kreislauf mineralischer Baustoffströme

Der Verbund Kreislaufwirtschaft Bau erhebt seit 1995 alle zwei Jahre Daten zum Verbleib mineralischer Baustoffe. Der letzte Bericht von 2015 zeigt die Datenerhebung von 2012. Abbildung 38 fasst diese Daten zusammen.

Die Stoffflüsse zeigen, dass der Großteil der in den Kreislauf zurückgeführten Stoffe im Tiefbau zum Einsatz kommt. Demnach stellt der Tiefbau eine wichtige Senkenfunktion dar, die in Kapitel 4 weiter erörtert wird. Ebenfalls wird ein beachtlicher Anteil mineralischer Fraktionen nach wie vor deponiert.

Aus Bauabfällen wurden 2013 rund 66,2 Mio. t Recyclingbaustoffe hergestellt, was ca. 10 % der gesamten Nachfrage nach primären und sekundären Steine-Erden-Rohstoffe in Deutschland ergibt. Optimistische Schätzungen gehen davon aus, dass sich die Quote bis 2035 auf 15,4 % erhöhen könnte (BBS 2016, S. 36f). Diese Zahlen zeigen, dass derzeit im Bereich mineralischer Baustoffe noch keine geschlossene Kreislaufwirtschaft realisiert werden kann.

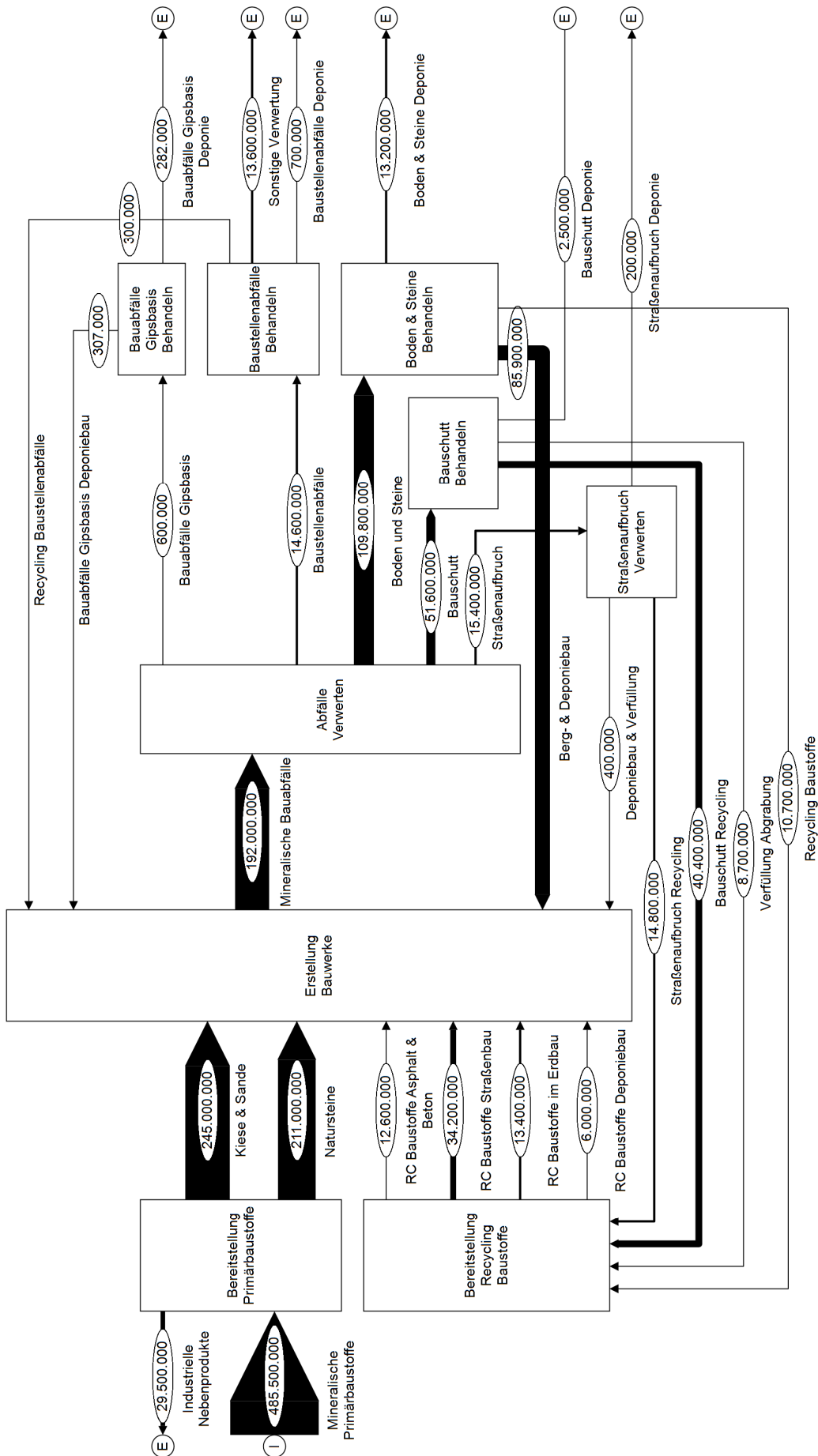


Abbildung 38: Verbleib mineralischer Baustoffe in Deutschland 2012 (in Tonnen) (Eigene Darstellung nach Kreislaufwirtschaft Bau 2015)

3.2 Metalle

Der Einsatz von Metallen im Bauwesen ist vielseitig und essentiell. Metalle werden überwiegend als Legierung (z. B. Stahl) verwendet und seltener in elementarer Form. Dies führt zu einer großen Vielfalt an unterschiedlichen Metallverbindungen. In diesem Kapitel werden der Einsatz und die Stoffströme von Metallen im deutschen Bauwesen untersucht. Abbildung 39 zeigt eine Aufstellung und Gruppierung der gängigsten Metalle.

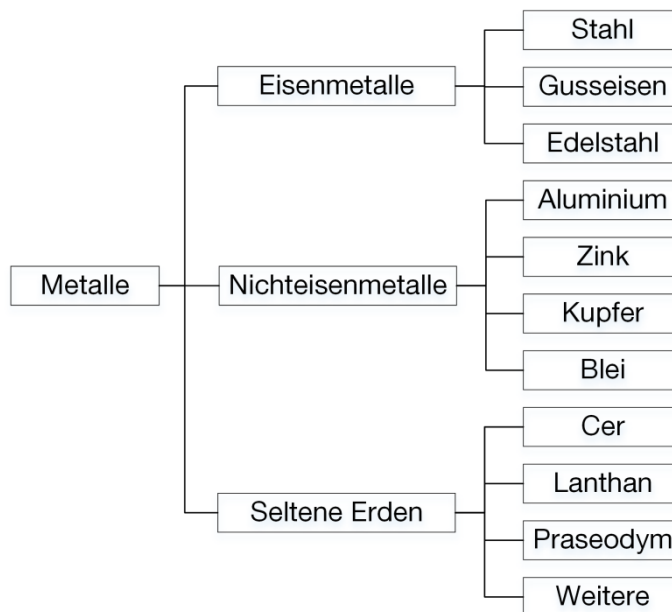


Abbildung 39: Übersicht ausgewählter Metalle im Bauwesen (Eigene Darstellung)

Deutschland zählt zu den fünfgrößten Verbrauchern von Aluminium, Blei, Kupfer, Zink und Zinn (Andruleit et al. 2017, S. 9). Das mengenmäßig am häufigsten verwendete Metall im Bauwesen ist Stahl mit 91,6 %, gefolgt von Aluminium (3,3 %), Zink (3,3 %), Kupfer (1,5 %) und Blei (0,3 %). In Abbildung 40 werden die Werte zusammengefasst.

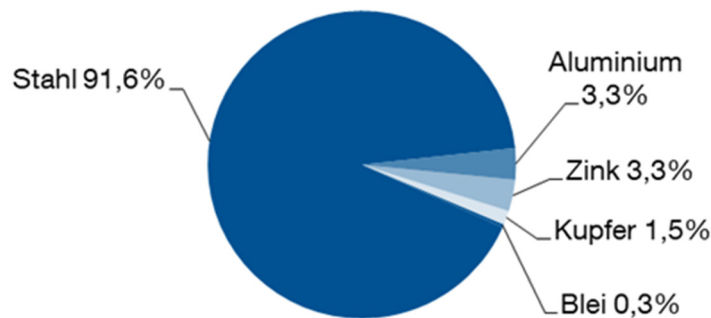


Abbildung 40: Verwendung von Metallen im Bauwesen in Deutschland im Jahr 2014
(Zusammenfassung der eigenen Auswertung, basierend auf diesem Kapitel)

Neben den klassischen Metallen werden zunehmend Metalle der Seltenen Erden (SEE) im Bauwesen eingesetzt. Anwendungen sind beispielsweise Zusatzmittel in der Glas-, Keramik- und Metallherstellung sowie der Anlagentechnik. In der Masse gesehen ist der Einsatz eher gering und wird derzeit statistisch nicht erfasst.

Die Investitionen der Nichteisen (NE)-Metallindustrie in Deutschland sind seit der Finanzkrise 2008/2009 kontinuierlich angestiegen. In Deutschland herrscht eine zunehmende Abhängigkeit beim Import von NE-Metallen und der zur Herstellung benötigten Vorstoffe. 2014 wurden 5,8 Mio. t an Vorstoffen importiert und 1,6 Mio. t exportiert (Außenhandelsaldo: -4,15 Mio. t). Im gleichen Zeitraum wurden insgesamt 4,0 Mio. t NE-Metalle importiert und 0,9 Mio. t exportiert (Außenhandelsaldo: -3,25 Mio. t) (Wirtschaftsvereinigung Metalle 2015, S. 6).

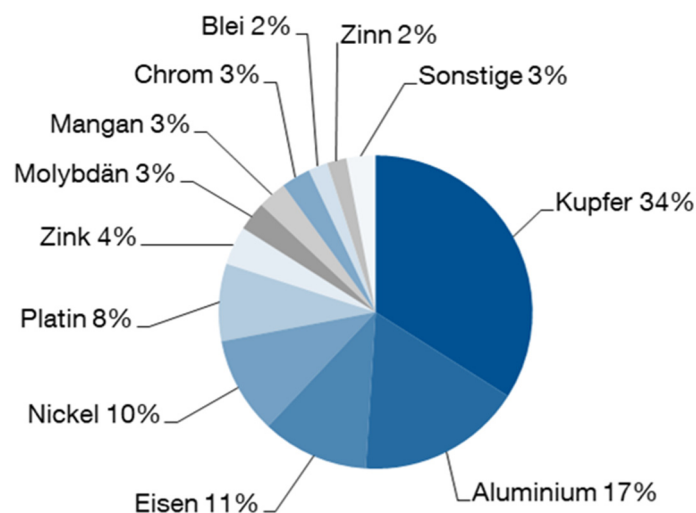


Abbildung 41: Prozentualer Nettoimportwert Deutschlands wichtigster importierter Metalle
(Darstellung nach Drobe und Killiches 2014, S. 28ff)

Metalle stehen, wie andere Rohstoffe auch, nicht unbegrenzt zur Verfügung. Als Ergänzung des vom *Club of Rome* entwickelten Weltmodells (*World3*) und seinen Aktualisierungen, sowie in Anlehnung an Marion King Hubberts *Peak Oil* Prognosen, untersucht die Gruppe um Harald Sverdrup die Fördermaxima von Metallen (*Peak Meta*). Anhand mehrerer Szenarien und dynamischer Berechnungen kommt die Gruppe zu dem Schluss, dass einige der Metalle in naher Zukunft ihr Fördermaximum erreichen (Sverdrup et al. 2013, S. 510) (Sverdrup und Ragnarsdóttir 2014, S. 275). Tabelle 4 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse für die im Bauwesen gängigsten Metalle und Legierungen.

Tabelle 4: Fördermaximum und internationale Recyclingraten von ausgewählten Metallen (Sverdrup und Ragnarsdóttir 2014, S. 275ff; Sverdrup et al. 2013, S. 511ff)

Metall	Fördermaximum (Jahr)			Recyclingraten
	Pessimistisch	Durchschnitt	Optimistisch	
Antimon	2018	2018	2018	15%
Niob	2014	2018	2023	60%
Mangan	2018	2021	2025	45%
Zink	2018	2025	2028	20%
Chrom	2022	2025	2035	22%
Kupfer	2032	2038	2042	60%
Eisen	2025	2040	2080	60%
Molybdän	2048	2057	2065	40%
Aluminium	2030	2130	2230	75%

Im den folgenden Abschnitten werden die Stoffströme der im Bauwesen am gängigsten verwendeten Metalle untersucht.

3.2.1 Stahl

Mit Einzug der Eisenzeit in Mitteleuropa um etwa 750 bis 450 v. Chr. beginnt auch die Einführung des Eisens als Nutzmessall (Schauwinhold 1985, S. 1276). Eisen und Stahl fanden immer größeren Einsatz im Bauwesen. Die atomaren Eigenschaften von Stahl wurden allerdings erst im 20. Jahrhundert verstanden (Bardi und Leipprand 2013, S. 84). Als mengenmäßig wichtigstes Metall ist Stahl im Bauwesen heute nicht mehr wegzudenken.

3.2.1.1 Stahlherstellung

Die deutsche Stahlindustrie, mit einem Gesamtumsatz von 37,8 Mrd. € und 86.000 Beschäftigten, ist weltweit der siebtgrößte Rohstahlhersteller und erzeugte im Jahr 2015 insgesamt 42,7 Mio. t Stahl (0,53 t/Einwohner). Im Vergleich wurden weltweit im

gleichem Zeitraum rund 1.623 Mio. t (0,22 t/Einwohner) produziert (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2015, S. 3, S. 13). Eine Auswertung der Stoffströme für Stahl und dessen Vorketten ist in Abbildung 42 dargestellt.

Unter Berücksichtigung von Importen (22,6 Mio. t/a) und Exporten (20,9 Mio. t/a) ergibt dies einen Bedarf von 44,4 Mio. t/a. Die deutsche Bauwirtschaft als größte Abnehmerbranche benötigt 31 % des Gesamtaufkommens (13,8 Mio. t/a), gefolgt von der Automobilbranche (26 %) (Abbildung 44) (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2017, S. 7).

Seit der Finanzkrise von 2008 leidet der weltweite Stahlmarkt an einer Überproduktion. Schätzungen zufolge liegt diese allein in Europa bei 20 Mio. t, bei einer Gesamtproduktion von 170 Mio. t (2015) (Überproduktion China: 200-300 Mio. t; Gesamtproduktion China: 823 Mio. t). Die Folgen sind sinkende Preise; der Markt wird mit billigem Stahl überflutet, was Nachteile für die Konkurrenzfähigkeit der heimischen Stahlindustrie bedeutet (Schaub 2016, S. 7).

Produktionsprozesse

Um eine Tonne Stahl zu produzieren, werden neben Energie und Wasser ca. zwei Tonnen Rohstoffe benötigt. Etwa 50 % des in Deutschland erzeugten Rohstahls wird aus Stahlschrott bereitgestellt. Deutschland ist Stahlschrott Netto-Exporteur. Bei den benötigten Produktionsrohstoffen (z. B. Eisenerz, Koks Kohle) besteht hingegen eine fast vollständige Importabhängigkeit (Eisenerz zu 100%; Koks Kohle zu 95%) (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2016, S. 8f).

Koks Kohle, die zu 90 % in der Stahlherstellung verwendet wird, wurde 2013 erstmals als kritischer Rohstoff eingestuft. Es ist nicht möglich, Koks Kohle zu recyceln und es existieren momentan keine technischen und ökonomischen Alternativen, diesen Rohstoff in der Stahlproduktion zu ersetzen (European Commission 2014, S. 43).

Des Weiteren werden in der Stahlherstellung, insbesondere für Legierungen (z. B. Edelstahl), ein Großteil des produzierten Mangans, Chroms und ein bedeutender Anteil an Vanadium und Molybdän benötigt (Sverdrup und Ragnarsdóttir 2014, S. 213).

Der Primärenergieverbrauch und die CO₂-Emissionen für die Herstellungsprozesse konnten in den letzten 20 Jahren um etwa ein Viertel gesenkt werden. Dies ist auch auf den steigenden Anteil von Schrott zurückzuführen, der momentan bei ca. 45% liegt (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2015, S. 10ff). Der Schrott wird im Elektroofen eingeschmolzen, um neuen Stahl zu produzieren. Dieser Vorgang kann ohne Qualitätsverluste unbegrenzt wiederholt werden (Helmus und Randel 2014, S. 2).

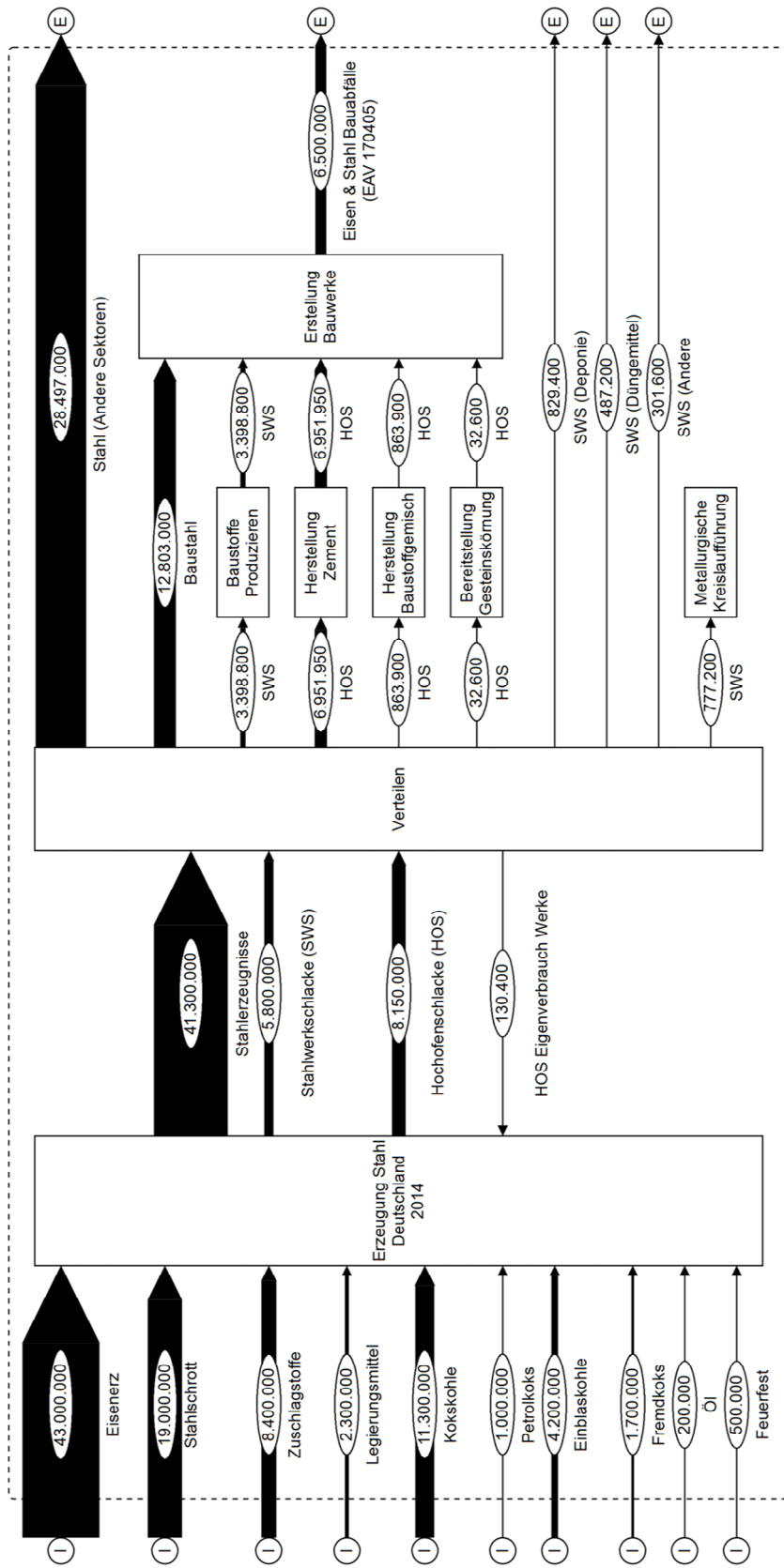


Abbildung 42: Stoffströme der Stahlherzeugung in Deutschland 2014 (Eigene Auswertung nach Wirtschaftsvereinigung Stahl 2015, S. 7 ; Destatis 2016b, 2016c, 2016a, 2016d)

Koppelprodukte

Bei der Stahlproduktion fallen Schlacken als Koppelprodukt an. Diese finden im Wirtschaftskreislauf, insbesondere im Bauwesen, eine erneute Verwendung. Rund 60 % der erzeugten Stahlwerksschlacke wird direkt im Bauwesen eingesetzt. Der größte Abnehmer ist der Straßen- und Wegebau, gefolgt vom Erd- und Wasserbau sowie der Gleisbau (Schotter). Rund 14 % werden deponiert (FEhS – Institut für Baustoff-Forschung 2016, S. 1) (Abbildung 43).

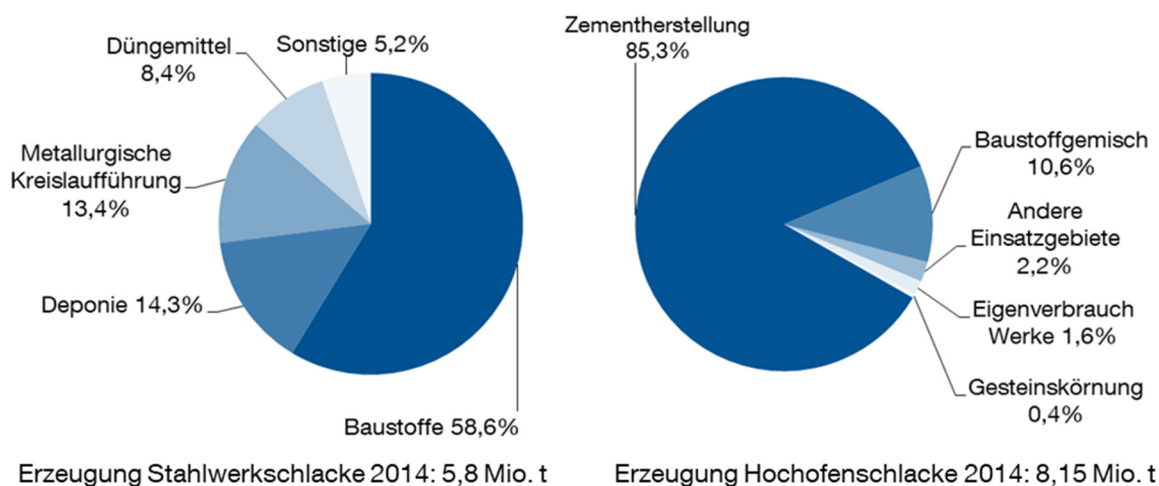


Abbildung 43: Verwendung von Stahlwerk- und Hochofenschlacke in Deutschland im Jahr 2014 (Eigene Darstellung nach FEhS – Institut für Baustoff-Forschung 2016b, 2016a)

Der Anteil der deponierten Schlacke setzt sich vorwiegend zusammen aus feinkörniger Schlacke, die auf einen weitgehend gesättigten Markt trifft. Für die Herstellung einer Tonne Stahl fallen rund 140 kg Stahlwerksschlacke an (Bialucha et al. 2011, S. 134).

Des Weiteren wurden 2014 mehr als 8 Mio. t Hochofenschlacke (Roheisenherstellung) erzeugt, wovon rund 85 % in der Zementherstellung verwendet wurden und ca. 11 % als Baustoffgemisch (z. B. Verwendung im Straßenbau als Frostschutz- und Schottertragschicht). Für die Herstellung einer Tonne Stahl fallen parallel zur Stahlwerksschlacke rund 190 kg Hochofenschlacke an (FEhS – Institut für Baustoff-Forschung 2016, S. 1).

Bei den industriellen Nebenprodukten haben Eisenhüttenschlacken mit die höchsten Nutzungsraten. Durch die räumliche Verteilung der Stahlwerke in Deutschland kommen Eisenhütten- und Stahlwerksschlacke in allen Bundesländern zum Einsatz. Die Verwertungsquote liegt bei über 95 % (Merkel 2011, S. 356).

3.2.1.2 Stahl im Bestand

Der homogene Baustoff Stahl mit seiner Festigkeit, guten Formbarkeit und Beständigkeit ist heute auf vielen Gebieten nicht oder nur schwer zu ersetzen (Werner und Seidel 1992, S. 14). Schätzungen zufolge sind weltweit rund 21 Mrd. t im anthropogenen Lager verbaut (Rauch und Pacyna 2009, S. 2) (Sverdrup und Ragnarsdóttir 2014, S. 223). Auf die Weltbevölkerung bezogen entspricht dies rund 2,8 t/Person.

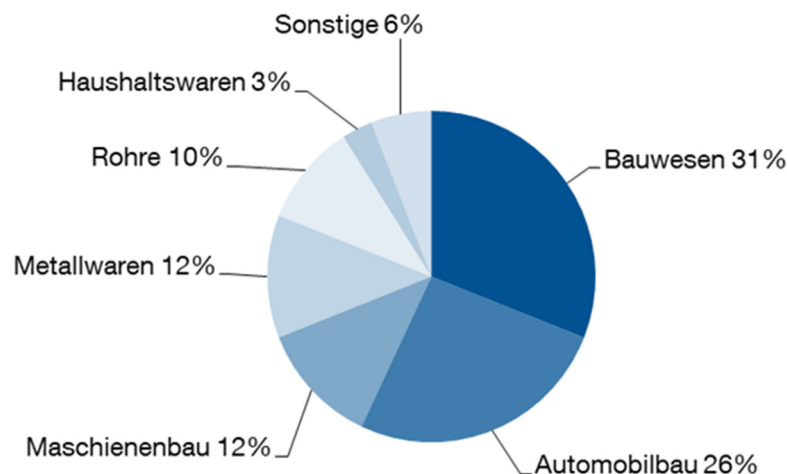


Abbildung 44: Verwendung von Stahl in Deutschland im Jahr 2015 (Eigene Darstellung nach Wirtschaftsvereinigung Stahl 2016, S. 7)

Die Verwendung in Stahlbeton- und reinen Stahlkonstruktionen zählen zu den häufigsten Anwendungsbereichen im Bauwesen (Abbildung 44). Insbesondere in Stahlkonstruktionen für Hochhäuser, im Industriebau, in Hallenkonstruktionen oder im Brückenbau, kommt Stahl zum Einsatz (Helmus und Randel 2014, S. 1).

3.2.1.3 Stahlrecycling

Durch seine Fähigkeiten zur vielfachen und verlustfreien Wiederverwertung ist Stahl mit großem Abstand der am häufigsten wiederverwertete Werkstoff. Stahl wird heute in mehr als 2.500 Sorten hergestellt und behält auch nach dem Recycling seine Qualitätsmerkmale (Jopp 2015, S. 21).

Fundierte Aussagen zu Sammelraten von Baustahl und Stahlbeton in Deutschland können nicht getroffen werden, da die Stoffströme nicht ausreichend detailliert quantifiziert sind (Helmus und Randel 2014, S. 4). Im Bericht *Stahlrecycling im Bauwesen* durch die Bergische Universität Wuppertal wurden in einer Literaturrecherche Sammelraten zwischen 97 % und 99 % und Wiederverwendungsraten von Stahlbauteilen zwischen 11 % und 14 % identifiziert. Die stoffliche Verwertung liegt demnach zwischen 83 % und 88 % (Helmus und Randel 2014, S. 4f).

Die Stahlschrottqualität ist entscheidend für die Qualität des Endprodukts. Daher wird der Recyclingprozess durch Sortier- und Prüfsysteme eng überwacht (Jopp 2015, S. 22). Der bei Gebäudeabbrüchen anfallende Stahl wird bereits auf der Baustelle separat erfasst. Verbundmaterialien (z. B. Stahlbeton) werden in den entsprechenden Anlagen gebrochen und per Magnetausscheider aussortiert. Der Stahl wird anschließend sortiert und zerkleinert, um wiederaufbereitet zu werden. Laut Statistischem Bundesamt sind 2014 in Deutschland insgesamt 7 Mio. t eisenhaltige metallische Abfälle aus dem Bauwesen angefallen (Destatis 2016b, S. 26).

3.2.2 Aluminium

Im Vergleich zu anderen Metallen ist die Geschichte des Aluminiums noch sehr jung (rund 200 Jahre). Aufgrund seiner physikalischen, chemischen und technischen Eigenschaften ist es zum wichtigsten NE-Metall aufgestiegen (Krone 2000, S. 2).

3.2.2.1 Aluminiumherstellung

Primäraluminium wird aus Bauxit gewonnen, das überwiegend in Australien, China und Brasilien abgebaut wird. Bauxit wird in Deutschland nicht gefördert. Allein 2014 importierte Deutschland 2,6 Mio. t Aluminium (WVM und GDB 2015, S. 5).

Weltweit wurden 2014 rund 61,1 Mio. t Aluminium produziert, mit steigender Tendenz (World Bureau of Metal Statistics et al. 2015, S.91). In Deutschland wurden im gleichen Zeitraum 3,1 Mio. t (38 kg/Einwohner) verwendet und 0,53 Mio. t Primäraluminium und 0,6 Mio. t Sekundäraluminium produziert (WVM und GDB 2015, S. 1, S. 7).

In Abhängigkeit zur verwendeten Technologie und Bauxitqualität wird in der Herstellung von Primäraluminium zwischen 230 MJ/kg und 350 MJ/kg an Energie benötigt - in der Sekundärproduktion hingegen lediglich 11 bis 17 MJ/kg (Sverdrup und Ragnarsdóttir 2014, S. 240). Daher benötigt die Primäraluminiumherstellung 20- bis 30-mal so viel Primärenergie wie die Herstellung von Sekundäraluminium.

Bei der Primäraluminiumherstellung entfallen rund 75 % der Primärenergie auf die Elektrolyse, 16 % auf die Tonerdenherstellung, 6 % auf den Bergbau und Überseetransport und 4 % auf den Gießereiprozess. Bei der Sekundärproduktion hingegen entfallen rund 46 % der Primärenergie auf den Einschmelzprozess, 19 % auf die Schlackenaufarbeitung, 18 % auf die Aufbereitung, 11% auf Raffinationsprozesse sowie 6 % auf Transporte, die nötig sind, den dezentral anfallenden Schrott einzusammeln (Krone 2000, S. 650ff).

3.2.2.2 Aluminium im Bestand

Laut globalen Modellen befinden sich heute rund 75 % des bisher produzierten Aluminiums noch in Gebrauch (Bertram et al. 2009, S. 651). In Bauwesen wird Aluminium vorwiegend als Legierung verwendet. Je nach Werkstoff enthalten die Legierungen unter anderem Magnesium, Kupfer, Silizium, Mangan, die einen Anteil von etwa 2 bis 2,5 % haben (Hegger et al. 2005, S. 81).

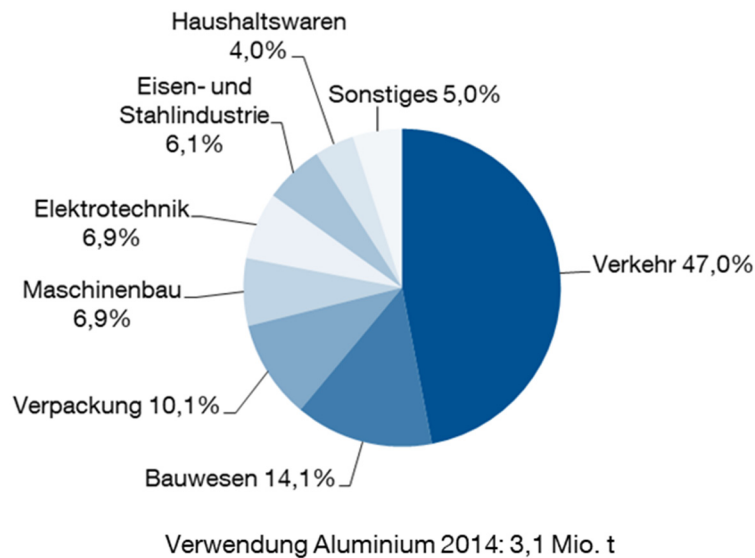


Abbildung 45: Verwendung von Aluminium in Deutschland nach Hauptverwendungsgebieten im Jahr 2014 (Eigene Darstellung nach WVM 2015, S. 7)

Der Großteil des in Deutschland verwendeten Aluminiums wird im Verkehrssektor (47 %) und der Bauindustrie (14,1 %) verwendet (Abbildung 45) (WVM und GDB 2015, S. 7). Da Aluminium auch in der Stahlherstellung eingesetzt wird (31 % des produzierten Stahls wird in Bauwesen verwendet), erhöht sich der Anteil von Aluminium im Bauwesen auf 16 %, was rund 0,5 Mio. t (6,1 kg/Person) entspricht.

3.2.2.3 Aluminiumrecycling

Gegen Ende des Ersten Weltkrieges begann in Deutschland die Produktion von Sekundäraluminium (Recyclingaluminium), die industrielle Produktion hingegen erst Anfang der 30er Jahre, da erstmals die notwendigen Mengen an Schrott bereitgestellt werden konnten, die eine industrielle Wiedergewinnung rentabel machten (Krone 2000, S. 6).

Neben Neuschrotten (z. B. Produktionsabfällen), existieren auch Altschrotte (z. B. Produkte). Schrottanalysen haben gezeigt, dass bei Altschrotten ein breites Spektrum an Legierungen und Qualitäten vorliegt (Tabelle 5) (Krone 2000, S. 46). Neben Legierungsmetallen (z. B. Eisen, Kupfer, Zink usw.) sind bis zu 14 % Silizium in den Altschrotten enthalten. Daher sind unterschiedliche Aufbereitungsschritte nötig, um qualitativ hochwertiges Sekundäraluminium herzustellen (Krone 2000, S. 46).

Bei der Aufbereitung fallen neben unkritischen Rückstandstoffen (Stäube und Krätzen) auch kritische Stoffe wie Salzschlacken, Filterstäube und Ofenausbrüche an. Während Salzschlacken und Krätzen wieder in den Sekundäraluminiumkreislauf integriert und aufbereitet werden, finden Oxidrückstände der Salzschlackenaufbereitung in der Zementindustrie Verwendung (Krone 2000, S. 620).

Tabelle 5: Verunreinigungsspektrum von Aluminium-Altschrotten (Krone 2000, S. 46)

Verunreinigung	Gehalte (m %)	
	von	bis
Chrom	0,01%	1,5%
Eisen	0,17%	2,4%
Kupfer	0,01%	4,0%
Magnesium	0,01%	4,0%
Mangan	0,01%	1,0%
Silizium	0,15%	14,0%
Titan	0,01%	0,1%
Zink	0,01%	3,3%

Laut Krone besteht die Konsistenz der Salzschlacke neben Salzen (NaCl), die rund 50 % ausmachen, auch aus ca. 4 % - 10 % Aluminium. Die ökologische Problematik besteht in ihrer Wasserlöslichkeit. Schlacken können jedoch mit unterschiedlichen Verfahren (z. B. Löse-Kristallisations-Verfahren) wiederaufbereitet werden, um das enthaltene Aluminium wiederzugewinnen. Die Oxidrückstände und Filterstäube enthalten neben Aluminium auch andere Legierungsbestandteile (z. B. Cl, Ca, Na, Fe, Si, Mg, Pb usw.) in geringen Konzentrationen (Krone 2000, S. 622).

Laut Statistischem Bundesamt sind 2014 in Deutschland insgesamt 0,3 Mio. t Aluminium aus Bauabfällen angefallen. Zudem wurden weitere 0,06 Mio. t importiert (Destatis 2016b, S. 26).

3.2.3 Zink

Bereits die Römer nutzten Zink, um Münzen herzustellen. Marco Polo beschreibt im späten 13. Jahrhundert die Herstellung von Zinkoxid in Persien für medizinische Zwecke (Initiative Zink 2016, S. 1), (Hegger et al. 2005, S. 82).

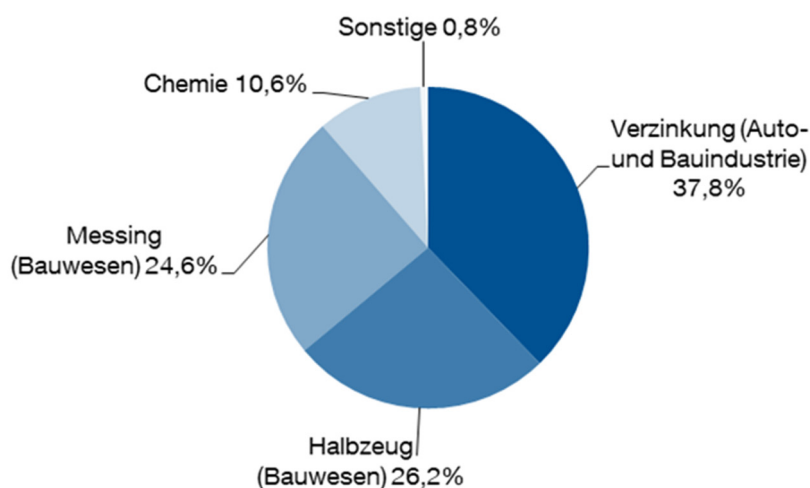
3.2.3.1 Zinkherstellung

Zinkvorkommen sind über die ganze Welt verteilt. Dabei bewegt sich der Zinkgehalt der Erze zwischen 4 und 20 %. Der durchschnittliche Zinkgehalt ist jedoch rückläufig und beträgt momentan rund 5,5 % (Bardi und Leipprand 2013, S. 184). 2014 wurden weltweit 13,3 Mio. t Zink produziert. Mit rund 36 % Anteil gehört China zu den größten Förderländern, gefolgt von Australien (12 %) und Peru (10 %). Mit fast 63 Mio. t hält Australien die noch größten geschätzten Reserven bereit (Geological Survey 2016, S. 193).

In Deutschland wurden im gleichen Zeitraum 0,64 Mio. t des Materials verwendet, was 4,7 % der Weltjahresproduktion entspricht (WVM und GDB 2015, S. 8). Schätzungen zufolge wird das Fördermaximum von Zink 2030 erreicht werden (Sverdrup und Ragnarsdóttir 2014, S. 248).

3.2.3.2 Zink im Bestand

Im Bauwesen wird Zink zum großen Teil zum Verzinken von Blechen und Metallteilen verwendet (Korrosionsschutz), als Halbzeug (z. B. Bleche, Rohre, Nägel), und um Zinklegierungen (z. B. Messing, Bronze, Titanzink) und chemische Erzeugnisse (z. B. Legierungspulver zum Löten) herzustellen (WVM und GDB 2015, S. 8).



Verwendung Zink 2014: 0,6 Mio. t

Abbildung 46: Verwendung von Zink in Deutschland nach Hauptverwendungsgebieten im Jahr 2014 (Eigene Darstellung nach WVM und GDB 2015, S. 8)

Aus den vorhandenen Statistiken können keine genauen Rückschlüsse gezogen werden, wieviel Zink insgesamt im Bauwesen verwendet wird. Rund 26 % werden als Halbzeug und 25 % für Messingerzeugnisse direkt verwendet (Abbildung 46). Etwa die Hälfte der Verzinkung (19 %) wird dem Bauwesen zugeschrieben (Initiative Zink 2018, S. 1). Der Zinkanteil für chemische Erzeugnisse, die im Bauwesen verwendet werden, ist hingegen unbekannt. Damit beträgt der Zinkbedarf im Bauwesen im Jahr 2014 zwischen 70 bis 75 % des Gesamtaufkommens, was rund 0,5 Mio. t. (6 kg/Einwohner) entspricht.

3.2.3.3 Zinkrecycling

Laut Statistischem Bundesamt sind 2014 in Deutschland insgesamt 36.100 t Zink aus Bauabfällen angefallen (Destatis 2016b, S. 26). Laut Bardi und Leipprand sieht sich die Wiederverwendung von Zink mit ähnlichen Herausforderungen konfrontiert, wie das beim Recycling der meisten Metalle gegeben ist. Die Stoffe werden häufig nicht in ihrer metallischen Grundform, sondern in Form von Legierungen verwendet, und liegen oftmals nur gelöst oder in sehr feiner Verteilung vor (z. B. Farbpigmente oder Zuschlagstoff in Glas oder Plastik). Zink wird bei hohen Temperaturen leicht flüchtig; ein großer Teil davon geht bei der Verarbeitung in Schmelzöfen verloren (Bardi und

Leipprand 2013, S. 185). Durch diese Eigenschaft ist ein Auftreten von Recyclingverlusten unvermeidbar.

3.2.4 Kupfer

In der makroökonomischen Theorie gilt der Kupferpreis als Konjunkturindikator (Aschoff 2006, S. 528). Laut Lichtensteiger gilt Kupfer als wichtigstes Spurenelement in Bauwerken. Durch die unterschiedlichen Einsatzbereiche ist es ein guter Indikator für das gesamte Bauwesen (Lichtensteiger 2006, S. 49).

Anfang 2016 befand sich der Kupferpreis „im Keller“ und der starke US-Dollar bremste die Nachfrage. In China hingegen entstand zunehmender Bedarf, insbesondere durch den massiven Ausbau des Stromnetzes (Investitionen von umgerechnet 60 Mrd. € in 2015). Prognosen von Analysten rechnen, dass aus dem Überschuss ein Mangel entstehen könnte (Otzen 2015, S. 14).

Es wurden bereits Stoffstromanalysen von Kupfer erstellt. Eine Aufstellung der Studien wird in der Literatur in *Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender* aufgeführt (Lichtensteiger 2006, S. 28). Durch Baccini und Bader wurden beispielsweise die zukünftigen Kupferstoffströme für die Schweiz berechnet (Baccini und Bader 1996). Für Deutschland ist die Studie vom Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung zu nennen (Erdmann et al. 2004).

3.2.4.1 Kupferherstellung

Kupfererz wird in Deutschland nicht gefördert. Lagerstättenuntersuchungen aus Zeiten vor 1990 prognostizierten in der Lausitz Vorkommen von mindestens 2 Mio. t Kupfer. Auch mindestens 90.000 t Blei, 36.000 t Zink zusammen mit anderen Metallen und Seltenen Erden werden dort vermutet (Seidler 2012, S. 59).

2014 wurden weltweit 21,1 Mio. t Kupfer produziert (IWCC 2017, S. 1). Der Anteil von Sekundärkupfer an der Produktion beträgt weltweit rund 33 % (in Deutschland 42 %). In Deutschland wurden im gleichen Zeitraum 1,47 Mio. t Kupfer verwendet, was rund 7 % der Weltjahresproduktion entspricht (WVM und GDB 2015, S. 7).

Chile stellt die größte Menge an gefördertem Kupfer zur Verfügung und hält weltweit die größten noch vorhandenen Reserven (Geological Survey 2016, S. 55). China ist weltweit größter Kupferproduzent und Verbraucher und hat daher einen großen Einfluss auf die Entwicklung des Kupferpreises. Allein China hatte 2014 einen Verbrauch von 9,3 Mio. t, mit steigender Tendenz (IWCC 2017, S. 1).

Berechnungen zufolge wird 2050 das Fördermaximum für die Primärproduktion von Kupfer erreicht sein (Sverdrup und Ragnarsdóttir 2014, S. 243). Die Förderung von Kupfer übersteigt die Entdeckungsrate neuer Vorkommen.

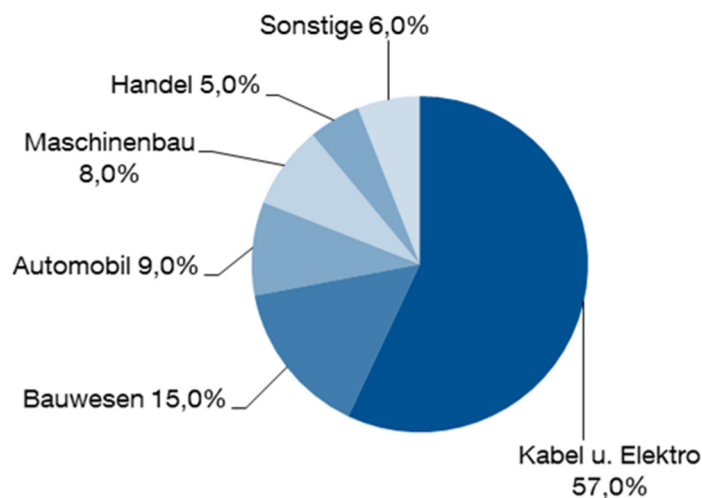
Die Förderung von kupferhaltigen Erzen hat in den letzten Jahren zugenommen, doch die Kupfergehalte in den Erzen sind rückläufig, was eine Verteuerung des Abbaus zu Folge hat (Bardi und Leipprand 2013, S. 134). Pro Metalleinheit müssen größere Mengen an Erzen verarbeitet werden. Lagen 1880 die Erzgehalte im Kupferbergbau in Australien noch bei 15 bis 25 %, liegen sie heute bei nur rund 0,86 %. Weniger als 10 % der Welt-Kupferreserven besitzen einen Erzgehalt von mehr als 1,5 %. Der

Mittelwert über alle derzeit geförderten Vorkommen beträgt derzeit etwa 0,6 % (Bardi und Leipprand 2013, S. 136ff).

Um eine Tonne Kupfer zu gewinnen, müssen große Mengen an Abraum bewegt werden. Zusätzlich stellt der Flächenbedarf der Minen eine weitere Herausforderung dar. Die derzeit größte in Betrieb befindliche Tagebauminer für Kupferförderung (Bingham Canyon Mine in Utah, USA) ist 1,2 km Tief und hat einen Durchmesser von 4 km (Fläche von 7,7 km²) (Bardi und Leipprand 2013, S. 21). In Chile müssen 24 Gigajoule Energie eingesetzt werden, um eine Tonne Primärkupfer bereitzustellen. In den USA hingegen beträgt die Energieintensität 112 Gigajoule pro Tonne Primärkupfer (Bardi und Leipprand 2013, S. 139).

3.2.4.2 Kupfer im Bestand

Im Bausektor findet Kupfer vielseitigen Einsatz, besonders als Energie- und Wärmeleiter (Kabel, Rohre, Haustechnik), Fassaden, Dachbedeckung und Dachrinnen. 15 % des Kupfers werden direkt im Bauwesen eingesetzt. Aufgrund der statistischen Erfassung lässt sich nicht genau feststellen, wie viel Kupfer in Form von Kabeln und Elektronik im Bauwesen tatsächlich verwendet wird, da Kabel auch in anderen Wirtschaftssektoren (z. B. Automobilindustrie) zum Einsatz kommen. Ohne Kabel und Elektronik entfielen auf den Bausektor in Deutschland (2014) rund 0,23 Mio. t (3 kg/Person) (Abbildung 47).



Verwendung Kupfer 2014: 1,5 Mio. t

Abbildung 47: Verwendung von Kupfer in Deutschland nach Hauptverwendungsgebieten im Jahr 2014 (Eigene Darstellung nach WVM und GDB 2015, S. 7)

3.2.4.3 Kupferrecycling

Laut Statistischem Bundesamt sind 2014 in Deutschland insgesamt 108.700 t Kupfer (incl. Bronze und Messing) aus Bauabfällen angefallen (Destatis 2016b, S. 26). Beim Kupferrecycling wird ein verhältnismäßig hoher Anteil an Kuppelprodukten in Form von Metallen (z. B. Zink, Zinn und Blei) freigesetzt. Die gezielte Abtrennung dieser

Elemente führt zu einer Wirtschaftlichkeitssteigerung des Recyclingprozesses sowie einer Einsparung an Deponiekosten (Steinacker et al. 2016, S. 499).

Kupferhaltige Reststoffe werden in ihrer Zusammensetzung immer komplexer. Daher stehen auch Schlacken und Stäube aus der metallurgischen Industrie immer mehr im Fokus für ein zukünftiges Recycling. Derzeit werden nichtrückgewinnungswürdige Schlacken unter Einhaltung der zulässigen Grenzwerte im Straßenbau und der Zementindustrie verwendet (Steinacker et al. 2016, S. 510).

3.2.5 Blei

Durch seine Korrosionsbeständigkeit und Formbarkeit eignet sich Blei für Dachdeckungen, Fassaden und Anschlüsse. Aufgrund der toxischen Wirkungen sollte auf eine Anwendung jedoch weitgehend verzichtet werden (Hegger et al. 2005, S. 82)

2014 wurden weltweit 15,9 Mio. t Blei produziert (ILZSG 2017, S. 1). China ist mit großem Abstand das Land mit der höchsten Fördermenge (Geological Survey 2016, S. 97). In Deutschland wurden 2014 rund 0,35 Mio. t Blei verwendet, was rund 2,2 % der Weltjahresproduktion entspricht. Der Großteil wird in der Automobilindustrie verwendet (Abbildung 48) (WVM und GDB 2015, S. 9).

Im Bauwesen wird Blei heute überwiegend in Form von Reinblei, in Form von Folien und Blechen und als Oxid für Pigmente, Sikkative und Stabilisatoren eingesetzt. Die Verwendung für Trinkwasserrohre ist mittlerweile verboten (WECOBIS 2014, S. 1). Ebenfalls findet Blei Verwendung in Kabeln, Halbzeugen (z. B. Bleche, Rohre) sowie als Zusatz in der Glasindustrie und in chemischen Erzeugnissen (WVM und GDB 2015, S. 9), (Erdmann et al. 2004, S. 51), (Scholz et al. 2011, S. 540f).

Aus den Statistiken lässt sich keine genaue Aussage treffen, wie viel Blei insgesamt im Bauwesen verwendet wird. Nach Schätzungen des Instituts für Zukunftsstudien (IZT), die auf 2004 basieren, verbleiben im Deutschen Bauwesen jährlich zwischen 30.000

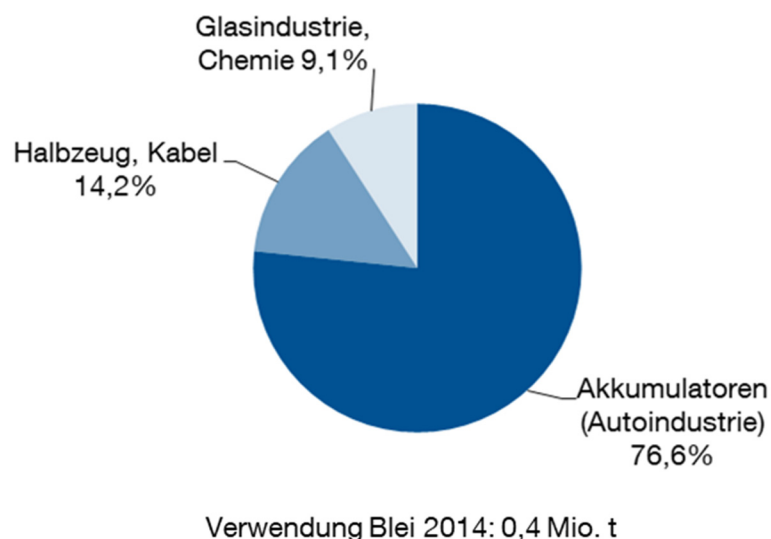


Abbildung 48: Verwendung von Blei in Deutschland nach Hauptverwendungsgebieten im Jahr 2014 (Eigene Darstellung nach WVM 2015, S. 9)

bis 50.000 t Blei (0,4-0,6 kg/Person/a) (Erdmann et al. 2004, S. 51). Der Gesamtverband der Deutschen Buntmetallindustrie (GDB) geht von 25.000 t allein für Dächer und Fassaden in 2016 aus (WVM und GDB 2017, S. 8).

Laut Statistischem Bundesamt sind 2014 in Deutschland insgesamt 18.200 t Blei aus Bauabfällen angefallen (Destatis 2016b, S. 26). Der Bleianteil am als gefährlich eingestuftem Abfall anderer Fraktionen kann aus den Statistiken hingegen nicht ermittelt werden.

In Bestandsgebäuden sind bleihaltige Stoffe weiterhin anzutreffen. Leitungen, Verkleidungen, Dachabdeckungen, Anschlüsse, Farben und Beschichtungen können Blei enthalten. Blei besitzt eine toxische Wirkung, kann sich in der Umwelt anreichern und stellt für Lebewesen ein Gesundheitsrisiko dar (WECOBIS 2014, S. 1). Durch die Verwendung von bleihaltigen Farben und Anstrichen können auch mineralische Fraktionen verunreinigt sein und müssen als gefährlich eingestuftem Abfall entsorgt werden. Es ist davon auszugehen, dass bleihaltige Fraktionen, die durch Sanierung und den Abriss von Gebäuden anfallen, auch in den nächsten Jahrzehnten noch Relevanz haben werden.

3.2.6 Resümee metallurgischer Stoffströme

Metalle sind für das Bauwesen unabdingbar. Rund 30 % der in Deutschland verwendeten Massenmetalle kommt im Bauwesen zum Einsatz. Die ermittelten metallurgischen Stoffströme sind in Abbildung 49 zusammengefasst. Bezogen auf die

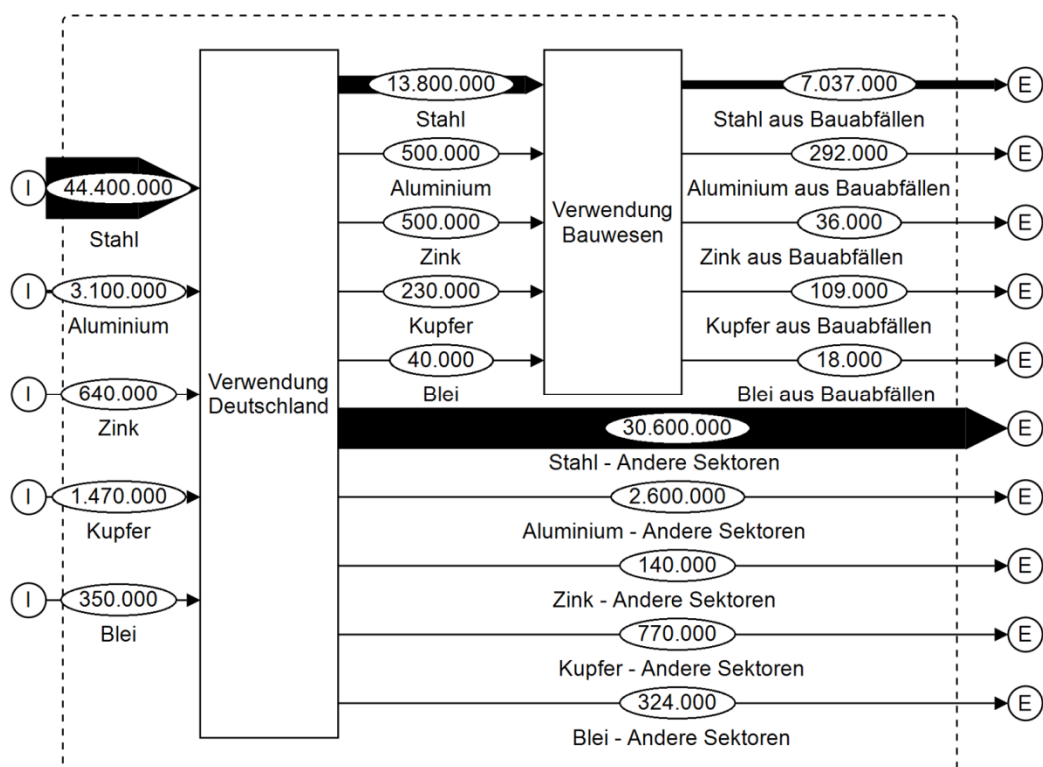


Abbildung 49: Zusammenfassung der Auswertung metallischer Stoffströme im Bauwesen (in Tonnen/Jahr)

Einwohner werden im deutschen Bauwesen rund 187 kg/Einwohner/a verwendet. In Form von Bauabfällen fallen jährlich 93 kg/Einwohner an. Daher können maximal 51 % des Bedarfs aus Abfällen gedeckt werden. Da Kreislaufverluste nicht auszuschließen sind, liegt das theoretische Potential niedriger.

Tabelle 6: Jährliches Lagerwachstum von Metallen im Bauwerksbestand in Deutschland 2015

Metalle	Masse (1.000 t/Jahr)	kg/EW	Anteil
Stahl	6.800	84,3	89%
Aluminium	200	2,5	2,6%
Zink	464	5,8	6,1%
Kupfer	121	1,5	1,6%
Blei	22	0,3	0,3%
Gesamt	7.607	94,4	100%

EW - Einwohner

Anhand der Auswertung der Stoffströme kann das jährliche Lagerwachstum (Input-Output) des Bauwerksbestands bestimmt werden (Tabelle 6). Das Wachstum betrug insgesamt 7,6 Mio. t (94 kg/Person) Metalle im Bezugsjahr. Der Anteil an Stahl beträgt 89 %, gefolgt von Zink (6,1 %), Aluminium (2,6 %) und Kupfer (1,6 %). Demnach werden, analog zu den mineralischen Baustoffen, immer mehr Metalle im Deutschen Bauwerksbestand gebunden.

3.3 Organische Baustoffe am Beispiel Holz

Die Stoffströme der Forst- und Holzwirtschaft in Deutschland wurden unter anderem vom Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), dem IFEU und der Universität Hamburg untersucht (Weimar 2011), (Weimar 2014), (Gärtner et al. 2013), (Mantau et al. 2011). In einer Marktstudie im Rahmen der *Charta Holz* wurde die Verwendung von Holz im Bauwesen untersucht (Weimar und Jochem 2013).

Insgesamt wurden im Hochbau im Jahr 2012 rund 13,4 Mio. m³ Holz verwendet. Durch den anfallenden Verschnitt wird von 16,6 Mio. m³ ausgegangen (Verschnitt: 19 %), wobei Nadelholz den höchsten Anteil am Gesamtverbrauch hat (Mantau et al. 2013, S. 6f). Abbildung 50 zeigt eine Übersicht der verwendeten Holzhalbwaren in m³.

In der Untersuchung von Mantau wird nach Wohn- und Nichtwohnbau, sowie nach Gewerk unterschieden. Der höchste Holzanteil in Gebäuden ist dabei auf, geneigte Dächer, Wärmedämmung (z. B. Holzfaserdämmung), den Außenbereich und auf Fußböden zurückzuführen - rund 80 % des verwendeten Holzes wird im Wohnungsbau eingesetzt (NWG: 20 %). Des Weiteren wird in der Studie nach Holzarten unterschieden. Zudem wird der Anteil des Verschnitts ausgewiesen, der je nach Gewerk bei zwischen 15 % und 30 % liegt (Mantau et al. 2013, S. 13f, S. 20).

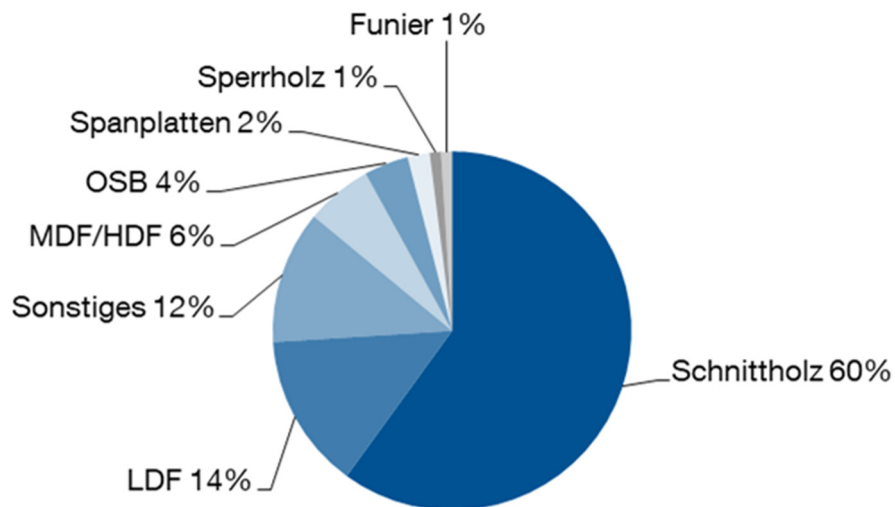


Abbildung 50: Verwendung von Holzhalbwerten im Hochbau (in m³) (Eigene Darstellung nach Mantau et al. 2013, S. 8)

Die regionalen Aspekte werden durch Kaiser und Mantau beschrieben. Hierbei hat sich gezeigt, dass Bayern, gefolgt von Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen die höchste Anzahl an Holzgebäuden hat, sowohl bei Wohn- als auch Nichtwohngebäuden. Anteilig werden im Saarland die meisten Wohngebäude in Holzbauweise erstellt (33 %) (Kaiser und Mantau 2013, S. 74).

Durch die Vorkommen von Holzrohstoffen ist die Holzbauquote im Süden Deutschlands höher als im Norden. Des Weiteren steigt die Holzbauquote je ländlicher die Räume werden (Kaiser und Mantau 2013, S. 91).

Laut Statistischem Bundesamt sind 2014 rund 3,1 Mio. t Holz (EAV 170201) aus Bauabfällen angefallen (Destatis 2016b, S. 26). Der Umgang mit Altholz wird durch die Altholzverordnung (AltholzV) und das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) geregelt (Höglmeier 2015, S. 4). Grundsätzlich kann Altholz stofflich oder thermisch verwertet werden - durch die langsame Zersetzbarkeit ist eine Kompostierung nur bedingt geeignet. Bei der stofflichen Verwertung stellen Spanplattenwerke die Hauptabnehmer (Piehl und Süselbeck 2011, S. 572).

Die Altholzentsorgung und Vertriebsstruktur am Standort Deutschland wurde durch die Universität Hamburg untersucht. Hier hat sich gezeigt, dass fast 79 % des Altholzvolumens energetisch verwertet werden und rund 20 % zur Herstellung von Spanplatten dienen. Des Weiteren sind, was die Verwertungswege angeht, regionale Unterschiede zu verzeichnen und es ist ein zunehmender Wettbewerb zwischen stofflicher und energetischer Verwertung zu erkennen (Mantau et al. 2011, S. 15, S. 22). Bezüglich der Verwertungswege kommen Kurth et al. zu einem ähnlichen Ergebnis. (Kurth et al. 2018, S. 411).

An der Technischen Universität München wurde die Kaskadennutzung von Holz in Bayern durch Höglmeier et. al untersucht. Hierbei wurde der Holzanteil in Gebäudebestand nach Baualtersklasse und Holzqualität ermittelt. Ein Ergebnis war,

dass 56 % des Holzes aus Abbruchmaßnahmen unter die Abfallkategorie A III und A IV fallen, d.h. dass eine stoffliche Verwertung nicht zulässig ist und das Holz thermisch verwertet werden muss. Für eine stoffliche Verwertung sind hingegen 43 % des Holzes geeignet (Kategorien A I und A II) (Höglmeier 2015, S. 247), (Höglmeier et al. 2017, S. 311).

Für die Verteilung nach Abfallkategorien in der Entsorgungspraxis werden von Kurth et al. unterschiedliche Werte angegeben, die in Tabelle 7 aufgeführt sind (Kurth et al. 2018, S. 409). Bei einem Vergleich wird ersichtlich, dass das Potential einer stofflichen Verwertung von Holz - im Gegensatz zur thermischen - noch nicht ausgeschöpft ist.

Tabelle 7: Vergleich der Entsorgungspraxis und des Entsorgungspotentials von Altholz

Kategorie	Verwertungsweg	Derzeitige Entsorgungspraxis ¹	Potential Gebäudebestand ²
A I	Stofflich	10-20%	43%
A II	Stofflich	65-67%	
A III	Thermisch	2%	57%
A IV	Thermisch	10-15%	

¹ (nach Kurth et al. 2018, S. 409)

² (nach Höglmeier et al. 2017, S. 311)

In einer gesamtökologischen Bewertung der Kaskadennutzung von Holz durch das IFEU, kommen die Autoren zu dem Schluss, dass der Baubereich die größten Substitutionspotentiale bietet, konventionelle Materialien mit hohen Umweltlasten durch Holz zu ersetzen. Die Studie verdeutlicht auch, dass die stoffliche Holznutzung mit anschließender energetischer Verwertung in den meisten Fällen Vorteile gegenüber einer direkten thermischen Verwertung bietet. Als Nutzungsempfehlung für das Bauwesen wird vorgeschlagen, im Hausbau verstärkt Holz einzusetzen, insbesondere bei tragenden Konstruktionen (Gärtner et al. 2013, S. 68, S. 78ff).

3.4 Zusammenfassung

Für alle betrachteten Stoffe wurde ein Wachstum des durch unseren Gebäudebestand repräsentierten Stofflagers (Lager Baubestand) verzeichnet (Tabelle 8). Mehr Stoffe werden für Bauwerke verwendet, als durch Abgänge anfallen (Input > Output). Dies ist insbesondere bei mineralischen Baustoffen ausgeprägter als bei Metallen (Ausnahme Zink). Dies liegt unter anderem an den höheren Verwertungsraten und geringeren Sammelverlusten im Vergleich zu mineralischen Stoffen. Es ist daher unter momentanem Wirtschaften nicht möglich, auf nationaler Ebene eine ausgeglichene Massenbilanz (Input = Output) für das Bauwesen anzustreben, geschweige denn von einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft zu sprechen. Die Verwendung von Primärrohstoffen lässt sich daher weiterhin nicht vermeiden.

Rund 98 % der verwendeten Stoffe im Bauwesen sind mineralischen Ursprungs (2 % Metalle). Der Anteil des Bauwesens am nationalen Gesamtverbrauch der betrachteten

mineralischen Stoffe liegt bei rund 80 %, bei Metallen bei 11 - 31 % (mit Ausnahme von Zink [78 %]).

Neben den Stoffströmen und des Lagerwachstums wurde auch der maximale potentielle Selbstversorgungsgrad (SVG) des Bauwesens mit Sekundärrohstoffen ermittelt (ohne Berücksichtigung von Systemverlusten). Des SVG setzt sich wie folgt zusammen:

$$\text{Selbstversorgungsgrad (SVG)} = \text{Stoffverbrauch} / \text{Ausgangsstoffe (z. B. Abfall)}$$

Bei den mineralischen Stoffen weisen Ziegel und Ziegeltone (45 %) vor Beton (33 %) den höchsten potentiellen SVG auf. Bei den Metallen kann durchschnittlich maximal 50 % des Bedarfs aus anfallenden Baustoffen aus dem Bestand (z. B. Bauabfällen) gedeckt werden. Bei Aluminium ist ein SVG von maximal 60 % möglich.

Für eine zukünftige Stoffwirtschaft muss neben einer stofflichen Verwertung (z. B. materielles Recycling) ein möglichst hoher Anteil von Stoffrückflüssen aus dem Bestand direkt wiederverwendet werden (z. B. als Bauteile / Produkte). Des Weiteren muss die ständige Vergrößerung des Lagers weitgehend reduziert und das Abfallaufkommen reduziert werden (Kohler et al. 1999, S. 243f). Daten zur Wiederverwendung von Bauteilen werden hingegen statistisch nicht erhoben.

In diesem Kapitel wurden die Stoffströme des Bauwesens auf nationaler Ebene betrachtet, um eine Übersicht zu deren Verbleib und gegenseitige Abhängigkeit zu bekommen. Durch regionale Unterschiede in Bau- und Abbruchtätigkeiten, Rohstoffproduktion, Transportwegen, Emissionen, Wachstum, Abfallbeseitigung u. v. a. wird eine lokalere Betrachtungsweise der Stoffströme benötigt, um diesen Unterschieden gerecht zu werden.

Bei nationaler Betrachtung kann keine Aussage getroffen werden, an welchem Standort (geographisch) ein Stoff gebraucht bzw. aus dem Bestand freigesetzt wird und welche Logistik (z. B. Transporte, Aufbereitungsanlagen, Deponien), die einer ortsgebundenen Betrachtung unterliegt, benötigt wird. Als Beispiel: Abgebrochener Beton aus Norddeutschland wird nicht wieder in Süddeutschland verwendet, da die Transportwege (Betrachtung von Transportradien) zu weit sind und demnach weder ein wirtschaftlicher noch ein ökologischer Nutzen gegeben ist.

Durch eine regionale und urbane Betrachtungsweise können regionale Planungs- und Entwicklungskonzepte (z. B. Regionalplan, Flächennutzungsplan, Bebauungspläne, städtebauliche Entwicklungspläne, Altlasten u. a.) berücksichtigt werden. Hierbei können beispielsweise Konzepte entwickelt werden, welcher Anteil des Gebäudebestands für den Neubau genutzt werden kann (z. B. Selbstversorgungsgrad). Für diesen Zweck ist eine nationale Betrachtung nur eingeschränkt von Nutzen.

Table 8: Zusammenfassung von verwendeten Stoffen im Bauwesen

Stoff	Jahr	National				Bauwesen				Wachstum Mio. t/Jahr
		Verwendung		Verwendung t/EW	Anteil	Sekundärrohstoffe		SVG (%)		
		Mio. t/Jahr	t/EW			Mio. t/Jahr	t/EW			
Mineralische Stoffe	2013	572	7,1	503	6,2	88%	78,8	0,98	16%	424,48
Sand & Kies	2013	236	2,9	211	2,6	89%	*			
Spezialsande & Spezialkies	2013	9,7	0,1	3,5	0,0	36%	*			
Natursteine	2013	207	2,6	197,5	2,4	95%	*			
Kalkstein & Dolomitstein	2013	23,7	0,3	7,1	0,1	30%	*			
Gipsstein & Anhydritstein	2013	4,5	0,1	3,9	0,0	87%	0,6	0,01	15%	3,3
Ton & Kaolin	2013	13,3	0,2	2,8	0,0	21%	*			
Ziegelton	2013	11,3	0,1	11,3	0,1	100%	5,1	0,06	45%	6,2
Recyclingbaustoffe	2013	66,2	0,8	66,2	0,8	100%	*			
Mineralische Produkte										
Beton (inklusive Zementanteil)	2014	110	1,4	110	1,4	100%	36	0,45	33%	74
Zement	2014	27,3	0,3	27,3	0,3	100%	n. a.	n. a.		
Glas	2015	2,9	0,04	1,9	0,0	66%	0,27	0,003	14%	1,6
Metalle	2014/15	50	0,6	15,1	0,2	30%	7,5	0,1	50%	7,6
Stahl	2015	44,4	0,6	13,8	0,2	31%	7	0,087	51%	6,8
Aluminium	2015	3,1	0,04	0,5	0,006	16%	0,3	0,004	60%	0,2
Zink	2015	0,6	0,01	0,5	0,006	78%	0,04	0,0004	7%	0,5
Kupfer	2014	1,5	0,02	0,23	0,003	16%	0,109	0,001	47%	0,1
Blei	2014	0,4	0,004	0,04	0,0005	11%	0,018	0,0002	45%	0,02

*Fraktionen werden nicht statistisch erfasst

SVG - Selbstversorgungsgrad (ohne Berücksichtigung von Systemverlusten)

4 Einfluss der regionalen und urbanen Ebene bei der Erfassung und Steuerung von Stoffströmen

Im vorherigen Kapitel wurden die durch Bauprozesse ausgelösten Stoffströme des Wirtschaftsraums Deutschland analysiert. Daraus allein kann keine genaue Aussage gefolgert werden, an welchem Standort innerhalb Deutschlands Stoffströme in Gang gesetzt werden und wie sich diese bewegen, oder wo die jeweiligen Stoffe akkumuliert werden (Gebäudebestand). Dies bedarf einer näheren Analyse, innerhalb kleinerer Bezugsräume (z. B. urban, regional). Dadurch können beispielsweise strategische Aussagen zu regionalen Anlagenstandorten (z. B. Kieswerken, Deponien, Produktionsstandorten u. a.) gemacht und ein ortsnahes Stoffstrommanagement (z. B. Verwertungsstrategien) forciert werden. Dieses Kapitel untersucht daher die Erfassung und gezielte Beeinflussung von Stoffströmen im urbanen und regionalen Maßstab.

4.1 Erfassung von Stoffströmen bei der Rohstoffbeschaffung im räumlichen Bezug

In Deutschland werden derzeit 0,4 % der Fläche für den Rohstoffabbau genutzt (Destatis 2016c, S. 1). Es herrscht eine rege Konkurrenz um verbleibende Flächen, auf denen ein Rohstoffabbau möglich ist. Siedlungs- und Verkehrsflächen (SVF), landwirtschaftliche Flächen und Waldflächen stehen hierzu in Konkurrenz. Es wird zunehmend schwieriger, abbauwürdige Flächen zu erschließen und eine gesellschaftliche Akzeptanz zu schaffen (DIHK 2017, S. 4). Allein die Existenz von Rohstoffen in der Erde ist noch kein Garant, dass diese auch abgebaut werden können. Dies ist teilweise dadurch bedingt, dass bereits andere Nutzungsarten vorherrschen (z. B. Gebäude) oder in Flächennutzungsplänen ausgewiesen sind.

Ein Rohstoffabbau innerhalb urbaner Räume ist nicht oder nur eingeschränkt möglich. Daher ist der urbane Raum, insbesondere dicht besiedelte Städte, vom Hinterland (z. B. Region) abhängig.

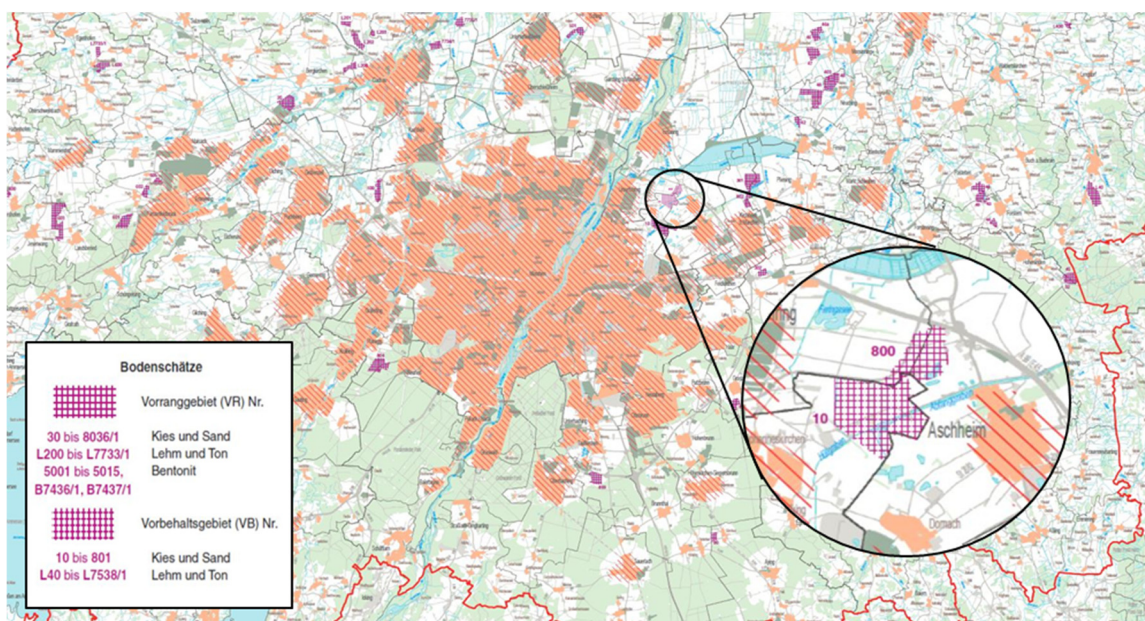


Abbildung 51: Kartenausschnitt des Regionalplans München (Regierung von Oberbayern 2013)

Für die Rohstoffsicherung grundeigener Bodenschätze existieren beispielsweise Regionalpläne der Landratsämter und Gemeinden. Die Raumordnung stellt verbindliche Vorgaben zur Entwicklung des jeweiligen Raumes. Regionalpläne enthalten unter anderem Vorrang- und Vorbehaltsgebiete zum Abbau von Bodenschätzen. Deutschland ist in 105 und Bayern in insgesamt 18 Planungsregionen unterteilt. Mit einer Fläche von 5.504 km² gehört die Region München (Planungsregion 14) zu den größten in Bayern (RPV 2012, S. 1). Ein Auszug ist in Abbildung 51 dargestellt.

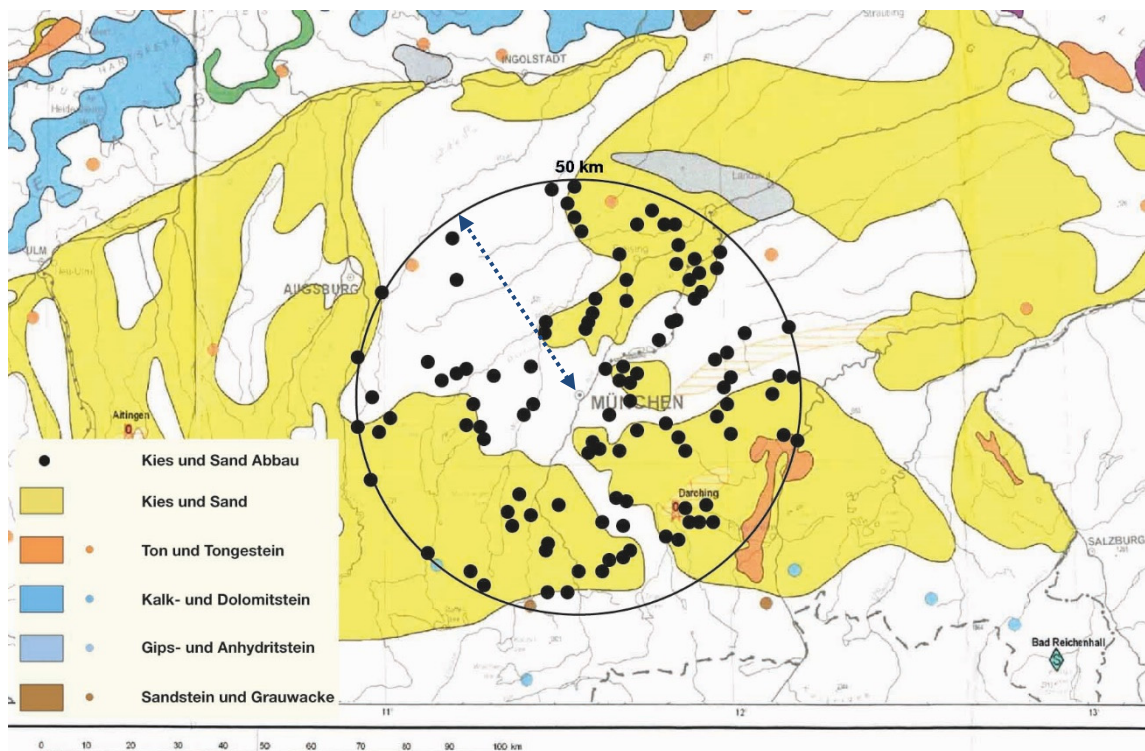


Abbildung 52: Rohstoffvorkommen der Region München (Modifizierte Darstellung nach Glück und Vinnemann 2007)

Allein die Ausweisung der Flächen bedeutet nicht, dass an diesen Stellen auch Bodenschätze abgebaut werden können. Abbildung 52 zeigt eine Karte der Bodenschätze um München, die mit den Anlagenstandorten (Kies und Sandabbau) überlagert wurden. Innerhalb eines Radius von 50 km sind um München insgesamt 110 Anlagen aufgeführt. Informationen zu den tatsächlich abbaubaren Mengen an regionalen Bodenschätzen und vorhandenen Anlagenkapazitäten der einzelnen Betreiber werden hingegen nicht statistisch erhoben.

Der Untergrund der Erde in Deutschland bedarf noch eingehender Untersuchungen nach Bodenschätzen. Es wird vermutet, dass noch einige Reserven (z. B. Kupferschiefer in der Lausitz) in der Tiefe vorhanden sind, die mit gegenwärtiger Technologie noch nicht auffindbar und abbaubar sind (Seidler 2012, S. 188). Technologische Entwicklungen schreiten jedoch rasch voran. Größer werdende Maschinen, mit höheren Durchsätzen, sind nur ein Beispiel dafür. Im Falle von knapper werdenden Rohstoffen, Preissteigerungen und Versorgungsengpässen steht

die Vermutung nahe, dass lukrative Vorkommen in Zukunft auch erschlossen werden könnten.

Wenn in der Region allerdings keine Flächen mehr für die Rohstoffgewinnung zur Verfügung stehen, muss zwangsläufig mit mehr Transporten oder mit Umsiedlung von Unternehmen gerechnet werden.

4.2 Erfassung von Stoffströmen in der Herstellung und Produktion im räumlichen Bezug

Viele Rohstoffe werden nicht direkt im Bauwesen eingesetzt. Oft bedarf es zusätzlicher Aufbereitungs- und Produktionsschritte, damit Produkte für die Bauwerksherstellung bereitgestellt werden können. Daher spielen Produktionskapazitäten und -standorte im Lebenszyklus von Bauwerken eine entscheidende Rolle. Diese werden im folgenden Abschnitt beispielhaft anhand von Beton und Stahl, die jeweils in unterschiedlich großen Bezugsräumen gehandelt werden, aufgezeigt.

4.2.1 Produktionsstandorte von Beton

Neben Kies und Wasser - beides regional bereitgestellt - werden auch Zement und Zuschlagsstoffe in der Betonproduktion benötigt, die oft nicht lokal produziert werden.

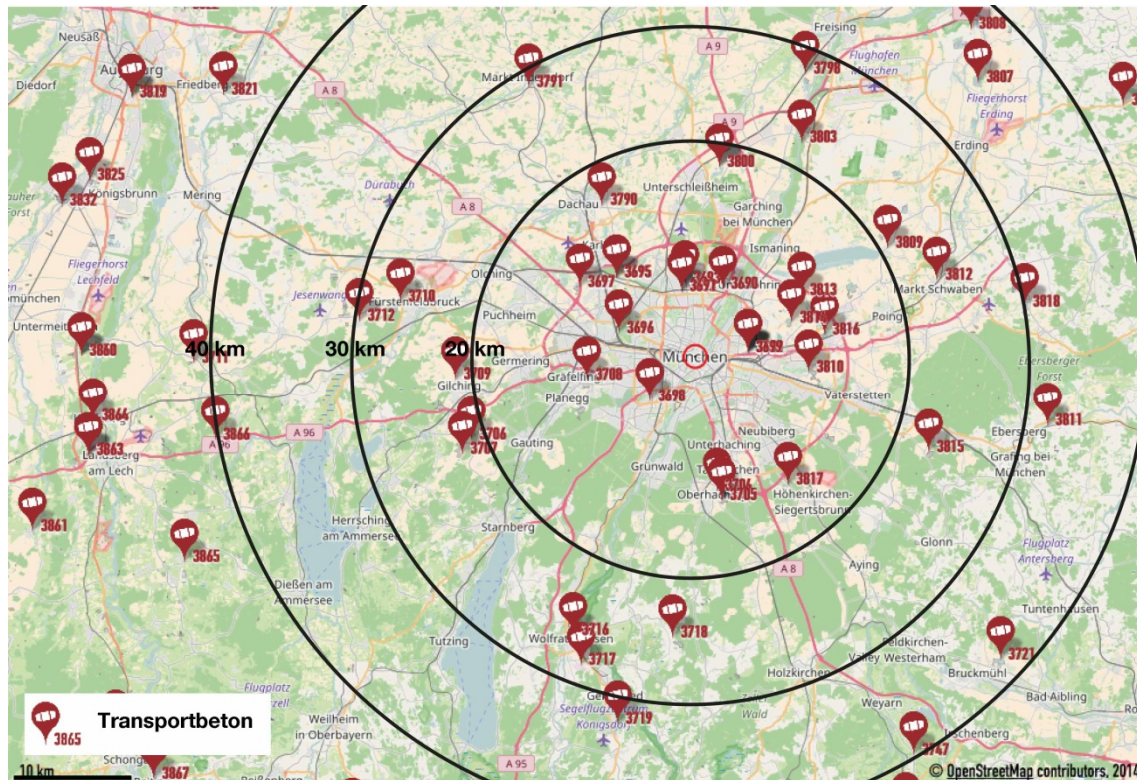


Abbildung 53: Standorte der Transportbetonhersteller in der Region München (In Anlehnung an Baustoffe Standorte Online 2014)

Abbildung 53 zeigt die Anzahl der Transportbetonproduzenten im Umkreis von München. Innerhalb eines Radius von 20 km sind insgesamt 16 Transportbetonhersteller angesiedelt. Innerhalb eines Radius von 30 km sind es 30 Unternehmen.

Durch technisch und wirtschaftlich bedingte Vorgaben wird der maximale Transportradius von Frischbeton weitgehend festgelegt. Frischbeton sollte 90 Minuten nach der ersten Wasserzugabe zum Zement vollständig entladen sein (DIN EN 1045-2, S. 37). Durch die Zugabe von Verzögerungsmitteln kann die Zeit der Verarbeitbarkeit verlängert werden und Transportradien erhöht werden. Mit zunehmender Entfernung zum Einsatzort steigen auch die Transportkosten, was lokal gehandeltem Beton aus wirtschaftlichen Gründen den Vorzug gibt. Laut Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie (BTB) ist die durchschnittliche Entfernung zur Baustelle in den letzten Jahren auf 17,1 km (durchschnittlichen 4,5 Touren pro Tag) leicht angestiegen (BTB 2016, S. 27).

Zu den Produktionskapazitäten und umgesetzten Mengen an Beton in der Region kann anhand der derzeitigen Datenlage keine Aussage getroffen werden. Durch eine zukünftige statistische Erfassung der Stoffströme der einzelnen Betriebe (Rohstoffbuchhaltung) kann dies bewerkstelligt werden.

4.2.2 Produktionsstandorte von Stahl

Ein Beispiel für einen überregional (international) gehandelten Stoff ist Stahl. Die Stahlherstellung in Deutschland ist, wie bereits vorher gezeigt, rückläufig (Kapitel 3). Eisenerze werden in Deutschland nicht mehr abgebaut und die Industrie ist zunehmend auf Importe und Schrott angewiesen. Einige traditionelle Unternehmen sind weiterhin in der Nähe von Brennstofflagern (z. B. Kohlebergwerken) oder ehemaligen Erzabbaugebieten angesiedelt (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2017, S. 5).

In Deutschland liegen Standorte der größten Stahlerzeuger strategisch platziert in der Nähe von Häfen (z. B. Bremen, Hamburg), im Ruhrgebiet, entlang des Rheins, der Oder (z. B. Eisenhüttenstadt) sowie im Raum Salzgitter (große Eisenerzvorkommen). Allein im Bundesland Nordrhein-Westfalen werden ca. 40 % des in Deutschland produzierten Stahls hergestellt (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2017, S. 3).

Abbildung 54 zeigt eine Verteilung der in Deutschland angesiedelten Stahlproduzenten. Es ist mit einem Rückgang zu rechnen, da Stahl derzeit - bedingt durch die Situation auf dem Weltmarkt - günstiger zu beziehen ist, als aus heimischer Produktion. Derzeit ist ein weltweiter Überschuss an Stahl zu verzeichnen (Europäische Kommission 2018, S. 1). Die weltweite Überkapazität in der Stahlherstellung erzeugt in Deutschland und Europa einen zunehmenden Wettbewerbsdruck und verursacht negative Auswirkungen auf die erzielbaren Preise (BMWi 2016, S. 1).

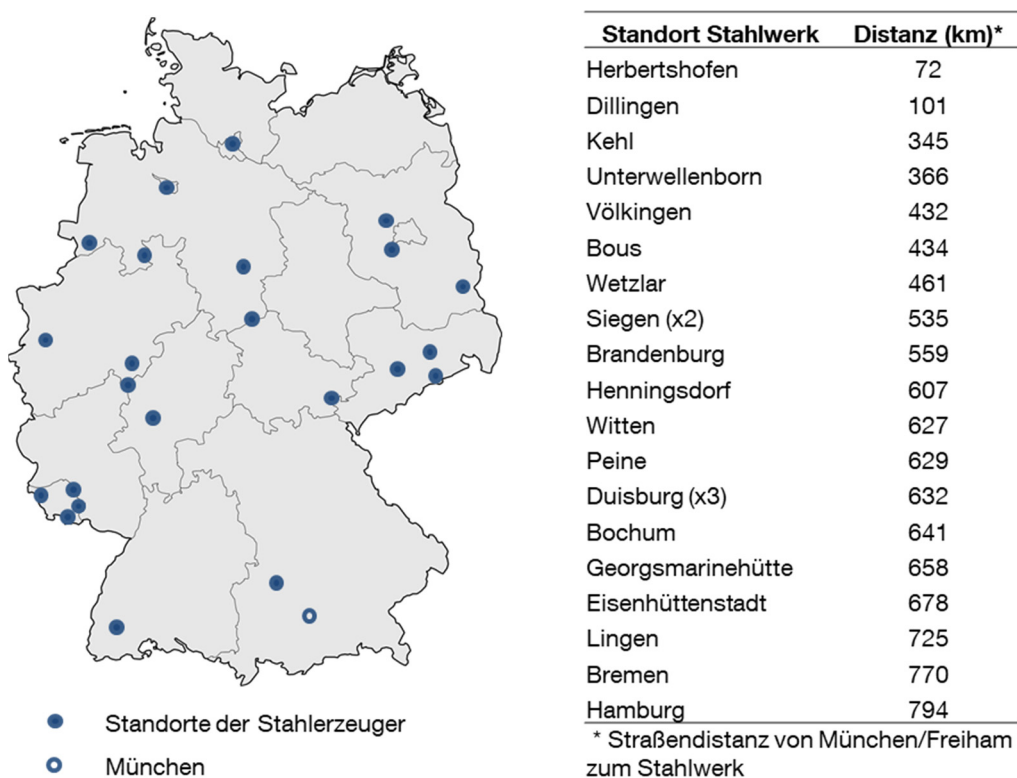


Abbildung 54: Standorte der Stahlhersteller in Deutschland (Eigene Darstellung nach Wirtschaftsvereinigung Stahl 2016, S. 3)

Durch die Herstellung von Stahl werden umfangreiche Transportprozesse in Gang gesetzt. Laut *Stahl-Zentrum* (Interessensgemeinschaft der deutschen Stahlindustrie), werden 50 % der Transportmengen über die Schiene und 30 % über Wasserstraßen abgewickelt. Der Straßengüterverkehr ist bei dem Versand von Fertigprodukten zum Endverbraucher unverzichtbar (Stahl Zentrum 2016, S. 1). Da Stahl international gehandelt wird, spielen Transportdistanzen und -kosten derzeit eine untergeordnete Rolle.

Um beispielsweise die Exportabhängigkeit Deutschlands und der EU zu reduzieren, sind die Erhaltung von nationalen Produktionskapazitäten und der Einsatz von Stahlschrotten unabdingbar. Die EU ist mit Abstand der weltgrößte Exporteur von Stahlschrott (Bureau of International Recycling 2018, S. 1).

4.3 Erfassung des Gebäudebestands im räumlichen Bezug

Ein zentraler Baustein dieser Arbeit ist die Erfassung der stofflichen Zusammensetzung des Wohngebäudebestands im räumlichen Bezug. Diese hat maßgeblichen Einfluss auf zukünftige Stoffströme (z. B. Anfall von Sekundärrohstoffen). Durch eine räumliche Betrachtung können standortspezifische Aussagen gemacht werden (z. B. strategische Positionierung von Anlagen und Ermittlung von Anlagenkapazitäten). Im folgenden Abschnitt wird eine Methode aufgezeigt, um ein fortschreibares Rohstoffkataster für Bauwerke zu erstellen, das als Basis für weitere Untersuchungen in dieser Arbeit dient.

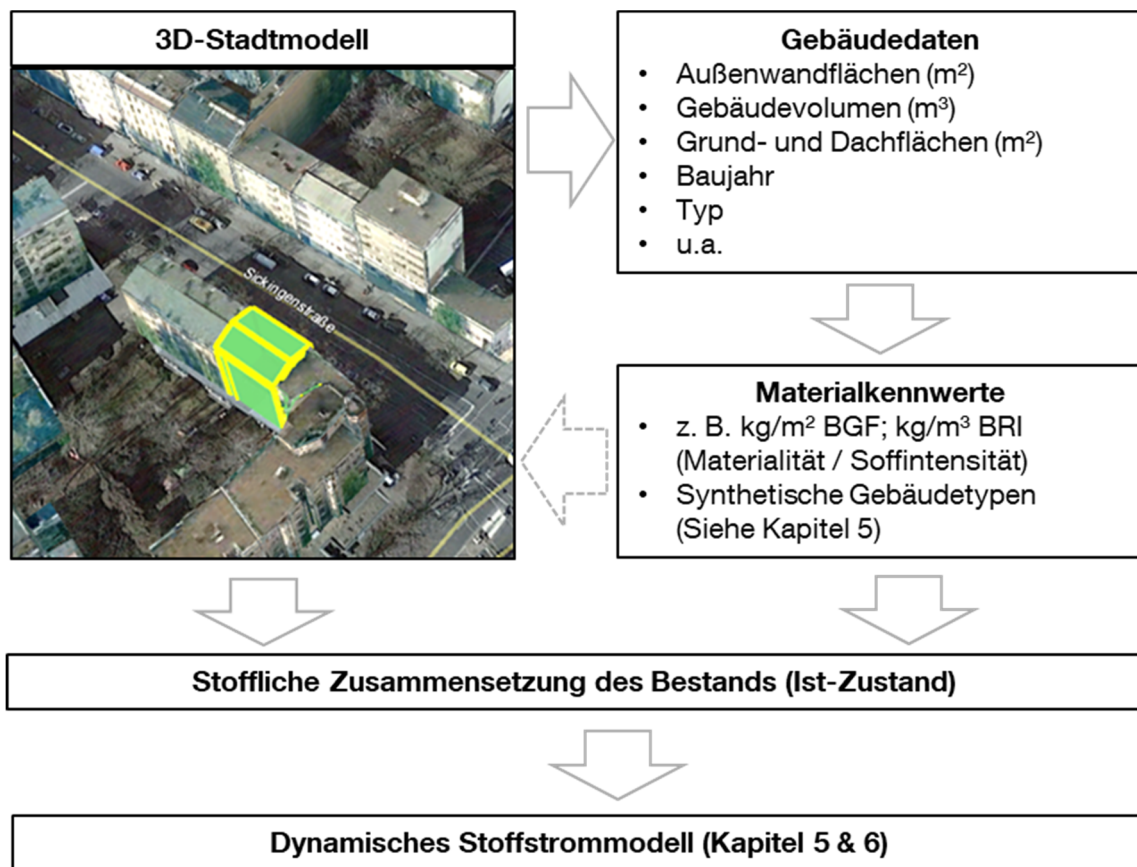


Abbildung 55: Aufbau des Rohstoffkatasters und Einbindung ins dynamische Stoffstrommodell

Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, existieren geologische Karten die aufzeigen, wo Primärrohstoffe vorhanden sind. Flächendeckende Karten, die das Potential von Sekundärrohstoffen aus Bauwerken aufzeigen sind derzeit nicht vorhanden, gewinnen jedoch zunehmend an Bedeutung.

Für eine regionale und urbane Darstellung eignen sich insbesondere 3D-Stadtmodelle, da die Größe des Bezugsraums (z. B. Land, Stadt, Gemeinde u. a.) frei wählbar ist. Im Rahmen dieser Arbeit werden stoffliche Gebäude- und Bauteilkennwerte, die in Kapitel 5 beschrieben werden, mit geometrischen Gebäudedaten aus 3D-Stadtmodellen verknüpft. In Kapitel 6, wird die Methodik anhand eines Fallbeispiels der Landeshauptstadt München aufgezeigt und validiert.

Die errechneten Stoffintensitäten der jeweiligen Gebäudetypologien und Bauteile werden dem entsprechenden Gebäude (aus dem 3D-Stadtmodell) anhand von Baualter und Gebäudetyp zugeordnet. Aus dem 3D-Stadtmodell können unter anderem der Bruttorauminhalt (BRI in m³) sowie relevante Flächen (z. B. Außenwand- und Dachflächen [m²]) der einzelnen Gebäude abgeleitet werden (siehe Kapitel 5). Diese können wiederum mit den entsprechenden Materialkennwerten (z. B. kg/m³ oder kg/m²) verknüpft werden, um die stoffliche Zusammensetzung des Betrachtungsraums (z. B. Gebäude, Quartier etc.) zu ermitteln. Für eine Zuordnung ist es entscheidend, dass Baujahr und der Gebäudetyp im Gebäudemodell hinterlegt sind.

In einem weiteren Schritt werden die ermittelten Werte in das dynamische Stoffstrommodell eingespeist, um die Stoffströme des Untersuchungsraums aufzuzeigen (Kapitel 5 & 6). Die Vorgehensweise ist in Abbildung 55 schematisch dargestellt.

4.4 Erfassung der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft im räumlichen Bezug

Bei der Entsorgung und Aufbereitung von Stoffen herrschen große regionale Unterschiede, auch was die Kapazitäten und Grenzwerte von Deponien angeht. Momentan existieren keine bundesweiten Regelungen; die Entsorgung ist Aufgabe der Länder. Falls eine grenzüberschreitende Entsorgung (über Landes- und Bundesgrenzen) wirtschaftlich vorteilhaft und gesetzlich erlaubt ist, wird diese auch angewandt. Als Beispiel: China stoppte den Import von 24 Abfallarten (z. B. Schlacken aus der Eisen- und Stahlherstellung) ab dem 01.01.2018. Dies hat zur Veränderung von internationalen Stoffströmen geführt (Landbell Group 2018, S. 1).

Zudem ist eine branchenübergreifende Konkurrenz einzelner Abnehmer zu verzeichnen, wie z. B. zwischen thermischen Verwertern und der Recycling-Industrie. Beide Akteure sind an einem wirtschaftlichen Betrieb und einer Auslastung ihrer Anlagen interessiert (NABU 2016, S. 1).

4.4.1 Recyclinganlagen

In einem Ökosystem sind Abbau- und Verwertungsprozesse (z. B. durch Bakterien) in unmittelbarer Umgebung von Produzent (z. B. Pflanzen) und Konsument (z. B. Tiere) angesiedelt. Durch diese Nähe und symbiotische Beziehung der einzelnen Akteure muss verhältnismäßig wenig Energie für den Transport der Stoffe aufgewendet werden. Dies lässt sich am Beispiel eines Waldes veranschaulichen, wo Biomasse direkt vor Ort (Waldboden) verwertet wird und anschließend in den Stoffkreislauf zurückfließt. In einem anthropogenen System hingegen sind zwischen Produzenten, Konsumenten und Verwertern oft längere Transportdistanzen zu überbrücken (Ayres und Simonis 1994, S. 24).

Bei der Stahlherstellung beispielsweise werden die benötigten Rohstoffe (z. B. Eisenerz) aus vielen Teilen der Welt bezogen, um an einem anderen Ort zusammengeführt zu werden. Weitere Transporte sind nötig, um den Stahl an seinen Verwendungsort zu bringen. Nach der Nutzung wird der Stahlschrott oft über weite Distanzen transportiert, um letztendlich in den Kreislauf zurückzufließen. Bei einer Erhöhung der Transportkosten und fallenden Stahlpreisen kann eine regionale Aufbereitung zunehmend an Bedeutung gewinnen, wodurch Transportdistanzen weiter reduziert werden können.

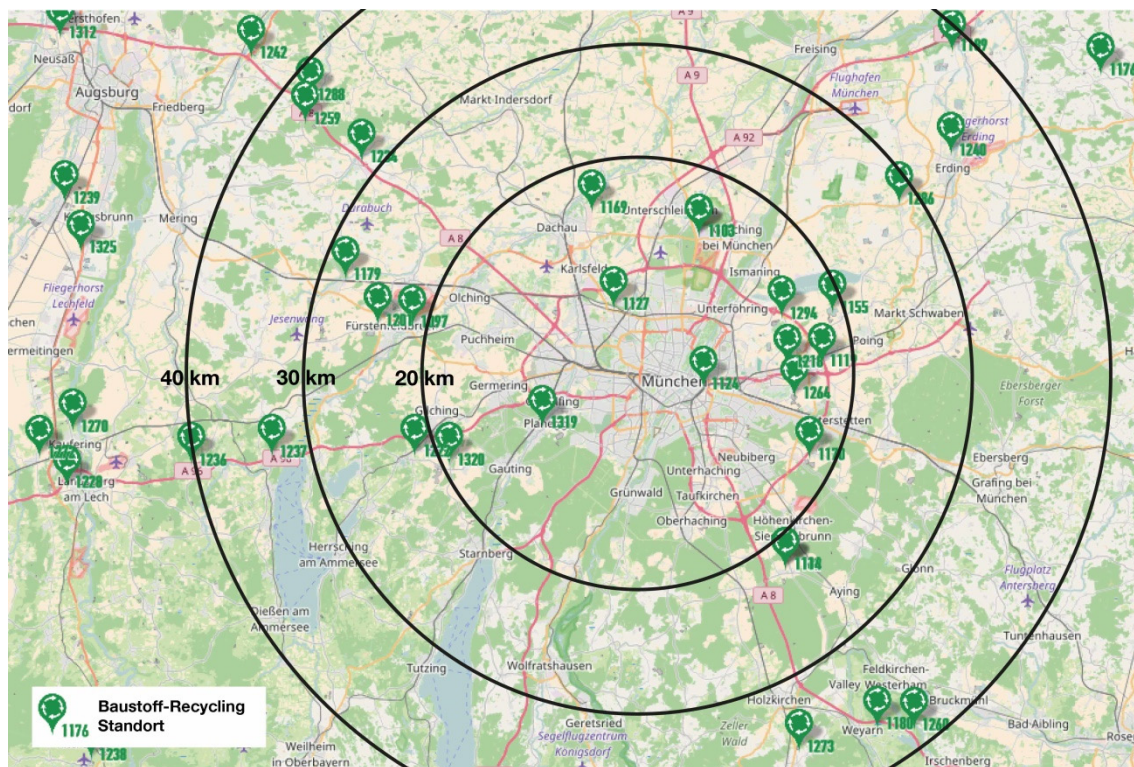


Abbildung 56: Standorte der Baustoff-Recycling Anlagen in der Region München (Modifizierte Darstellung nach Baustoffe Standorte Online 2014)

Da der Erlös von aufbereitetem mineralischen Material die Transportkosten nicht deckt, erscheint ein Transport von mehr als 20-30 km nicht lohnenswert (Siehe Kapitel 4.6). In Abbildung 56 sind die Baustoff-Recycling Anlagen in der Region München aufgeführt. Innerhalb eines 20 km Radius existieren derzeit 12 stationäre Anlagen (18 innerhalb von 30 km). Allerdings kann keine Aussage zu den aktuellen Kapazitäten der einzelnen stationären Anlagen (Produktionsebene), bzw. die Masse an produzierten Sekundärrohstoffen getroffen werden. Um eine Aussage treffen zu können, wäre eine systematische Analyse (z. B. Erfassung von Anlagenstoffströme) aller regionalen Recyclingkapazitäten nötig. Mit einer gesetzlich festgelegten Auskunftspflicht der Anlagenbetreiber (z. B. Weitergabe der Daten von aufbereiteten Baustoffmassen an das Statistische Bundesamt) könnte diese Datenlücke geschlossen werden. Dadurch könnten regionale Recyclingkapazitäten weitgehend erfasst werden.

Durch mobile Anlagen (z. B. direkter Einsatz auf der Baustelle) können Transportdistanzen reduziert werden, vorausgesetzt die produzierten Sekundärrohstoffe haben die entsprechenden Eigenschaften (z. B. Qualitätssicherung, Zertifizierung) und finden einen lokalen Abnehmer.

In Bayern wurden 2012 von 45,6 Mio. t Bauabfällen 10,1 Mio. t aufbereitet (Abbildung 57). Ein Großteil wird im Straßen- und im Erdbau weiterverwendet. Lediglich 18.000 t fanden als Zuschlagstoff für Recyclingbeton Verwendung. Daher spielt ein hochwertiges Recycling (z. B. Einsatz im Hochbau) noch eine untergeordnete Rolle. Es gilt allerdings zu beachten, dass das Bauabfallaufkommen am Entstehungsort (z. B. Baustelle) und nicht nach dem Sitz des Anlagenbetreibers (bzw. Aufbereiter)

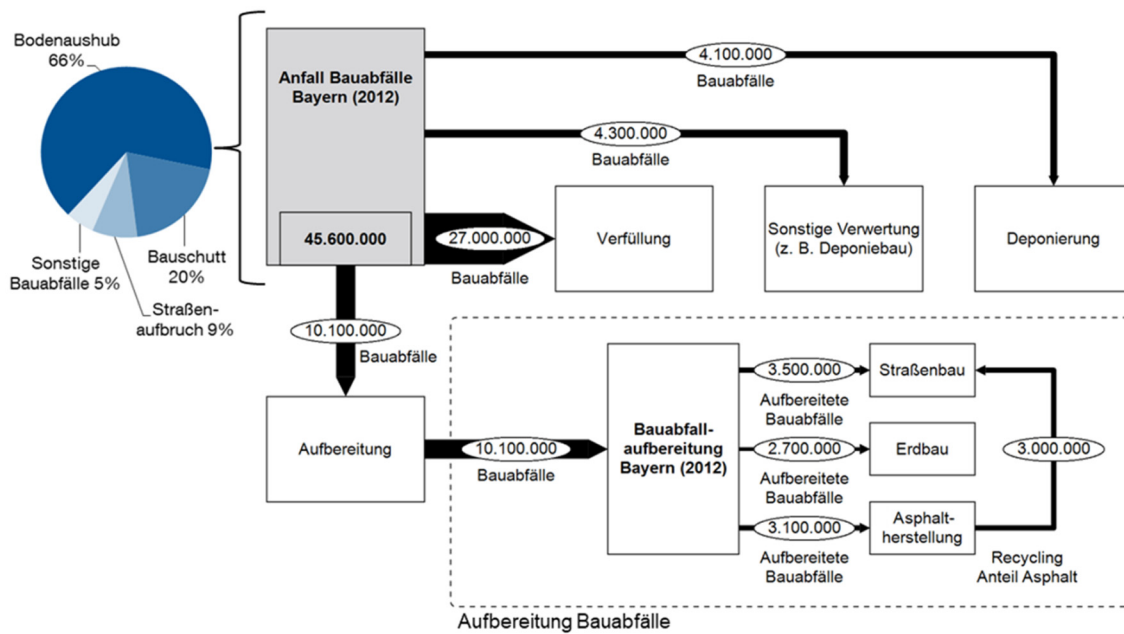


Abbildung 57: Aufbereitung von Bauabfällen in Bayern 2012 (Eigene Darstellung nach Bayerische Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2014, S. 8)

statistisch erfasst wird. Ebenso wenig werden unbehandelte vor Ort eingesetzte Bauabfälle (z. B. zur Verfüllung) statistisch nicht erfasst (Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2014, S. 8f).

Bayern wird in der Bauabfallaufbereitungsstatistik in sieben Regionen unterteilt (Oberbayern, Niederbayern, Oberpfalz, Oberfranken, Mittelfranken, Unterfranken und Schwaben). Eine weitere Detaillierungsstufe, die mit den maximalen Transportradien der betrachteten Stoffe übereinstimmt wäre wünschenswert (z. B. Landkreis). Im Vergleich: Produktionsdaten und Rohstoffgewinnung werden lediglich auf Länderebene erfasst.

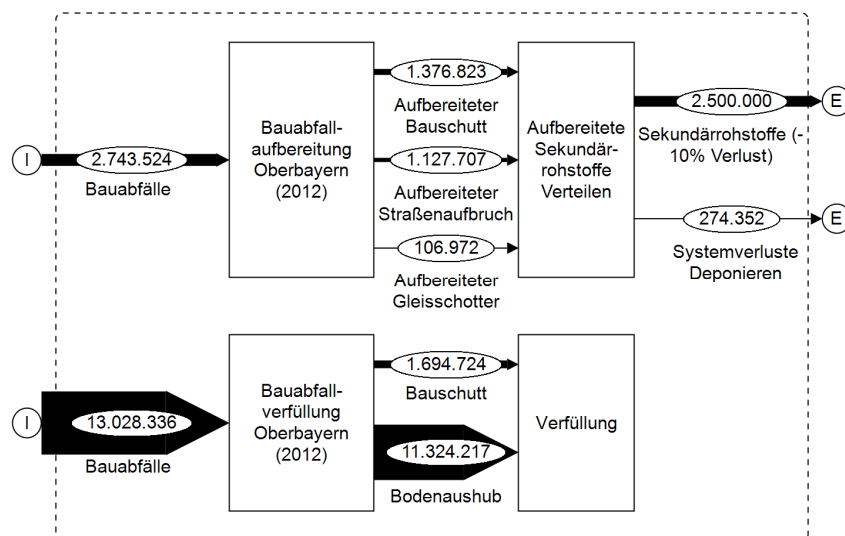


Abbildung 58: Aufbereitung und Verfüllung von Bauabfällen in Oberbayern 2012 (Eigene Darstellung nach Bayerische Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2014, S. 17)

In Oberbayern wurden 2012 rund 2,5 Mio. t mineralische Sekundärrohstoffe in Bauschuttzubereitungsanlagen hergestellt. Der Großteil wird im Straßenbau eingesetzt. Des Weiteren wurden mehr als 13 Mio. t Bauabfälle verfüllt (Abbildung 58), was als Downcycling anzusehen ist (Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2014, S. 17)

Durch die Langlebigkeit von Gebäuden rückt eine Entsorgung und Aufbereitung der Abfälle oft über mehrere Generationen in die Zukunft. Dennoch ist es wichtig, sich bereits jetzt Gedanken über zukünftige Bauweisen (z. B. *Design for Disassembly*) Entsorgungswege, Aufbereitungsmöglichkeiten und potentielle Einsatzgebiete der Sekundärrohstoffe zu machen.

4.4.2 Deponien

Neben der Beseitigungsfunktion werden für den Bau von Deponien auch Rohstoffe, insbesondere mineralische Fraktionen benötigt. Beispielsweise wurden 2012 in Deutschland rund 17 % (8,7 Mio. t) des angefallenen Bauschutts im Rahmen von Verfüllungen von Abgrabungen auf Deponien verwertet und 5 % (2,5 Mio. t) auf Deponien beseitigt. Bei Bauabfällen auf Gipsbasis wurden fast 50 % der anfallenden Bauabfälle auf Deponien entsorgt (Kreislaufwirtschaft Bau 2015, S. 7ff). Abbildung 59 zeigt den Anteil der mineralischen Bauabfälle, die auf Deponien entsorgt oder für den Deponiebau und Verfüllungen verwendet wurden.

Demnach wurden in Deutschland 2012 fast 17 Mio. t (204 kg/Einwohner) mineralischer Stoffe auf Deponien entsorgt und über 95 Mio. t (1.100 kg/Einwohner) wurden im Deponiebau und für Verfüllungen eingesetzt.

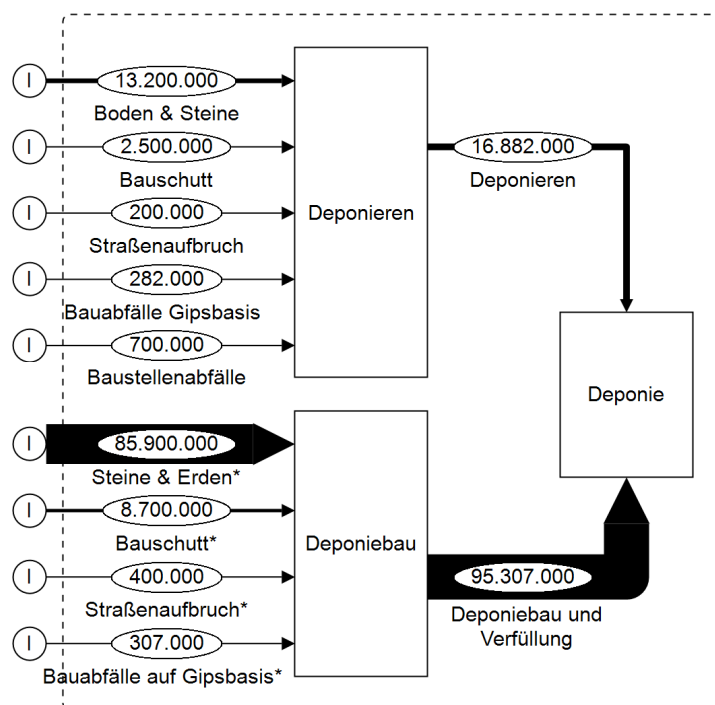


Abbildung 59: Anteil mineralischer Fraktionen in Deponierung, Deponiebau und Verfüllung in Deutschland 2012 (in Tonnen) (Eigene Darstellung anhand Kreislaufwirtschaft Bau 2015, S. 6-9)

Diese Daten werden auf Bundesebene im Monitoring-Bericht der Kreislaufwirtschaft Bau seit 1995 alle zwei Jahre erhoben. Anhand der Daten von 2012 wurde der letzte aktuelle Bericht 2015 publiziert. Regionale Daten (z. B. Oberbayern) werden durch die Statistischen Landesämter erhoben, die jährlich fortgeschrieben werden (Abbildung 60). Daten für niedrigere Aggregationsstufen (z. B. Landkreise, Städte, Gemeinden) werden hingegen nicht erhoben. Eine Erhebung auf diesem Aggregationsniveau wäre allerdings sinnvoll, da durch die wirtschaftlichen und funktionalen Transportradien mineralischer Stoffe die jetzigen Betrachtungsräume zu großflächig sind.

Da für die Entsorgung von Stoffen ein Entsorgungsnachweis geführt wird, können diese Daten auf einer geringer aggregierten Ebene erhoben werden. Diese Datenerhebung kann unter anderem zu einer strategischen Positionierung von Deponie- und Recyclingstandorten herangezogen werden. Daten zu regionalen Deponiekapazitäten und -bedarf, konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht erfasst werden und würden den Rahmen sprengen. Die Standorte der Deponien im Umkreis von München werden im Kapitel 6 im Rahmen des Fallbeispiels aufgezeigt.

Laut Bayerischem Landesamt für Statistik wurden in Bayern 2012 rund 665.000 t als gefährlich eingestufte Bauabfälle (schadstoffbelastet) auf Deponien entsorgt. Von den insgesamt 45,6 Mio. t Bauabfällen in Bayern wurden 91 % (41,5 Mio. t.) verwertet und 9 % (4,1 Mio. t) auf Deponien abgelagert (Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2014, S. 8). Demnach beträgt die offizielle Verwertungsquote 91 %. Dabei ist zu beachten, dass Verfüllungsmaßnahmen, die ein Downcycling der Stoffe bedeuten, ebenfalls als Verwertungsmaßnahme zählen - mehr als die Hälfte des angefallenen Bauschutts wurde demnach verfüllt. Ebenso sind rund 66 % der in der

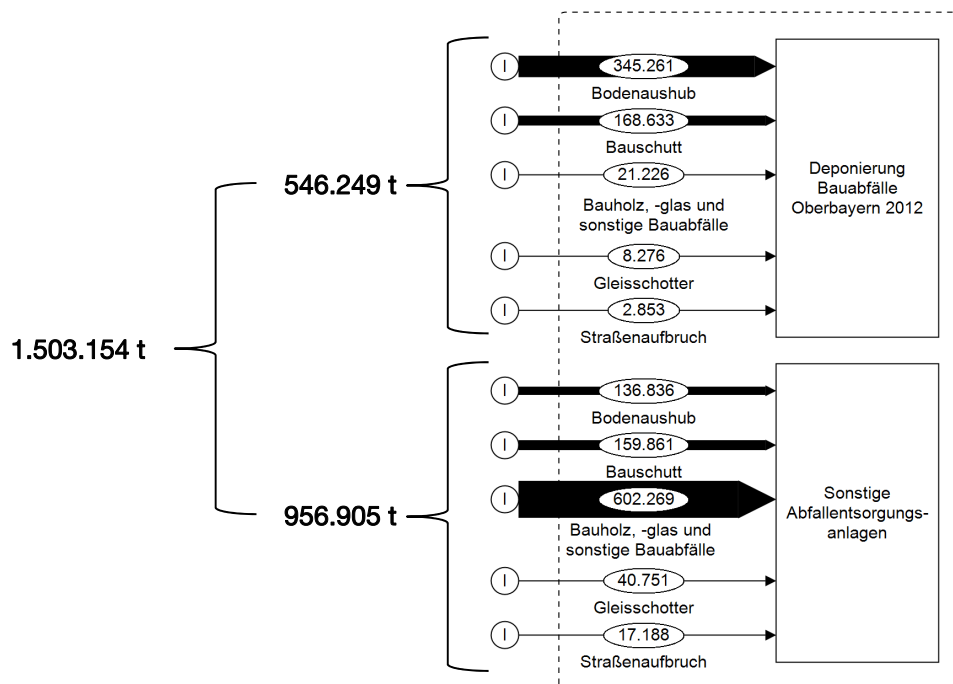


Abbildung 60: Deponierung von Bauabfällen in Oberbayern 2012 (in Tonnen) (Eigene Darstellung nach Bayerische Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2014, S. 18)

Statistik anfallenden Bauabfälle Bodenaushub, der rechtlich als Abfall eingestuft wird, sobald dieser die Baustelle verlässt. Da Bodenaushub allerdings weniger als Abfall, sondern als Rohstoff zu sehen ist, sind die eigentlichen Verwertungsquoten geringer als ausgewiesen. Bei einer Einstufung von Bodenaushub als „Nicht-Abfall“ wären die Verwertungsquoten auf regionaler- sowie auf Landesebene weniger „optimistisch“ einzustufen (ca. 65 % Verwertungsquote in Bayern). Durch die aufgezeigten regionalen Unterschiede in der Aufbereitung und Entsorgung von Bauabfällen ist eine regionale Betrachtung notwendig, um Stoffströme zu kartieren und Aussagen zu den Gesamttransportwegen zu treffen.

4.5 Verknüpfung der räumlichen Bezugsebenen

Die einzeln beschriebenen Standort- und Katasterkarten innerhalb der parallel stattfindenden Prozesse (Herstellung, Produktion, Nutzung, Entsorgung) sind lediglich für eine Auswahl an Wirtschaftszweigen der Wertschöpfungskette Bau (z. B. Abbruchunternehmen, Aufbereiter) von Interesse. Es ist nötig, die stoffspezifischen Karten miteinander zu vernetzen, um die Dynamik des Bestands innerhalb regionaler Bezugsräume abzubilden und Transportprozesse der gesamten Wertschöpfungskette darzustellen (Abbildung 61).

In der Abbildung werden die räumlichen Prozesse und Stoffströme nach Lebenszyklusphasen aufgeteilt und die jeweiligen Datenkarten überlagert. Dadurch können Gesamttransportdistanzen und -wege einzelner Stoffe entlang ihres Lebenszyklus verfolgt werden.

Die regionale Bestandsdynamik (innerhalb des Bezugsraums) bildet eine zentrale Einheit, die wiederum im stofflichen Austausch mit anderen Regionen (überregionaler Handel), sowie der Umwelt (Umweltsenken) ist. Um die Funktionalität dieser

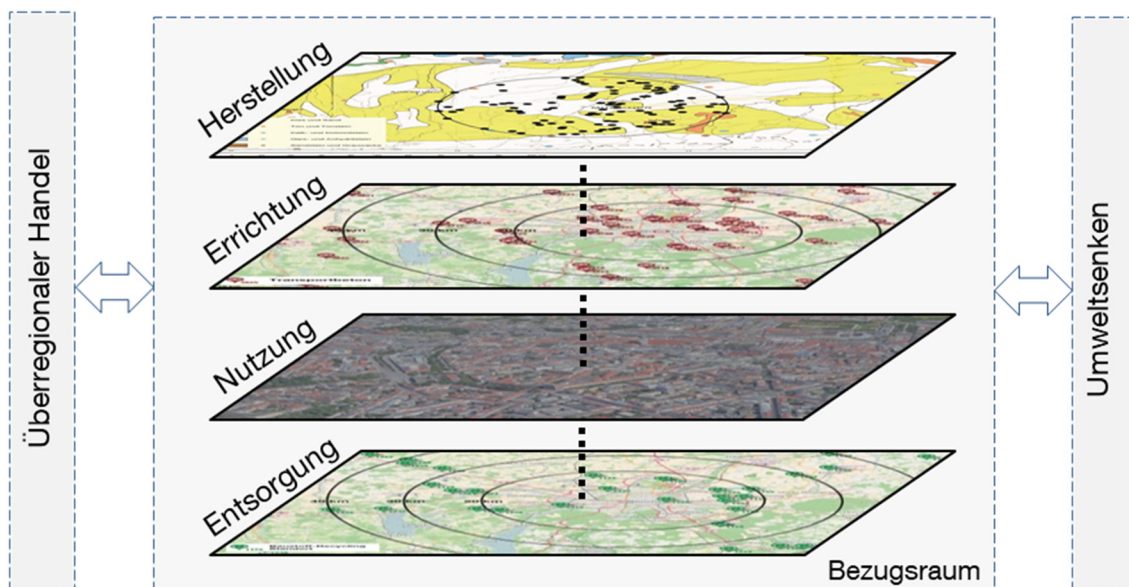


Abbildung 61: Verknüpfung der Lebenszyklusphasen im räumlichen Bezug (Eigene Darstellung)

Vorgehensweise zu gewährleisten, bedarf es einer Schließung der aufgezeigten Datenlücken und Gewährleistung der Kompatibilität der jeweiligen Betrachtungsebenen (z. B. Herstellung, Errichtung, Nutzung, Entsorgung).

Die Transportdistanzen und der Selbstversorgungsgrad (SVG) eines Bezugsraums kann nur zuverlässig ermittelt werden, wenn die Daten der jeweiligen Betrachtungsebenen ein identisches Aggregationsniveau besitzen. Der SVG beschreibt demnach den Stoffbedarf, der durch das Stoffangebot im gleichen Bezugsraum gedeckt werden kann. In Kapitel 6, wird der SVG Anhand eines Fallbeispiels aufgezeigt.

Produktionsdaten (z. B. mineralische Baustoffe) werden auf Länderebene, Daten zur Herstellung und Bestand von Gebäuden hingegen auf Landkreisebene (bzw. Stadtebene) erhoben. Detaillierte Daten zu Sanierungs- und Umbaumaßnahmen in der Nutzungsphase werden höchstens auf nationaler Ebene in den Baustatistiken erfasst. Daher sind beispielsweise Aussagen zu den Stoffströmen, die in der Nutzungsphase in Gang gesetzt werden, nur bedingt möglich, da die Daten zu hoch aggregiert sind (siehe Kapitel 5). In der Entsorgung werden zumindest für mineralische Baustoffe regionale Daten (z. B. Aggregationsniveau: Oberbayern, Franken) erhoben.

Die Daten zum überregionalen Handel werden in der *Umweltökonomischen Gesamtrechnung für Bayern* erfasst und beziehen sich lediglich auf den länderübergreifenden Import von abiotischen Materialien. Diese Daten werden unter anderem erfasst, um die Rohstoffproduktivität Bayerns zu bemessen.

Zum vollständigen Verständnis ist ein Stoffaustausch der räumlichen Ebene mit den Umweltsenken zu betrachten. Der Umweltingenieur Rudolf B. Husar stellte 1986 ein mathematisches Modell zur dissipativen Verteilung von Stoffen am Beispiel von Schwefel- und Stickstoffdioxid auf. Er kam zu dem Ergebnis, dass das anthropogene System sich von einem Ökosystem hauptsächlich dadurch unterscheidet, dass es keine effizienten Stoffrecycler gibt, die eine nachhaltige Entwicklung zulassen. Ebenfalls befand er es für notwendig, Stoffflüsse in allen Umweltmedien (Luft, Land, Wasser, und Biota [z. B. Pflanzen und Tiere]) zu betrachten, um Materialerhaltungssätzen gerecht zu werden (Husar 1986, S. 50). Eine detaillierte Betrachtung dieser Thematik würde allerdings den Rahmen dieser Arbeit sprengen, da eine tiefgehende Betrachtung von chemischen und biologischen Prozessen nötig wäre.

Eine einheitliche und auf gleichem Aggregationsniveau (z. B. Landkreisebene) basierende Datenerhebung innerhalb der einzelnen Phasen der Bestandsdynamik sollte demnach forciert werden, um den wirtschaftlichen und funktionalen Transportradien (insbesondere von mineralischen Stoffen) gerecht zu werden.

4.6 Ausgewählte Einflüsse auf Transportradien und Bezugsräume

Im Bereich der Standorttheorie entwickelte Johann Heinrich von Thünen in seinem Werk von 1826 *Der isolierte Staat*, ein Modell zur graphischen Darstellung von Standortüberlegungen, insbesondere mit Bezug zur Landwirtschaft (Thünen 1921). Um den Ausgangsort, den „isolierten Staat“ ergeben sich konzentrische Kreise, die durch zunehmende Entfernung proportional steigende Transportkosten aufzeigen (Wirtschaftslexikon24 2015, S. 1).

4.6.1 Transportkosten

Die Transportkosten stellen eine wesentlichste Stellschraube dar, wie weit Stoffe transportiert werden (Größe des Bezugsraums). Übersteigen die Transportkosten den Wert der transportierten Stoffe, kommt man schnell in einen für Unternehmen unwirtschaftlichen Bereich. Hochwertige Stoffe (z. B. Stahl) lassen sich über größere Distanzen transportieren als beispielsweise lokal abgebaute Kiese und Sande. Durch die regionale Verfügbarkeit von Kiesen und Sanden müssen diese meist per LKW befördert werden. Eigene Berechnungen am Standort Oberbayern zeigen, dass die Transportkosten von Kies bereits ab einer durchschnittlichen Distanz von 25 km die Materialkosten übersteigen - bei Sand ab 40 km (Abbildung 62 und Abbildung 63).

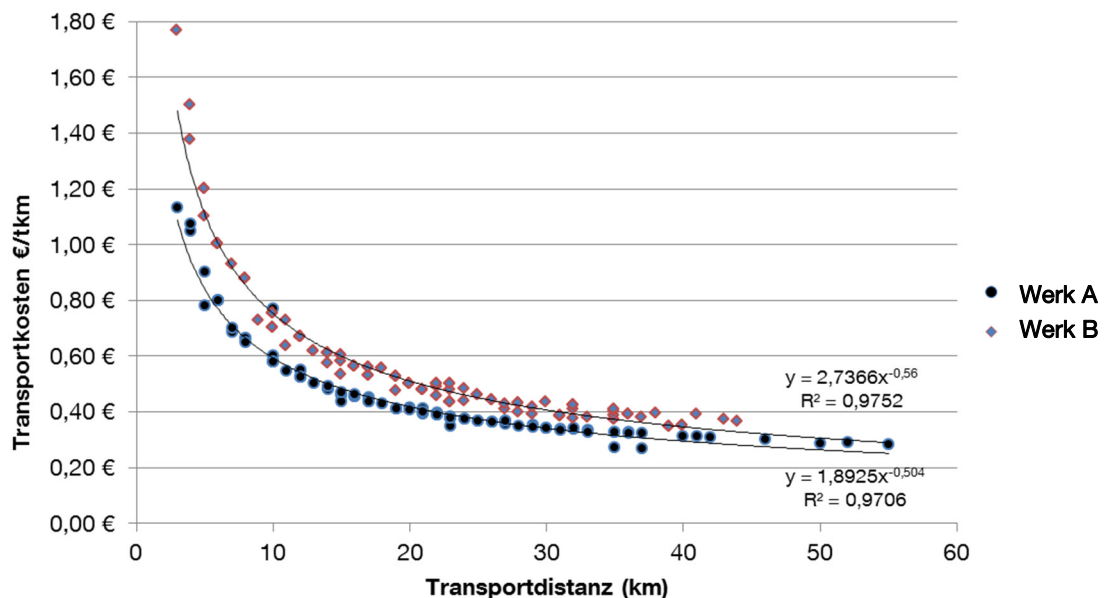


Abbildung 62: Transportkosten von mineralischen Erzeugnissen im Bezug zur Transportdistanz: Datenauswertung anhand zwei Unternehmen aus Oberbayern (Eigene Auswertung)

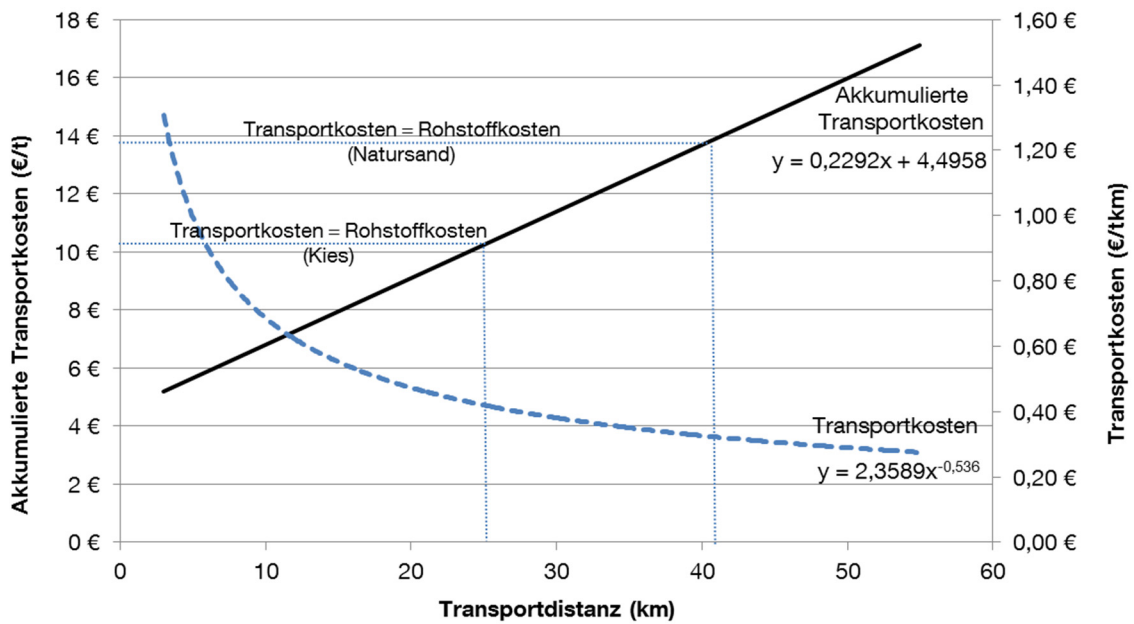


Abbildung 63: Durchschnittliche und akkumulierte Transportkosten von Kiesen und Sanden in Oberbayern (Eigene Auswertung)

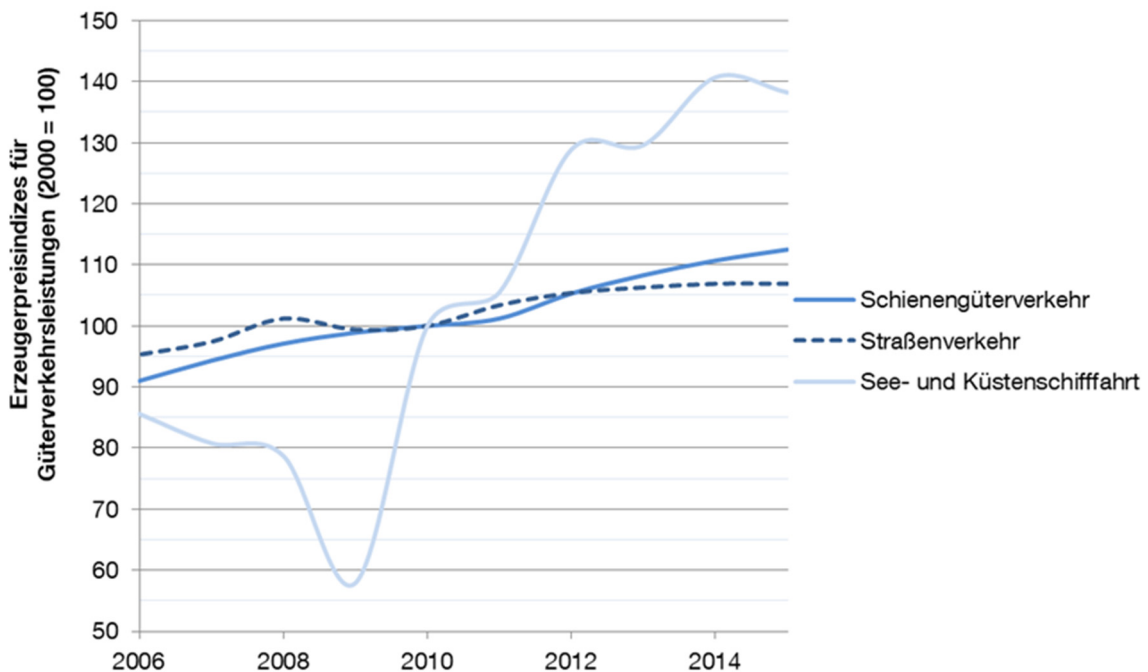


Abbildung 64: Erzeugerpreisindizes für Güterverkehrsleistungen (Destatis 2016a, S. 1)

Die Transportkosten der oben genannten mineralischen Baustoffe betragen im Jahr 2016 zwischen 0,28 und 1,77 €/tkm (in Abhängigkeit zur Transportdistanz). Die Auswertungen haben ergeben: je weiter der Einsatzort zum Werk, umso geringer die

Transportkosten pro Kilometer. Bei einer Transportdistanz von 50 km ergeben sich in diesem Fall Transportkosten von ca. 15 €/t. Die Entwicklung der nationalen Transportkosten ist in Abbildung 64 dargestellt. Abgesehen von See- und Küstenschifffahrt sind die Güterverkehrsleistungen (Schienen- und Straßenverkehr) in den letzten Jahren konstant angestiegen.

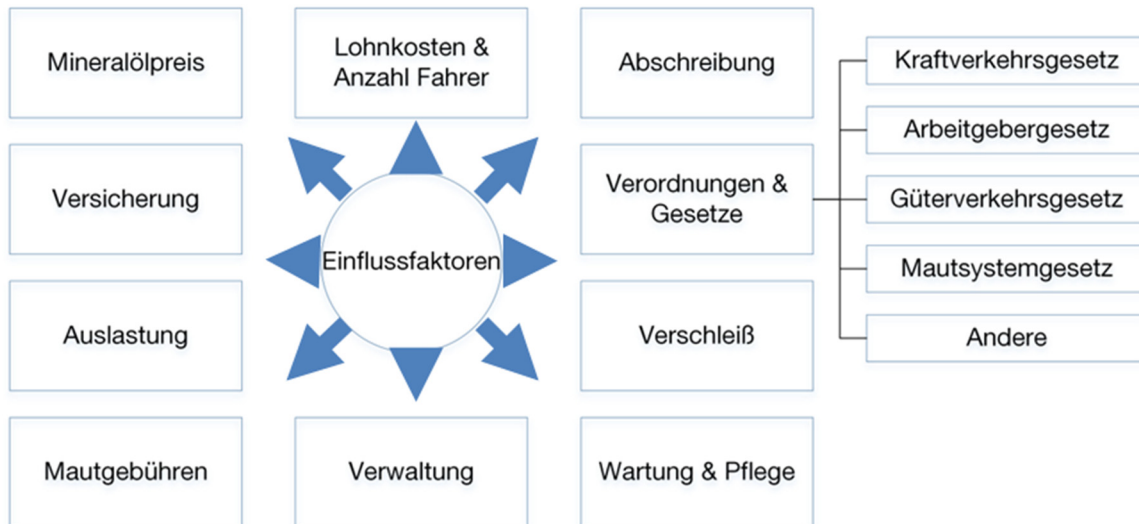


Abbildung 65: Ausgewählte Einflussfaktoren auf die Transportkosten im LKW Verkehr (Eigene Darstellung)

Ausgewählte Einflussfaktoren auf die Transportkosten für den Straßengütertransport sind in Abbildung 65 dargestellt. Neben den Personalkosten, die fast ein Drittel der Transportkosten ausmachen, beträgt der Anteil der Kraftstoffkosten bzw. der Mineralölpreis rund 25 % (Herrler 2012, S. 20). Dieser kann sich nicht nur sehr kurzfristig (z. B. täglich) verändern, sondern wird von einer Vielzahl von weiteren Einflussfaktoren (Steuern, Weltwirtschaft, Handel, OPEC, Dollarkurs, Spekulationen, Subventionen u. a.) gesteuert, die teilweise außerhalb unseres nationalen Einflussbereichs liegen.

4.6.2 Rohstoffkosten

Neben den Transportkosten stellen auch die Kosten der zu transportierenden Stoffe eine wesentliche Stellschraube zur Größe der Bezugsradien dar. Bei sinkenden Transportkosten oder steigenden Rohstoffpreisen können Stoffe über weitere Distanzen transportiert werden. Durchschnittliche Materialkosten für ausgewählte mineralische Erzeugnisse in Oberbayern sind in Tabelle 9 dargestellt. Hier wird ersichtlich, dass die Rohstoffkosten selbst innerhalb identischer Bezugsräume einer ausgedehnten Bandbreite unterliegen.

Im Vergleich zu den Transportkosten, abgesehen von der See- und Küstenschifffahrt, haben sich die Erzeugerpreise (Steine & Erden) in einem ähnlichen Rahmen verändert. In den vergangenen 10 Jahren blieben daher die Transportradien der betrachteten Stoffe weitgehend konstant. Die Entwicklung der Erzeugerpreise für Steine- und Erden-Produkte ist in Abbildung 66 dargestellt. Demnach verzeichnen insbesondere

Ziegel und Mörtel starke Preissteigerungen. Die Preise für Gips hingegen sind vergleichsweise konstant geblieben.

Tabelle 9: Durchschnittliche Kosten für die Bereitstellung von ausgewählten mineralischen Erzeugnissen in der Region Oberbayern (Eigene Auswertung)

Baustoff	Min	Mittelwert	Max	StDev	N
Riesel 4/8 - 16/32	9,00 €	10,41 €	15,12 €	1,57 €	12
Natursand	11,00 €	13,98 €	26,05 €	4,55 €	10
Kabelsand	5,70 €	8,80 €	15,97 €	3,38 €	8
Quarzsand	18,85 €	26,00 €	31,00 €	5,19 €	3
Edelsplitt 2/5 - 22/32	12,30 €	15,82 €	21,43 €	3,09 €	6
Stahlbetonkies 0/16 - 0/32	12,95 €	16,77 €	20,59 €	3,82 €	2
Frostschutzkies	6,90 €	8,45 €	10,92 €	1,30 €	9
Wegekies	5,00 €	8,74 €	13,45 €	2,48 €	7
Mineralbeton	14,00 €	16,88 €	19,75 €	2,88 €	2
Recycling Sand	3,85 €	3,85 €	3,85 €	0,00 €	1
Recyclingschotter	4,20 €	4,20 €	4,20 €	0,00 €	1
Betonrecycling	6,00 €	8,00 €	10,00 €	2,00 €	2
Asphaltgranulat	8,40 €	8,40 €	8,40 €	0,00 €	1
Betonbruch	5,00 €	5,00 €	5,00 €	0,00 €	1

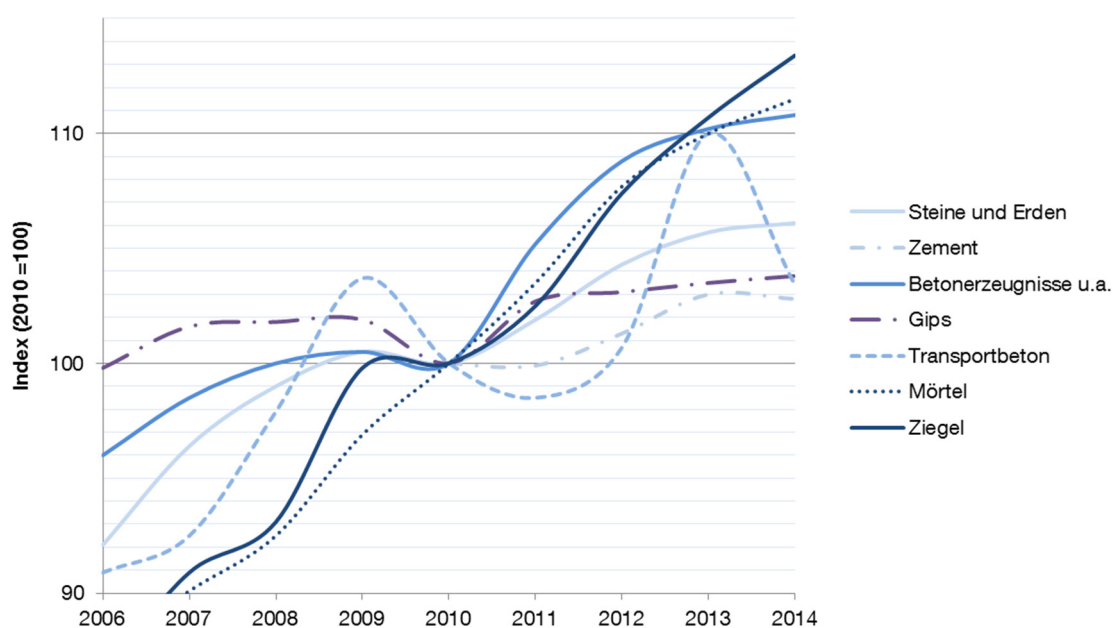


Abbildung 66: Index der Erzeugerpreise für Steine- und Erden-Produkte (Eigene Darstellung nach Destatis 2016b, S. 1)

Eine Veränderung der Material- und/oder Transportkosten kann die Größe des Einzugsradius verändern. Ein Anstieg der Transportkosten bei unverändertem Materialpreis hätte beispielsweise eine Reduzierung des Einzugsradius zur Folge. Diese beiden Größen stellen wichtige Steuerungsmöglichkeiten und Einflussfaktoren dar.

Mit der Erkundung und Erschließung von Lagerstätten mineralischer Rohstoffe sind neben einem hohen zeitlichen und materiellen Aufwand auch hohe Kosten verbunden. Der Genehmigungsaufwand wird in Kapitel 7 beschrieben. Die Produktion von Sekundärrohstoffen steht jener der Primärrohstoffe gegenüber. Liegen die Kosten von Sekundärrohstoffen über jenen von Primärrohstoffen wird es schwer, dafür einen Absatzmarkt zu etablieren. Allein die Kosten entscheiden, ob es lohnenswert ist einen Stoff wiederaufzubereiten. Je höher die Anzahl der Aufbereitungsschritte, desto höher die Aufbereitungskosten und umso teurer muss der Sekundärrohstoff verkauft werden, um wirtschaftlich arbeiten zu können (siehe Kapitel 2).

Es ist also von fundamentaler Wichtigkeit, Bauschutt und Bauabfälle so sortenrein wie möglich bei den Aufbereitungsanlagen anzuliefern, um ein Minimum an Aufbereitungsschritten sicher zu stellen. Dies kann beispielsweise durch ausgiebige Vorsortierung auf der Baustelle erreicht werden, die mittlerweile im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und der Gewerbeabfallverordnung vorgeschrieben ist. In der Praxis hat sich allerdings gezeigt, dass dieses Potential bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist (Abbildung 67).



Abbildung 67: Beispiele für eine getrennte Sortierung von Bauabfällen auf ausgewählten Baustellen (Eigene Bilder)

Des Weiteren bietet der Weg zum selektiven Rückbau von Gebäuden die Möglichkeit, sortenreinere Fraktionen bereitzustellen. Bei konventionellen Abbruchverfahren, die tendenziell schneller und kostengünstiger durchführbar sind als selektive Rückbaumaßnahmen (siehe Kapitel 2), werden Stofffraktionen zunehmend auf der Baustelle vermischt, um später aufwändig getrennt zu werden (Abbildung 68).



Abbildung 68: Gebäuderückbau mit heterogenem Stoffgemisch (links) - Mobile Aufbereitungsanlagen (rechts) (Eigene Bilder)

Die Entsorgungskosten stellen einen weiteren Einflussfaktor dar. Sind diese zu niedrig, ist es oft wirtschaftlicher, Abbruchmaterial zu deponieren (soweit gesetzlich zulässig). Tabelle 10 stellt durchschnittliche Entsorgungskosten mineralischer Fraktionen für Südbayern gegenüber. Hier hat sich gezeigt, dass die Kosten der unterschiedlichen Fraktionen teilweise erheblich variieren, was auch dazu führt, dass die Größe der Bezugsräume ebenfalls variiert. Während es sich beispielsweise in Bezugsraum 1 lohnt, einen Stoff aufzubereiten, ist es in Bezugsraum 2 eventuell wirtschaftlicher, den Stoff zu deponieren.

Tabelle 10: Entsorgungskosten mineralischer Fraktionen in Südbayern (in Tonnen) (Eigene Erhebung anhand von 4 Transportunternehmen in Oberbayern)

Baustoff	Min	Mittelwert	Max	StDev	N
Abbruchmaterial Gemisch	14,90 €	18,40 €	21,01 €	2,57 €	3
Abbruchmaterial Beton unbewehrt	9,80 €	15,13 €	18,49 €	3,81 €	3
Abbruchmaterial Beton bewehrt	19,90 €	20,88 €	21,85 €	0,98 €	2
Ziegel	14,90 €	14,90 €	14,90 €	0,00 €	1
Altholz unbehandelt (A1)	15,00 €	15,00 €	15,00 €	0,00 €	1
Altholz unbehandelt (A2)	22,00 €	22,00 €	22,00 €	0,00 €	1
Altholz unbehandelt (A3)	25,00 €	25,00 €	25,00 €	0,00 €	1

4.7 Fazit

Die Auswertungen haben gezeigt, dass alleine die Kosten für Rohstoffbereitstellung, Aufbereitung und Deponierung innerhalb des gleichen Bezugsraums einer großen Bandbreite unterliegen. Hier zeigt sich nochmals die Notwendigkeit einer zukünftigen Betrachtung von Stoffkreisläufen auf regionaler und lokaler Maßstabsebene. Der Fokus auf die nationale Ebene, auf der ein Großteil der erhobenen Daten und Betrachtungen basieren, ist zu großflächig um regional gehandelte Stoffe ausgiebig zu analysieren.

Durch eine lokalere Betrachtung und Datenbereitstellung können gezielt Standortentscheidungen für Unternehmen der Wertschöpfungskette Bau getroffen werden. Ebenso können Ladepunkte in Logistiknetzwerken strategisch positioniert werden. Durch eine Abstimmung regionaler Anlagenkapazitäten und der einzelnen Akteure (Kapitel 7), kann eine ortsnahe und zielgerechtere Verwertung von Baustoffen und Bauabfällen forciert werden.

5 Einfluss der Gebäude bei der Erfassung und Steuerung von Stoffströmen

Im vorherigen Kapitel wurden die Notwendigkeit und Potenziale der Erstellung eines flächendeckenden Rohstoffkatasters für Gebäude anhand von 3D-Stadtmodellen aufgezeigt. Der nächste Baustein im Modell ist die Zusammenführung und Verknüpfung der Gebäude- und der urbanen Ebene. Dieses Kapitel befasst sich mit der quantitativen und qualitativen Erfassung und Steuerung von Stoffströmen von Wohngebäuden über den gesamten Lebenszyklus, der in Kapitel 2 beschrieben wird.

Als erster Schritt wird eine Methode beschrieben, um die stoffliche Zusammensetzung des Wohngebäudebestands abzubilden. Darauf basierend, wird die Modellierung der dynamischen Prozesse (u. a. Sanierung, Instandhaltung, Rückbau, Neubau und Ersatzneubau) dargestellt und in das Gesamtmodell integriert (Abbildung 69).

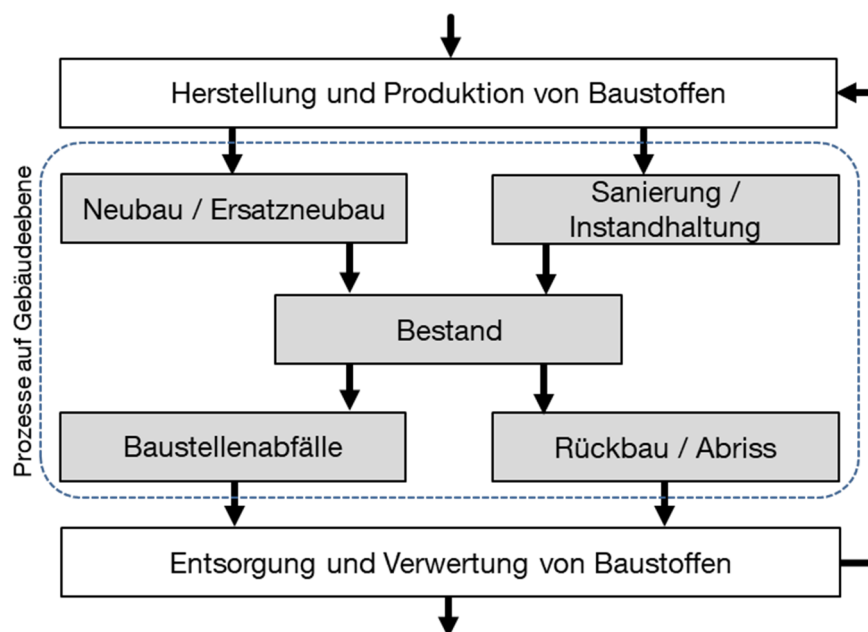


Abbildung 69: Hauptmodule des dynamischen Stoffstrommodells auf der Gebäudeebene

Neben der stofflichen Zusammensetzung (Rohstoffe und Problemstoffe), wird die Ermittlung der benötigten Eingangsgrößen (z. B. Gebäudegeometrien; Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen, Baustoffen und Gebäuden; und dynamische Entwicklung) beschrieben.

Die Darstellung der dynamischen Entwicklung und Verteilung von Rohstoffen nach Baualter und Gebäudeklasse bietet die Basis um zukünftige Entwicklungen aufzuzeigen.

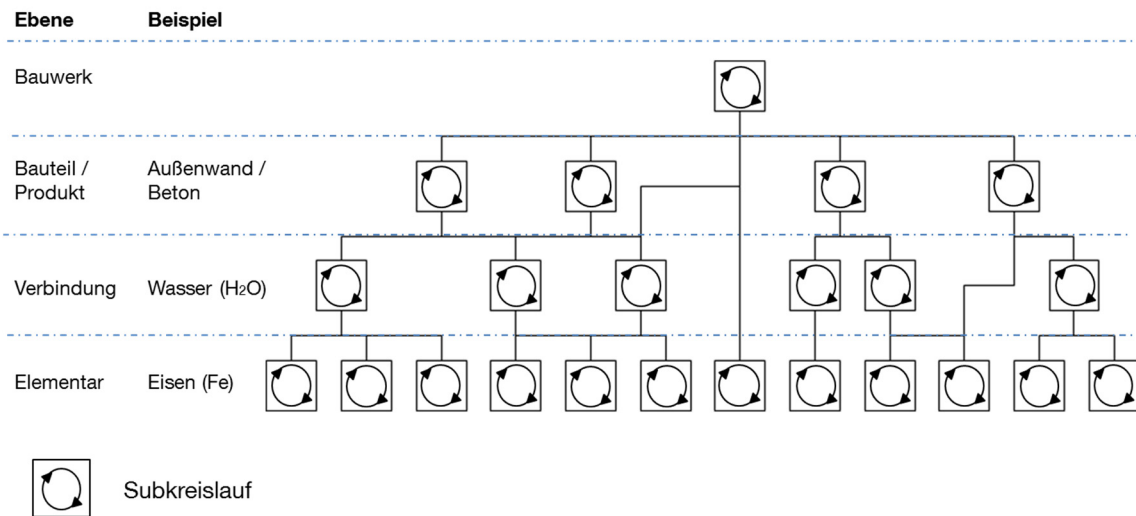


Abbildung 70: Hierarchische Aufteilung der Stoffströme in Subkreisläufe

Neben der Bauwerksebene (bzw. Gebäudeebene) ist es nötig, bei Bedarf weitere Sub-Ebenen (z. B. Bauteil-, Elementebene) zu bilden, um den Bestand abzubilden. Ein Gebäude setzt sich beispielsweise aus Bauteilen zusammen, die wiederum aus Baustoffen (z.B. chemischen Verbindungen und Elementen) bestehen. Jede der einzelnen Positionen (z. B. Stoffe) der jeweiligen Hierarchiestufen, besitzt einen eigenen Kreislauf, der im Gesamtkontext als Subkreislauf zu sehen ist. Als Beispiel: Das chemische Element Eisen (Fe) oder die chemische Verbindung Wasser (H₂O) besitzen jeweils ihren eigenen Kreislauf, werden aber durch benachbarte Prozesse und Kreisläufe beeinflusst (Abbildung 70). Der Wasserkreislauf (H₂O) beispielsweise beeinflusst die Stoffströme von Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O).

In Gebäuden ist die Mehrzahl der Elemente aus dem Periodensystem in unterschiedlicher Form und Verbindung zu finden. Demnach üben Gebäude auch einen bedeutenden Einfluss auf eine Vielzahl von Stoffkreisläufen aus.

Es existieren bereits einige Ansätze, um die stoffliche Zusammensetzung von Gebäuden zu ermitteln. Im Buch *Trümmerverwertung* wurden bereits nach dem 2. Weltkrieg Untersuchungen zur Zusammensetzung von Gebäuden unternommen, um den Wiederaufbau schnell und effizient durchzuführen (Abbildung 71) (Wedler und Hummel 1947). Neben stofflichen Gebäudesteckbriefen, werden dort auch Wirtschaftlichkeitsberechnungen zu unterschiedlichen Aufbereitungstechnologien beschrieben. Übergeordnetes Ziel war die Zusammenfassung und der Austausch von Erfahrungen, um bundesweit einheitliche Grundlagen zum Wiederaufbau zu schaffen.

Im Forschungsvorhaben *Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen*, das im Rahmen der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ durchgeführt wurde, beschreiben die Autoren den Aufbau eines dynamischen Gebäudebestandsmodells für Deutschland. Die Studie hatte zum Ziel, die Entwicklungen von Stoffströmen im Bereich Bauen und Wohnen quantitativ zu belegen, um Steuergrößen und entsprechende Instrumente zur Veränderung der Entwicklung erkennen und benennen zu können. Die Studie beruht auf einer

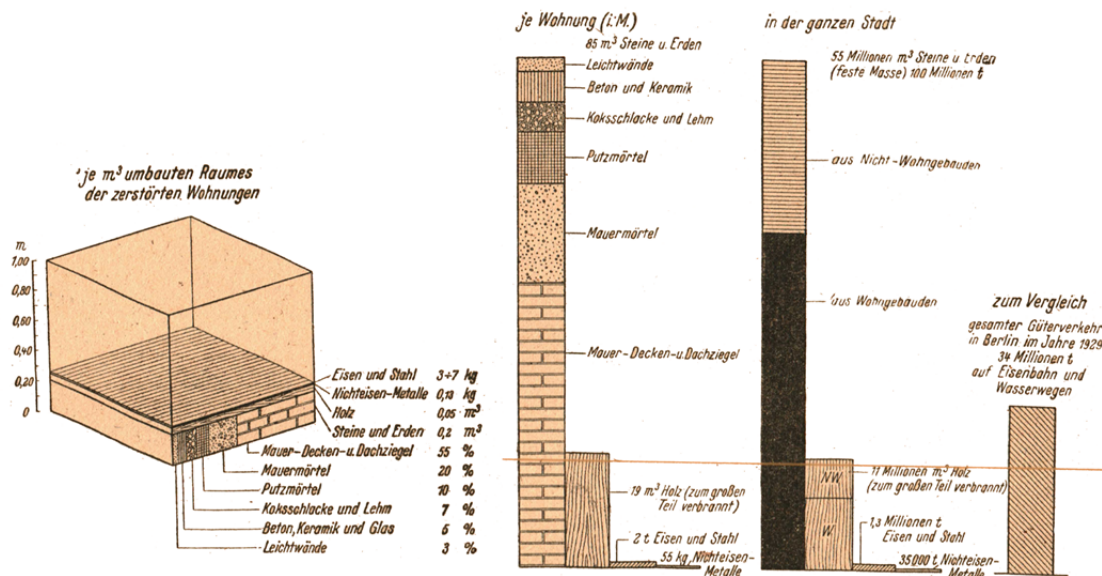


Abbildung 71: Menge und Zusammensetzung der Trümmer von Wohngebäuden (links) Gesamt Zusammensetzung der Trümmer in Berlin (rechts) (Wedler und Hummel 1947, S. 10, 14)

Kombination von makroökonomischen Stoffflussanalysen und einem dynamischen Lebenszyklusmodell des Gebäudebestands. Insgesamt wurden im Projekt 160 Referenzgebäude mit rund 2250 Bauelementen und rund 700 Baustoffen erfasst (12 Nutzungs- und 6 Altersklassen) (Kohler et al. 1999). Als Bezugsgröße wurden m² Nutzfläche (m² NF) gewählt, um anhand von amtlichen Gebäudestatistiken Hochrechnungen durchzuführen.

Im Projekt *Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe* vom Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) wurden mithilfe eines Baustoffberechnungsprogramms zehn Mehrfamilienhäuser der Baujahre 1880-1990 und acht Einfamilienhäuser (1960-1990) der neuen Bundesländer (NBL) anhand der stofflichen Zusammensetzung dargestellt. Als Basis diente der *Gebäudeatlas – Mehrfamilienwohngebäude der Baujahre 1880 bis 1980* (Schulze 1990), der auf einer Analyse von 910 Wohngebäuden der Neuen Bundesländer (NBL) der entsprechenden Baujahre aufgebaut ist. Bei der stofflichen Gebäudezusammensetzung wurden die Massen (t) der einzelnen Bauteile, sowie in 10 Baustoffgruppen erfasst. Durch die Erfassung der Gebäudeflächen wurden Stoffintensitäten (t/m² Hauptnutzungsfläche [HNF] und t/m³ Bruttorauminhalt [BRI]) auf Bauteil- und Baustoffebene berechnet (Gruhler et al. 2002).

In einem Anschlussprojekt des IÖR – *Auswirkungen des demographischen Wandels auf das Stofflager und die Stoffflüsse des Wohnbestands* – wurden weitere Untersuchungen zur stofflichen Zusammensetzung von Wohngebäuden durchgeführt und auf die gesamte Bundesrepublik ausgeweitet (Gruhler und Böhm 2011). Dabei wurde auf Objekte der BKI Datenbank und einer eigens entwickelten Gebäudedatenbank zurückgegriffen.

Mit der stofflichen Zusammensetzung von ausgewählten Nichtwohngebäuden (NWG), beschäftigt sich das Projekt *Materialaufwand von Nichtwohngebäuden* des IÖR. Anhand der Auswertung von Objekten der BKI-Datenbank werden synthetische NWG erstellt und charakteristische Material-, Flächen- und Volumen-Kennwerte gebildet

(Gruhler und Deilmann 2015). Insgesamt wurden 252 BKI-Objekte unterschiedlichen Baujahrs ausgewertet und in acht typologische Gruppen unterteilt.

Diese Studie bemisst die materielle Zusammensetzung von NWG mit 1,1 bis 3,2 t/m²_{NF}. Das berechnete Lager des Deutschen NWG Bestands ergibt rund 6,8 Mrd. t. (84 t/Einwohner), wobei Handels- und Lagergebäude mit 39 % der Materialmasse den größten Anteil haben (Fabrik- und Werkstadtgebäude: 23 %; Büro- und Verwaltungsgebäude 15 %). Zum Vergleich: Das Wohngebäudelager hat eine Größenordnung von ca. 8,4 bis 9,3 Mrd. t (104 bis 115 t/Einwohner) (Gruhler und Deilmann 2015, S. 144). Damit sind im Durchschnitt rund 195 t/Einwohner im Deutschen Gebäudebestand gebunden. Das Ergebnis der Studie sind eine solide Datenbasis und Steckbriefe zu einzelnen NWG-Typen, die für weiterführende Berechnungen verwendet werden können.

Die oben beschriebene Datenbasis bildet eine der Grundlagen, um im Projekt *Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft (KartAL)* des Umweltbundesamts (Schiller et al. 2015) Hochrechnungen zum Bauwerksbestand der Bundesrepublik durchzuführen.

Das übergeordnete Ziel von *KartAL* bildet die Basis für den Aufbau eines fortschreibbaren Datenbankmodells, des anthropogenen Lagers. Neben Bauwerken (Hochbau, Tiefbau und Haustechnik) werden auch ausgewählte langlebige Konsum- und Kapitalgüter mit der Systemgrenze Deutschlands inventarisiert. Allerdings werden keine Aussagen zu regionalen und urbanen Aspekten gemacht - d.h. wo (geographisch) sind diese Stoffe verbaut?

Um diese Frage zu beantworten, wird im Rahmen dieser Arbeit auf den oben genannten Studien unter Verwendung der bereits geschaffenen Datenbasis zur stofflichen Gebäudezusammensetzung aufgebaut.

Neben den beschriebenen Erfassungsmethoden können folgende Methoden eingesetzt werden, um die Datenbasis bezüglich der stofflichen Zusammensetzung zu erweitern:

- Datenauswertung von Abbruchmaßnahmen und gezielte Erfassung von Bauabfällen
- Ökobilanzstudien, die beispielsweise auch Bestandteil von Gebäudezertifizierungen (z. B. DGNB, BNB) sind
- Leistungsverzeichnisse und detaillierte Endabrechnungen von Baumaßnahmen
- Auswertung der Datenbank des Baukosteninformationszentrums Deutscher Architekten (BKI)
- Materielle Erfassung und Bauteil-Beprobung vor Ort
- Erfassung anhand von Bestandsplänen und Bauakten
- Auswertungen von Abbruchkonzepten und Schadstofferkundungen
- Auswertungen von angefallenen Abbruchmassen aus Gebäudeabbrüchen
- Abschlussrechnungen von Bauanträgen

Im Projekt *PILAS* zur Entwicklung eines Konzepts für einen materiellen Gebäudepass der Technischen Universität Wien schlagen die Autoren zwei sich ergänzende Erfassungsmethoden vor (Markova und Rechberger 2011, S. 70). Die Methode ist für den Neubau konzipiert, dennoch ist eine Übertragbarkeit auf Bestandsgebäude möglich, sofern es die Datenlage erlaubt. Für die Dokumentation von **qualitativen Aspekten** wird eine Aufteilung in Gewerke (Rohbau, Fundament, Ausbau, Haustechnik,

etc.) empfohlen (top-down). Im ersten Schritt wird die Geometrie der Bauteile erfasst. Um eine spätere Materialkreislaufführung zu gewährleisten, muss die Trennbarkeit der einzelnen Bauteile und Bauteilschichten bewertet werden.

Die **quantitative Erfassung** (bottom-up) setzt auf der Material- und Bauwerksebene an. Den einzelnen Materialpositionen werden geometrische- und Gewichtsgrößen zugeordnet, um die Materialmenge zu berechnen. Anschließend werden die einzelnen Positionen summiert, um den Materialeinsatz zu ermitteln (Markova und Rechberger 2011, S. 72).

Diese Methodik erscheint bei einer Betrachtung einzelner Gebäude, die ausreichend dokumentiert sind, sinnvoll. Bei einer Betrachtung von Gebäudegruppen und um Hochrechnungen auf den Bestand durchzuführen ist sie allerdings nur bedingt einsetzbar, da der Erfassungsaufwand zu aufwendig ist. Dennoch ist eine Untergliederung der Bestandsgebäude in einzelne Gewerke (z. B. Dachbedeckung, Fenster, Konstruktion u.a.) sinnvoll, da beispielsweise Abbruchmaßnahmen auf diesen basieren.

Es hat sich gezeigt, dass eine Untergliederung nach DIN 276 nur bedingt sinnvoll ist, da in den einzelnen Gewerken unterschiedliche Stoffe verwendet werden, die sich mit anderen Gewerken überschneiden. So werden beispielsweise Metalle und Holzwerkstoffe in einer Vielzahl von Gewerken eingesetzt. Abbildung 72 zeigt beispielhaft die gewählten Baustoffgruppen nach Kostengruppe (KG) sortiert, um die stofflichen Überschneidungen aufzuzeigen.

Neben einer Einteilung in Baustoffgruppen ist in dieser Arbeit eine typologische Einteilung der Gebäude notwendig. Das Gebäudebaugebiet und der Gebäudetyp sind dabei von maßgeblicher Bedeutung, da Gebäude in den jeweiligen Gruppen (z. B: MFH Baujahr 1949-78) ähnliche Eigenschaften aufweisen. Diese werden den korrespondierenden Stoffintensitäten zugewiesen und mit den Gebäudegeometrien aus dem 3D-Stadtmodell verknüpft.

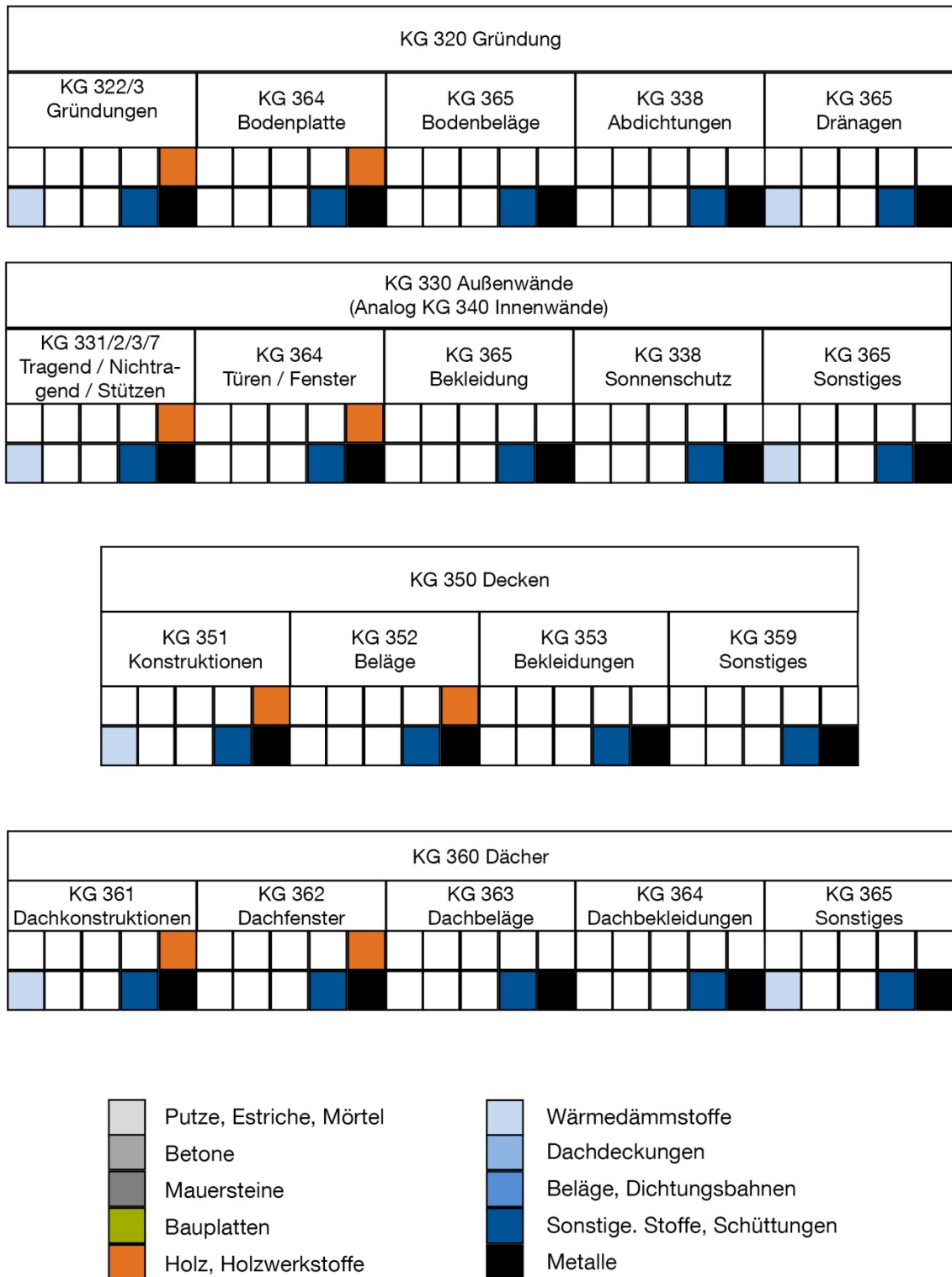


Abbildung 72: Zuordnung der Baustoffgruppen zu den Kostengruppen 300

5.1 Typologische Kategorisierung

Durch seine Heterogenität lässt sich der Gebäudebestand als eine Ansammlung von Unikaten unterschiedlichen Baualters bezeichnen. Um unrealistisch aufwändige Erhebungen vor Ort auszuschließen, ist es erforderlich im Rahmen einer stofflichen- und energetischen Betrachtung Gebäudetypologien zu bilden, um den Bestand, trotz seiner Vielfältigkeit, Differenziertheit und Größe, treffend zu charakterisieren, sowie transparent und nachvollziehbar abzubilden. Die Gebäudetypologie stellt eine gezielte Auswahl von Gebäudetypen zur Repräsentation homogener Teilgesamtheiten dar. Die Typologie ist kein zufälliges, sondern ein bewusstes Auswahlverfahren, um eine Verallgemeinerung der Ergebnisse zu ermöglichen (Gruhler et al. 2002, S. 17).

Um Hochrechnungen durchzuführen und dynamische Prozesse des Bestands darzustellen, sollten die Typologien mit den amtlichen Statistiken kompatibel sein (z. B. DESTATIS). Dies ist allerdings nur bedingt möglich, da Destatis eine abweichende Einteilung verwendet.

Kohler beispielsweise sieht die Abbildung komplizierter Baubestände mit Hilfe von Typologien kritisch. Typologische Ansätze bilden jeweils nur einen einzelnen Aspekt idealtypisch nach (z. B. energetische Einteilung, Konstruktionsweisen, regionale Besonderheiten). Zusammenhänge zwischen verschiedenen Gesichtspunkten können durch Typologien nicht abgebildet werden. Ein umfassendes Modell des Gebäudebestands muss daher Schnittstellen besitzen, um die Stoff- und Energieflüsse, Kosten etc. durchgängig und über mehrere Stufen (Baustoffe, Bauleistungen, Elemente, Räume, Gebäude, Teilbestände) ausweisen zu können. Ebenso müssen Veränderungen des Bestands nachvollziehbar abgebildet werden (Hassler et al. 1999, S. 30).

Durch die historische Veränderung von Konstruktionsweisen ist es unabdingbar, Gebäude nach unterschiedlichen Merkmalen, insbesondere nach Baujahr und Gebäudetyp, einzuteilen.

5.1.1 Gebäudeklassen Wohngebäude

In jeder Bauepoche sind allgemein übliche Konstruktionen und Bauteilgeometrien (z.B. Anteil der Fensterflächen an Fassaden, Wandstärken u. a.) zu finden. Die Klassifizierung der Bauteilklassen orientiert sich an historischen Einschnitten, den Zeitpunkten statistischer Erhebungen, sowie an den Veränderungen der wärmetechnisch relevanten Bauvorschriften (Loga et al. 2015, S. 10).

Das Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) stellt eine Einteilung des Deutschen Wohngebäudebestands nach Baualter und Baualtersklasse zur Verfügung. Diese Entwicklung war Teil eines Auftrags der Enquete-Kommission des deutschen Bundestages „Schutz der Erdatmosphäre“, um Energieeinsparpotenziale durch Wärmeschutzmaßnahmen aufzuzeigen (Diefenbach et al. 2010). Das Baualter liefert nicht nur Aufschluss bei energetischen Untersuchungen, sondern auch zu rohstoffrelevanten Themen (z.B. Hinweise zu Materialart, Bauteilaufbauten und Bauteildicke).

Im Projekt *Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe* vom Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) greifen die Autoren auf eine Typologie der neuen

Bundesländer zurück, die sich auf Ein- und Mehrfamilienhäuser bezieht (Gruhler et al. 2002, S. 19). Um auf regionale Eigenheiten einzugehen ist es nötig, auf regionale Typologien und Daten zurückzugreifen. Die Typologien wurden später auf Westdeutschland erweitert.

Eine Übersicht der Vielzahl von europäischen, nationalen und regionalen Wohngebäudetypologien ist der Studie des IWU zu entnehmen (Loga et al. 2015, S. 7f). Der überwiegende Fokus der gebildeten Typologien liegt auf energetischen Betrachtungen.

In dieser Arbeit wird auf die Gebäudeklassen des IÖR zurückgegriffen, da bereits eine repräsentative Datenbasis zur stofflichen Gebäudezusammensetzung erstellt worden ist. In der Typologie wird zwischen Einfamilien- (EFH) und Mehrfamilienhäusern (MFH) und West- und Ostdeutschland unterschieden. Ein EFH hat demnach 1-2 Wohneinheiten (WE) ein MFH, drei oder mehr WE. Eine Einteilung der Gebäude in folgende Baualtersklassen wurde getroffen:

- bis 1918
- 1919 – 1948
- 1949 – 1978
- 1979 – 1990
- 1991 – 2000
- 2001 – 2010
- nach 2011 (Neubau)

Weitere Vorteile dieser Typologie bieten die Überschneidungen zur Typologie des IWU. Diese Schnittstellen erlauben eine zukünftige Erweiterung dieses Modells mit energetischen Fragestellungen.

Als Basis für die Durchführung energetischer Sanierungsmaßnahmen von Gebäuden existiert eine Vielzahl von Werken, die sich mit typischen Bauteilaufbauten, insbesondere der wärmeübertragenden Hülle befassen. In den meisten Fällen wird eine Unterscheidung anhand der Baualtersklasse gemacht, aber auch regionale Unterschiede werden beschrieben. Im Folgenden werden zwei Untersuchungen genannt, die als zusätzliche Datenbasis genutzt werden können.

5.1.1.1 Altbauatlas – Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB)

Der Altbauatlas mit etwa 800 Datensätzen führt regionaltypische Materialien und Konstruktionen im Gebäudebestand auf (Klauß und Kirchhof 2010). Es erfolgt eine Klassifizierung des deutschen Wohngebäudebestandes nach energetischen Kriterien. Die Bauteilaufbauten der wärmeübertragenden Hülle (Dach, Oberste Geschossdecke, Kellerdecke, Bodenplatte und Außenwände) sind nach Baualtersklassen gegliedert, die mit denen des IWU übereinstimmen.

Eine Verwendung dieser regionaltypischen Bauteilaufbauten als ergänzende Datenbasis wird als sinnvoll erachtet, da zwischen den jeweiligen Regionen Unterschiede bestehen können. Die Datenbasis dieser Arbeit ist nicht auf eine stoffliche Betrachtung ausgelegt, da der Fokus auf der energetischen Sanierung basiert. Zukünftig könnte der Katalog diesbezüglich erweitert werden.

5.1.1.2 Institut für Bauforschung e.V. Hannover – U-Werte alter Bauteile

Das Institut für Bauforschung Hannover stellt mit seinem Katalog eine weitere Datenbasis zur Verfügung (Böhmer et al. 2010). Typische Konstruktionsaufbauten der wärmeübertragenden Hülle von Wohngebäuden werden nach Gebäudeklasse und Baualter unterschieden. Der Zweck dieses Katalogs liegt ebenfalls auf einer energetischen Betrachtung (insb. Sanierung). Ebenso wenig steht eine regionale Betrachtungsweise im Fokus. Dennoch kann diese Datenbasis verwendet werden, um Anhand der Bauteilaufbauten Aussagen zur stofflichen Beschaffenheit zu machen und um andere Kataloge zu ergänzen.

Je nach Gebäudeklasse und Baualter sind unterschiedliche Konstruktionsaufbauten ausgewiesen. Allein für Wohngebäude des Baualters 1949 bis 1978 wurden 24 verschiedene Bauteilaufbauten der Außenwände dargestellt. Dies veranschaulicht nochmals die Heterogenität der Gebäude.

Neubauten und Nicht-Wohngebäuden (NWG) werden hingegen nicht betrachtet. Es ist aber davon auszugehen, dass die Bauteilaufbauten von NWG vielfältiger sind als bei Wohngebäuden (WG).

5.1.2 Gebäudeklassen Nichtwohngebäude

Bei NWG sind in der Literatur und der statistischen Erfassung mehrere typologische Ansätze zu finden. Über den Umfang und die Zusammensetzung von NWG ist im Gegensatz zu Wohngebäuden nur wenig bekannt. Niklaus Kohler nennt drei Gründe warum dieser Anteil des Bestands von oft größerem Interesse ist (Hassler et al. 1999, S. 29).

- Es zeigen sich große Veränderungen.
- Der Bestand ist inhomogen und von sehr unterschiedlicher Qualität.
- NWG stellen ein enormes Stofflager dar.

Eine Grundlage aktueller Typologien im NWG-Bestand bietet der Bauwerkszuordnungskatalog. Das Statistische Bundesamt, das BKI und die IÖR Typologie lehnen sich an diese Gliederung an (Gruhler und Deilmann 2015, S. 9).

NWG umfassen rund 44 % der Gesamtmasse des Gebäudebestands in Deutschland (Ortlepp et al. 2015, S. 6) (13 % nach Anzahl der Gebäude; 31 % nach Gebäudefläche) (Bigalke et al. 2014, S. 10f). Daher muss diesem Anteil, trotz geringer Datenlage, Aufmerksamkeit geschenkt werden. Eine Auflistung internationaler Studien zur stofflichen Zusammensetzung von Gebäuden, sowie einer Auflistung der unterschiedlichen NWG Typologien ist der Studie von Ortlepp et al. zu entnehmen (Ortlepp et al. 2015).

Das Projekt: *Materialaufwand von Nichtwohngebäuden* von Gruhler und Deilmann (Gruhler und Deilmann 2015) nutzte diese Typologien, um stoffliche Steckbriefe für NWG zu entwickeln.

NWG werden in dieser Arbeit nur eingeschränkt betrachtet. Dennoch lässt sich die hier entwickelte Methodik übertragen. Durch die derzeit unzureichende Datengrundlage wurde auf eine Einbindung ins Stoffstrommodell verzichtet. Der Aufbau gestattet es allerdings, NWG zukünftig zu integrieren.

5.2 Stoffliche Zusammensetzung von Wohngebäuden im Bestand

Die Art der Konstruktion spielt eine entscheidende Rolle, in der materiellen Zusammensetzung von Gebäuden. Im Holzbau werden beispielsweise andere Bauteilaufbauten und Stoffe verwendet, als für Stahl oder Ziegelbauten. Holzbauten sind tendenziell auch leichtere und ressourcenschonendere Konstruktionen.

Daten zur Art der Konstruktion (nach überwiegend verwendetem Baustoff), werden seit 1980 vom Statistischen Bundesamt erfasst. In der Statistik werden EFH, MFH und NWG separat erfasst. Diese Daten bieten den Vorteil, dass je nach Baualtersklasse, der stoffliche Anteil abgeleitet werden kann. Eine eigene Auswertung der statistischen Daten wird in Abbildung 73 bis Abbildung 75 aufgezeigt.

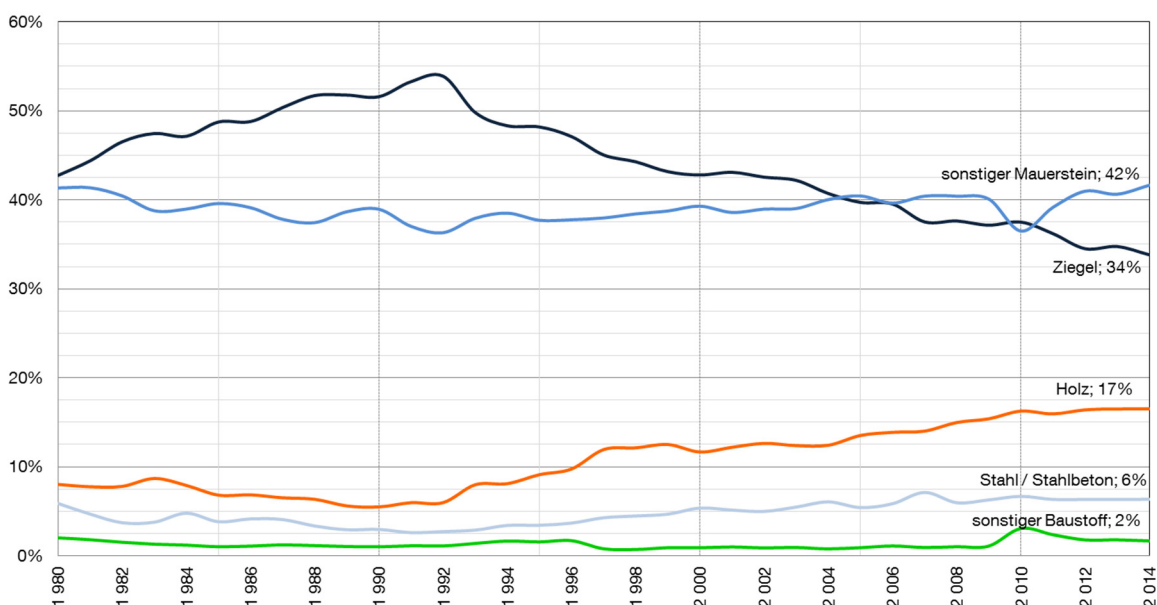


Abbildung 73: Einfamilienhäuser - Erteilte Baugenehmigungen nach überwiegend verwendetem Baustoff bezogen auf den umbauten Raum (Eigene Auswertung nach Destatis 2015)

Bei EFH stehen nach wie vor mineralische Baustoffe (Mauerstein, Ziegel) im Vordergrund. Der Anteil betrug 2014 rund 76 %. Seit 1990 stieg der Anteil an Holzkonstruktionen von 5 % auf 17 % (2014). Der Stahl- und Stahlbetonbau spielt bei EFH eine eher untergeordnete Rolle.

Bei MFH hat der Stahl- und Stahlbetonanteil seit 2000 deutlich zugelegt, mit einem Neubauanteil von 28 % in 2014. Mauerstein stellt nach wie vor den überwiegend verwendeten Baustoff dar. Die Verwendung von Ziegeln ist hingegen seit 1990 stark rückläufig und der Holzbau spielt zum heutigen Zeitpunkt eine untergeordnete Rolle.

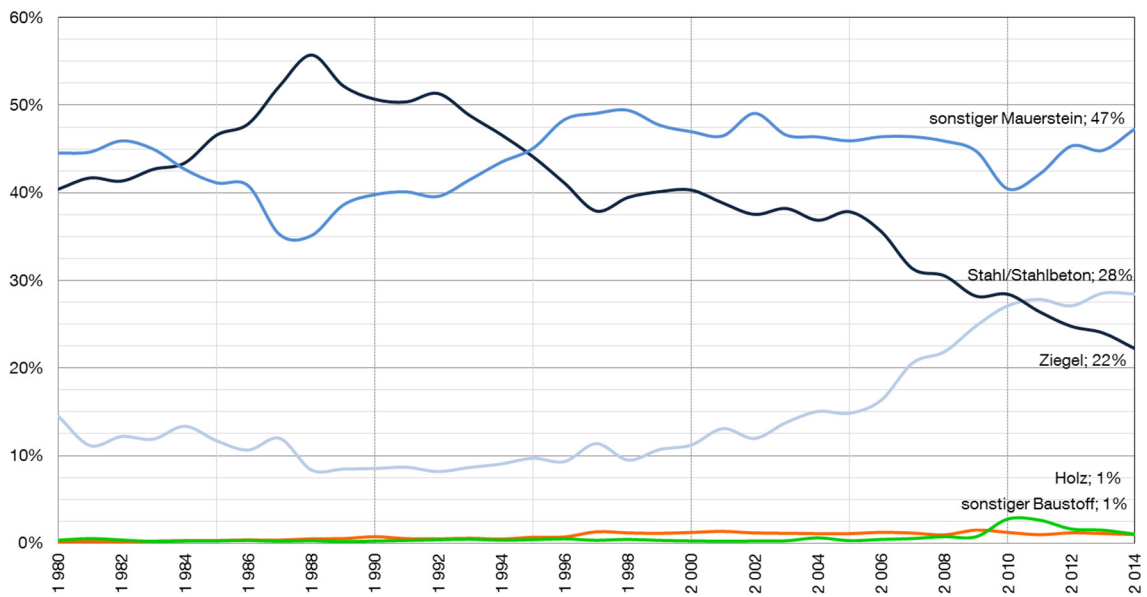


Abbildung 74: Mehrfamilienhäuser - Erteilte Baugenehmigungen nach überwiegend verwendetem Baustoff bezogen auf den umbauten Raum (Eigene Auswertung nach Destatis 2015)

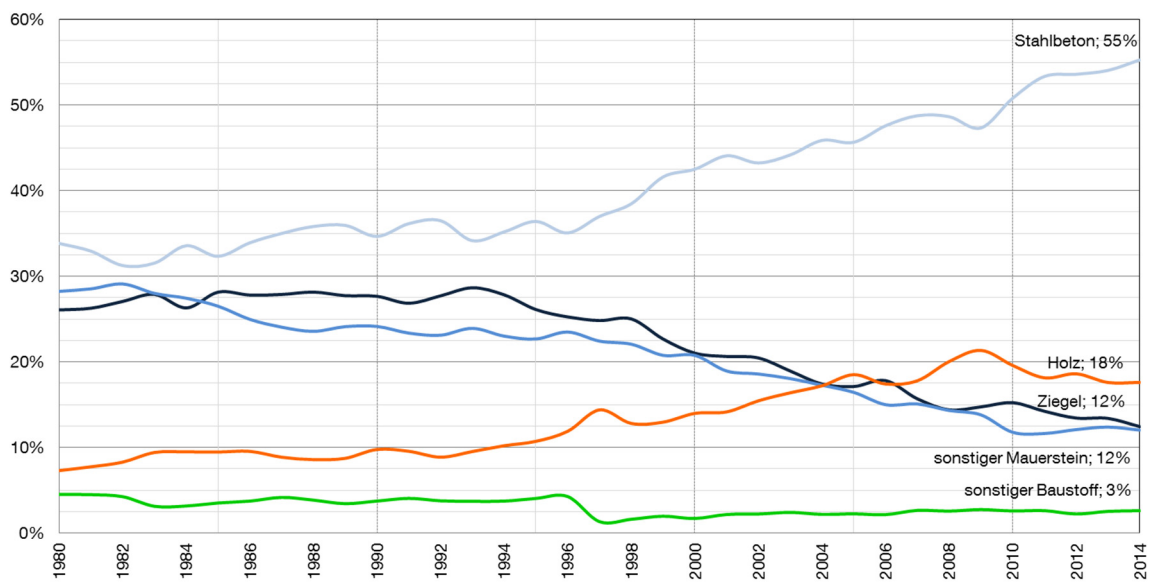


Abbildung 75: Nichtwohngebäude - Erteilte Baugenehmigungen nach überwiegend verwendetem Baustoff bezogen auf den umbauten Raum (Eigene Auswertung nach Destatis 2015)

Zum Vergleich: Bei NWG wird zunehmend mit Holzwerkstoffen gebaut. Der Anteil lag 2014 bei 18 %. Überwiegend werden NWG in Stahl und Stahlbetonbauweise gebaut - mit ansteigender Tendenz. 2014 wurden 55 % des umbauten Raums von NWG aus diesen Baustoffen genehmigt. Ziegel und Mauerstein sind hingegen rückläufig.

Diese Statistik weist lediglich die erteilten Baugenehmigungen aus. Daher ist nicht gegeben, dass ein Gebäude im gleichen Zeitraum bzw. überhaupt gebaut wurde. Diese Werte können als Anhaltspunkt verwendet werden, um eine Übersicht zur zeitlichen Veränderung der Konstruktionsart zu bekommen. Die Statistik mit fertiggestellten Gebäuden, weist eine ähnliche Verteilung auf. Allerdings reicht diese nur bis 1990 zurück.

Wie bereits erwähnt, wird in dieser Arbeit auf die umfangreiche Datenbasis der IÖR zurückgegriffen. Durch den Aufbau einer umfassenden Gebäudedatenbank zur stofflichen Zusammensetzung wurden für die jeweiligen Baualtersklassen (z. B. bis 1919) und Gebäudetypen (z. B. Einfamilienhaus), synthetische Gebäude (Gebäuderepräsentanten der jeweiligen Epochen) gebildet. Die Kategorien repräsentieren die vorherrschenden Bauweisen, Baukonstruktionen und Baustoffe. Anhand der Kategorien (Baualter und Gebäudetyp) wurden Einschätzungen getroffen, zu welchen Anteilen, geeignete Gebäuderepräsentanten jeweils vertreten sind. Hier wurde deutlich, dass die jeweiligen Schätzanteile keine nennenswerte Auswirkung auf die stoffliche Zusammensetzung der synthetischen Gebäudetypen hatten (Gruhler und Böhm 2011, S. 8).

5.2.1 Einteilung der Baustoffgruppen

Um die Kompatibilität der Daten zu gewährleisten, wurde die Einteilung der Baustoffgruppen des IÖR übernommen. Diese Einteilung wird als sinnvoll erachtet, da neben einer stofflichen und konstruktionsbedingten Einteilung auch die Rückbauschriffe und Getrennthaltungspflicht von Bauabfällen bei einem Gebäuderückbau berücksichtigt werden (z. B. Rückbau der Dachbedeckung). Auf folgende Gruppierung wird zurückgegriffen:

- Metalle
- Sonstige Stoffe, Schüttungen
- Beläge, Dichtungsbahnen
- Dachdeckungen
- Wärmedämmstoffe
- Holz, Holzwerkstoffe
- Bauplatten (z. B. Fliesen, Gipskarton)
- Mauersteine
- Betone
- Putze, Estriche und Mörtel (PEM)

Im Laufe der Arbeit werden bestimmte Gruppen weiter unterteilt, um ein detaillierteres Bild der stofflichen Zusammensetzung zu bekommen. Beispielsweise werden Metalle durch die Verwendung zusätzlich erhobener Daten (z. B. aus Kapitel 3 sowie eigene Erhebungen der stofflichen Gebäudezusammensetzung), in weitere Fraktionen unterteilt (z. B. Kupfer, Zink, Aluminium und Stahl).

Ebenfalls werden ergänzende Untersuchungen (z. B. Leitungsnetze und Fensterflächenanteile) in die Betrachtung miteinbezogen, um die Datenbasis diesbezüglich zu erweitern.

5.2.2 Stoffliche Zusammensetzung von Einfamilienhäusern im Bestand

Die Datenbasis des IÖR unterscheidet bei den synthetisch gebildeten EFH, zwischen vier baualtersklassenbezogenen Gebäudetypen. Bei den Neubauten ab 2011 wurden zum Teil weitere Gebäudetypen neu generiert. Dabei wurde auf zukünftige Entwicklungen (z. B. Anteile von Konstruktionsweisen und Baustandards) zurückgegriffen. Folgende Einteilung wurde getroffen:

- bis 1960
- 1961 - 1990
- 1991 - 2010
- nach 2011 (Neubau)

Für das in dieser Arbeit entwickelte Stoffstrommodell wurde die stoffliche Zusammensetzung der Gebäudetypen auf den BRI (m^3) bezogen. Dies ermöglicht eine Verknüpfung der stofflichen mit den geometrischen Daten des 3D-Stadtmodells (Abbildung 76).

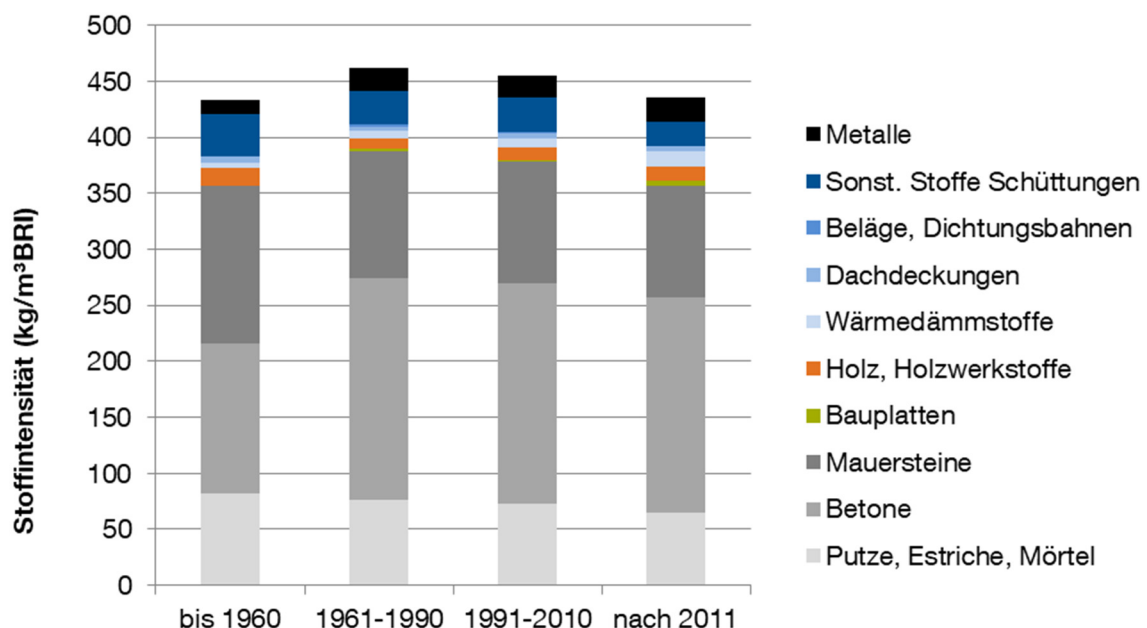


Abbildung 76: Stoffliche Zusammensetzung synthetischer EFH (In Anlehnung an Gruhler und Böhm 2011, S.62-78)

Bei EFH mit Baujahr 1961-1990 ist im Vergleich zur vorherigen Epoche ein Anstieg der Stoffintensität zu verzeichnen. Dabei ist der Wandel von Mauersteinen zu Konstruktionen aus Beton (z. B. Stahlbeton) ausschlaggebend. Nach diesem Zeitraum

geht die Gesamtstoffintensität weiter zurück, was auf die Reduzierung von mineralischen Baustoffen zurückzuführen ist. Dies liegt unter anderem an dem vermehrten Einsatz von Leichtbetonen und einer Erhöhung des Holzkonstruktionsanteils (Abbildung 73). Im Gegenzug ist ein Anstieg bei Wärmedämmstoffen, Holzwerkstoffen und Metallen zu erkennen. Begründet werden kann dies durch einen höheren Dämmstandard.

5.2.3 Stoffliche Zusammensetzung von Mehrfamilienhäusern im Bestand

Bei den MFH werden die synthetischen Gebäudetypen des IÖR in insgesamt sechs Baualtersklassen eingeteilt (Abbildung 77). Die Gebäude vor 1949 weisen im Vergleich zu anderen Baualtersgruppen einen erhöhten Mauerwerksanteil auf. Nach 1949 wurde das Mauerwerk zunehmend durch Beton ersetzt. Ab diesem Zeitpunkt ist auch ein Anstieg an Metallen zu verzeichnen, der überwiegend auf den vermehrten Einsatz von Stahlbeton und eine aufwendigere Anlagentechnik zurückzuführen ist.

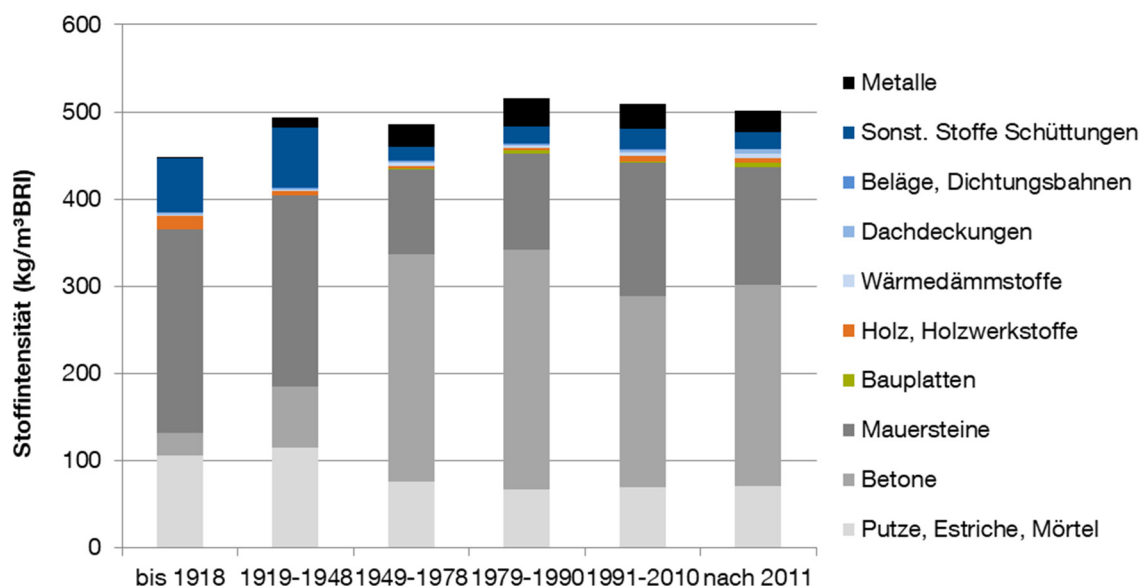


Abbildung 77: Stoffliche Zusammensetzung synthetischer MFH (In Anlehnung an Gruhler und Böhm 2011, S.62-78)

Zwischen 1991 und 2010 steigt der Mauerwerksanteil wieder leicht an und der Betonanteil ist rückläufig. Der Anteil an Stahlbetonkonstruktionen (bemessen am nationalen Durchschnitt) steigt seit 2000 ebenfalls an (Abbildung 74). Dieser Widerspruch kann unter anderem auf den erhöhten Einsatz von Leichtbeton zurückzuführen sein. Durch die leichter werdende Konstruktion kann auch die Masse des Fundaments und Bodenplatte (Stahlbeton) reduziert werden, was den leichten Rückgang der Metalle (z. B. Bewehrung) erklärt.

Bei den Baualtersklassen nach 2011 ist ein weiterer Anstieg an Stahlbetonbauten bei MFH zu verzeichnen. Ebenso hat sich der Anteil an Bauplatten (z.B. Gipskarton, Faserzement u.a.) nahezu verdoppelt. Der Anteil an Holzkonstruktionen bei MFH in

Deutschland, in Vergleich zu EFH, spielt weiterhin eine untergeordnete Rolle (Abbildung 74).

Zur Berechnung der Neubauten wurde bei EFH und MFH die Stoffintensität nach Wohneinheiten (WE) aufgeführt. Dies ist dadurch begründet, dass zukünftige Bauvorhaben oft in dieser Größeneinheit bemessen werden und das Neubauvolumen nicht immer bekannt ist. Dies führt zu Unschärfen bei der Berechnung der stofflichen Zusammensetzung des Neubaus.

5.2.4 Weitere Erhebungen von Gebäuden

Zur Prüfung der Plausibilität und der Schaffung einer breiteren Datenbasis wurden im Rahmen dieser Arbeit weitere Gebäude anhand ihrer stofflichen Zusammensetzung untersucht. Dies bietet den Vorteil, dass zusätzliche Baustoffe und Gruppen weiter disaggregiert werden können.

Zur Auswertung wurden zudem Daten aus Ökobilanzierungen, Untersuchungen von Bauakten und Vorortbegehungen u.a. verwendet. Durch die eigenständige Erhebung wurden mehrere Baustoffgruppen (29 Gruppen) erfasst. Zur besseren Übersicht und Vergleichbarkeit, wurden die verwendeten Baustoffe in die zuvor verwendeten Baustoffgruppen eingeteilt (Abbildung 78). In Anhang C ist eine Tabelle der Werte aller 29 Baustoffgruppen aufgeführt.

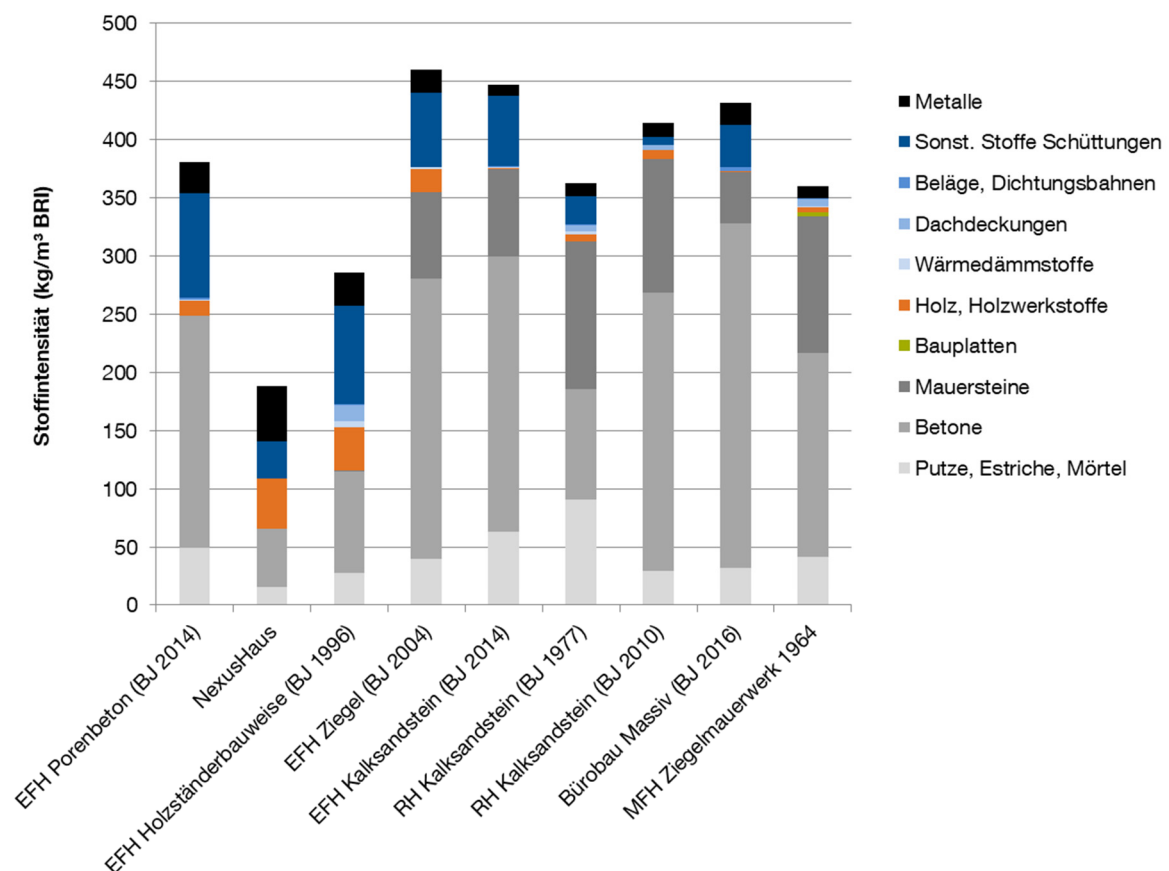


Abbildung 78: Auswertung der stofflichen Zusammensetzung ausgewählter Gebäude

Bei einer Betrachtung individueller Gebäude wird die Varianz in der stofflichen Zusammensetzung deutlich. Die Stoffintensität liegt bei diesen Gebäuden zwischen 300 und 500 kg/m³_{BRI}. Um einzelne Gebäude abzubilden sind die synthetischen Durchschnittsgebäude nur bedingt geeignet, da die Abweichungen zu groß sind. Bei einer großflächigeren Betrachtung gleichen sich die Abweichungen wieder aus.

Neben den konstruktionsbedingten Unterschieden spielt auch die Abbildung der Bezugseinheit (m³) eine entscheidende Rolle. Als Beispiel: Das MFH (Ziegelmauerwerk 1964), das in Anhang B detailliert beschrieben wird, wurde 1982 um ein 2-stöckiges Dachgeschoss in Holzbauweise erweitert. Dadurch hat sich der BRI stark vergrößert, aber durch die Leichtbauweise wurde die Masse nur geringfügig beeinflusst. Daher ist die Stoffintensität um 160 kg/m³_{BRI} geringer als bei den synthetischen Gebäuden dieser Baualtersklasse.

Dennoch ist es sinnvoll die Datenbasis mit detaillierten Untersuchungen zu erweitern. Dies ist nötig, um ein Verständnis zur Zusammensetzung und Dynamik einzelner Gewerke, insbesondere der Anlagentechnik (z. B. Leitungslängen u.a.) sowie Flächen- und Volumenverhältnissen zu bekommen. Um die Unterschiede der einzelnen betrachteten Gebäude zu verstehen, werden diese nachfolgend exemplarisch beschrieben.

5.2.4.1 EFH Porenbeton – BJ 2014

Das EFH aus Porenbeton (BJ 2014), weist für einen Massivbau, eine unterdurchschnittliche Stoffintensität (381 kg/m³_{BRI} auf). Dies liegt neben dem Leichtbaustoff Porenbeton (quarzhaltiger Sand), unter anderem an der intensiven Grünbedachung. Die anfallende Erde aus der Baugrube wurde wieder als Dachbedeckung eingesetzt. Ebenso wurde das Gebäude in den Hang integriert und Teile der Anlagentechnik (Photovoltaik und Solarthermie) dienen gleichzeitig als Fassade (Abbildung 79).

Die Planung und der Ausbau wurden vom Bauherrn (Günther Heinrich) durchgeführt und erhielt im Rahmen einer Pilotzertifizierung des Bewertungssystems Nachhaltiger



Abbildung 79: EFH Porenbeton (BJ 2014) (Eigenes Bild (links); Schnitt von Günther Heinrich (rechts))

Kleinwohnungsbau (BNK), die Auszeichnung *gut*. Die Zertifizierung wurde vom Autor durchgeführt, demnach wurde die stoffliche Zusammensetzung aus der erstellten Ökobilanzierung entnommen und um anlagentechnische Positionen erweitert.

Die Anlagentechnik (z. B. elektrisches Leitungsnetz u.a.) wird standardmäßig nicht in Ökobilanzen von Zertifizierungen erfasst, sondern anhand eines pauschalen Zuschlags berücksichtigt. Das Ziel des Bauherrn war es, bereits in der Konzeptphase den Ressourceneinsatz des Gebäudes so weit wie möglich zu minimieren.

5.2.4.2 NexusHaus – BJ 2015

Das NexusHaus, welches von der Technischen Universität München und der UT Texas in Austin für den Solar Decathlon entwickelt wurde, weist ebenfalls eine sehr geringe Stoffintensität ($189 \text{ kg/m}^3_{\text{BRI}}$) auf. Dies liegt an der Leichtbaukonstruktion, die 23 % der Masse ausmacht.

Das Gebäude wurde hinsichtlich des Rückbaus (*Design for Disassembly*) optimiert und kann wiederverwendet werden. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde das Gebäude um ein Fundament (Stahlbeton) ergänzt, das 26 % der Gesamtmasse ausmacht.

Durch die umfangreiche Anlagentechnik und Konstruktionsweise ist beispielsweise der Metallanteil (25 %) höher als bei vergleichbaren Gebäuden. Dies ist auch auf den vergleichsweise geringen BRI zurückzuführen. Unter Nichtberücksichtigung des Fundaments sinkt der Metallanteil auf 14,7 %, und die Stoffintensität des Gebäudes auf $108 \text{ kg/m}^3_{\text{BRI}}$.

5.2.4.3 EFH Holzständerbauweise – BJ 1996

Die Daten für das EFH in Holzständerbauweise wurden aus dem Leistungsverzeichnis, der Baubeschreibung, Rechnungen, Lieferscheinen und den Plänen abgeleitet. Das Niedrigenergiehaus der Holzbau Heinrich GmbH (Standort Oberbayern), hat eine Stoffintensität von $286 \text{ kg/m}^3_{\text{BRI}}$ (Abbildung 80). Konstruktionsbedingt ist die



Abbildung 80: EFH Holzständerbauweise (BJ 1996) (Eigenes Bild (links); Plan von Wilhelm Heinrich (rechts))

Stoffintensität erwartungsgemäß niedriger als bei der Massivbauweise. Rund 30 % der Masse bestehen aus Beton, der für die Erstellung des Fundaments und der Bodenplatte benötigt wurde. Weitere 20 % sind Kies, der als Sauberkeitsschicht unter dem Fundament verlegt wurde. Bei einer Nichtbetrachtung der Kiesschicht reduziert sich die Stoffintensität des Holzständer EFH auf $229 \text{ kg/m}^3_{\text{BRI}}$.

Der Holzanteil liegt bei rund 13 %, was sich überwiegend aus der Konstruktion, Außenverkleidung und den Böden zusammensetzt. Erwartungsgemäß ist der Holzanteil dieser Konstruktionsweise höher als bei Massivbauwerken, ebenso der Anteil an Wärmedämmstoffen (2 % Massenanteil).

Der Metallanteil liegt bei 10 %, wobei sich der Großteil aus Bewehrungsstahl (Bodenplatte) zusammensetzt. Weitere 5 % sind Ziegel-Dachsteine, die sortenrein zurückgewonnen werden können.

5.2.4.4 EFH Ziegel – BJ 2004

Das EFH aus Ziegel (BJ 2004) wurde einem Datensatz des BKI (6100-0547) entnommen und hat eine errechnete Stoffintensität von $461 \text{ kg/m}^3_{\text{BRI}}$. Dies ist vergleichbar mit den synthetischen Gebäudetypen. Rund 52 % des Gebäudes bestehen aus Beton, da neben dem Fundament auch Betondachsteine als Dachbedeckung verwendet wurden. Die Masse der tragenden Ziegelwände beträgt rund 14 % der Gesamtmasse. Der Massenanteil der Kiesschüttung (Filterschicht) beträgt weitere 7,5 %. Diese kann nach einem Abbruch der Bodenplatte, jedoch sortenrein zurückgewonnen werden.

Die anderen verwendeten Einzelbaustoffe machen jeweils weniger als 5 % der Masse aus. Nennenswert sind die Metalle mit 4,4 % der Masse - hauptsächlich Stahl, Titanzink (u. a. Dachdeckung) und Kupfer.

5.2.4.5 EFH Kalksandstein – BJ 2014

Bei dem EFH aus Kalksandstein handelt es sich um ein Flachdachgebäude mit Betondecken im Raum München. Die Stoffintensität ($447 \text{ kg/m}^3_{\text{BRI}}$) wurde aus der Ökobilanz abgeleitet und um die Anlagentechnik erweitert. Die Werte sind mit den synthetisch gebildeten EFH vergleichbar.

Der Betonanteil beträgt 53 %. Weitere 17 % der Masse bestehen aus Kalksandstein (Mauerwerk) und weitere 12 % aus Sand für die Gründung. Der Metallanteil beträgt weniger als 2 %, wovon der Großteil auf den Bewehrungsstahl zurückzuführen ist.

5.2.4.6 Reihenhäuser Kalksandstein – BJ 1977 und 2010

Neben den freistehenden EFH wurden 2 Reihenhäuser (RH) unterschiedlichen Baujahrs ausgewertet. Anhand von BKI Steckbriefen wurden die Stoffintensitäten ermittelt. Das Gebäude neueren Baujahrs weist dabei eine um 11 % höhere Stoffintensität auf. Ausschlaggebend ist dabei der höhere Betonanteil (BJ 2010), der auf die Decken und die massive Bodenplatte zurückzuführen ist. Metalle und Holzwerkstoffe haben dabei eine nahezu identische Größenordnung.

5.2.4.7 MFH Ziegelbauweise – BJ 1964

In Rahmen dieser Arbeit wurde ein MFH in Ziegelbauweise (BJ 1964), in München, detailliert erfasst. In urbanen Räumen stellt dies eines der gängigsten Gebäudetypen dar. Ziel war es, neben der stofflichen Zusammensetzung Kennwerte zu bilden, die die Basis für weitere Berechnungen liefern. In Anhang B werden die Ergebnisse und eine Beschreibung des Gebäudes aufgezeigt. Abbildung 81 fasst die Ergebnisse zusammen.

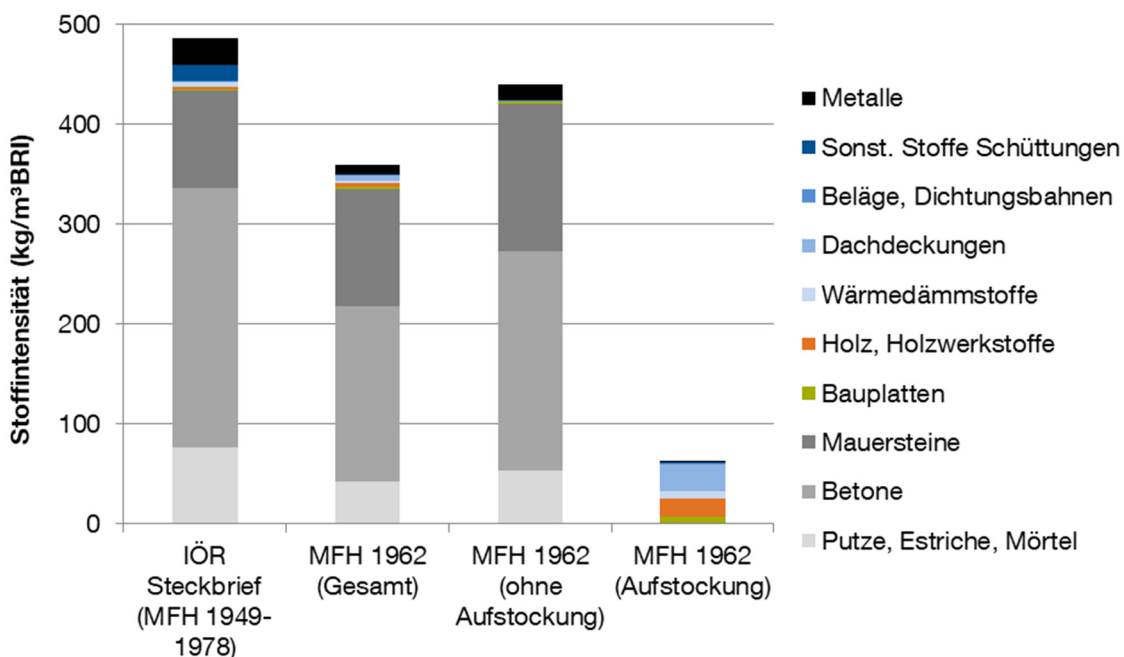


Abbildung 81: Stoffliche Zusammensetzung des Beispielgebäudes und Vergleich mit den IÖR Steckbriefen

Das Gesamtgebäude hat eine Stoffintensität von $360 \text{ kg/m}^3_{\text{BRI}}$. Zum besseren Vergleich wurde die stoffliche Zusammensetzung des ursprünglichen Gebäudes (ohne Aufstockung) ermittelt und der BRI angepasst. Dabei steigt die Stoffintensität auf $440 \text{ kg/m}^3_{\text{BRI}}$ an. Die Aufstockung hat eine Stoffintensität von $62 \text{ kg/m}^3_{\text{BRI}}$. Der größte Anteil ist auf die Dachziegel (44 %) zurückzuführen, gefolgt von Holzwerkstoffen (29 %), Mineralwolle (12 %) und Gips (11 %). Demnach bietet eine Aufstockung große Potentiale, mit verhältnismäßig geringem Rohstoffeinsatz Wohnraum bereitzustellen. Es ist allerdings anzumerken, dass die Dachgeschosswohnungen weniger Personen pro m^2 beherbergen als durchschnittliche Wohnungen.

Die Abweichung des Gebäudebeispiels (ohne Aufstockung) von den synthetischen Gebäuden des IÖR (MFH 1949-1978) beträgt 9,5 %. Die wesentlichen Unterschiede sind auf die Konstruktionsart zurückzuführen. Gebäude aus Ziegelmauerwerk repräsentieren einen Anteil von 35 % an den synthetischen Gebäuderepräsentanten des korrespondierenden Gebäudesteckbriefs. Der Rest setzt sich aus Leichtbeton-, Stahlbeton- und Kalksandsteinkonstruktionen zusammen, die eine höhere Dichte

aufweisen als Ziegel. Ebenso können unterschiedliche Rohdichten die Kalkulation beeinflussen. Die in dieser Arbeit verwendeten Rohdichten sind in Anhang D dargestellt.

5.2.4.8 Weitere Objekte

Im Rahmen des Projekts - *Analyse, Bewertung und Management von Baustoffströmen in Bayern*, wurden weitere vier EFH und zehn MFH anhand von BKI Daten ausgewertet (Weber-Blaschke und Faulstich 2005). Dabei werden die Baujahre 1984 bis 1999 berücksichtigt.

Für einen Vergleich wurden untenstehend die Durchschnittswerte ermittelt und in die Baustoffgruppen des IÖR eingeteilt (Abbildung 82). Bei den EFH weichen die beiden Datensätze um 17 % ab. Insbesondere bei Putz und Metallen sind hohe Abweichungen zu erkennen. Dies kann durch die vergleichsweise geringe Anzahl von vier Objekten begründet werden.

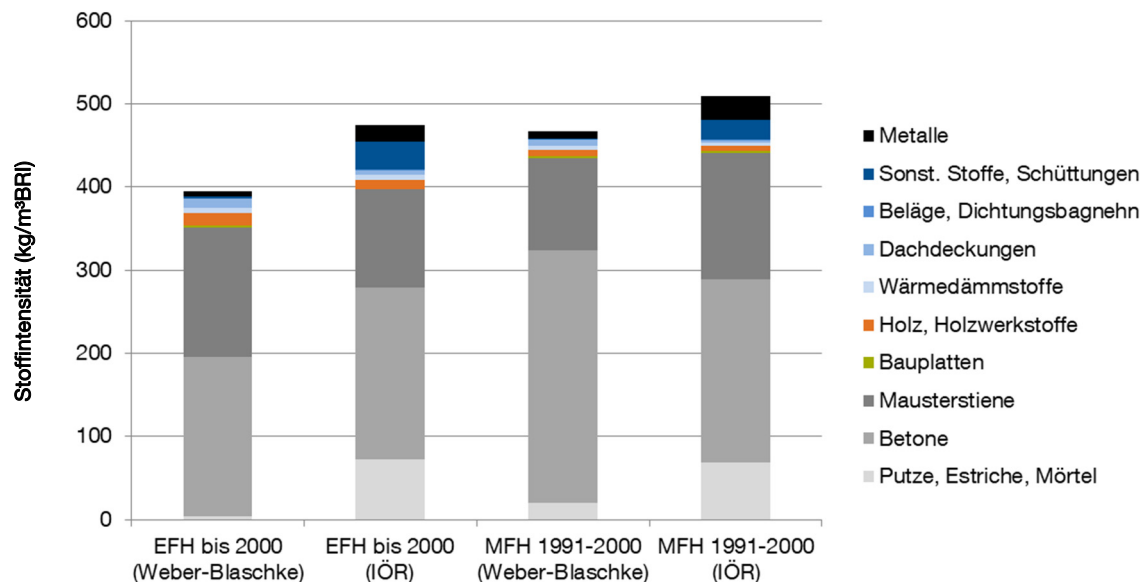


Abbildung 82: Vergleich der Datensätze des IÖR und Weber-Blaschke

Bei den MFH sind Abweichungen von lediglich 9 % zu verzeichnen. Beim Datensatz des IÖR ist der Anteil der Metalle rund viermal höher. Die aggregierten Daten lassen jedoch keinerlei Rückschlüsse auf die Gründe für den hohen Metallanteil zu.

Durch die geringeren Stoffintensitäten bei Weber-Blaschke kann vermutet werden, dass die Anlagentechnik nicht berücksichtigt wurde, da der Fokus der Studie auf mineralischen Fraktionen lag. Dies wäre eine Erklärung für den geringeren Metallanteil.

Bei einer Betrachtung der überwiegend für die Konstruktion verwendeten Stoffe (Beton, Mauerwerk, Putze) sind die beiden Datensätze vergleichbar. Ebenso ist bei den Wärmedämmstoffen und Holzwerkstoffen eine Übereinstimmung zu verzeichnen.

Durch die Heterogenität des Gebäudebestandes sind teilweise große Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung zu verzeichnen. Konstruktionsbedingte Faktoren können diese Unsicherheit verschärfen. Es ist daher notwendig, die bestehende Datenbasis zu erweitern und anhand von einheitlichen Kriterien (Baustoffgruppen, Konstruktionen, Gewerke, Detaillierungsgrad u.a.) weitere Gebäude zu erfassen.

5.2.4.9 Vergleich der Metallanteile

Die betrachteten Gebäude weisen unterschiedliche Metallanteile auf. Durch ihre strategische Bedeutung für die Volkswirtschaft wird an dieser Stelle ein Vergleich aufgeführt (Tabelle 11). Hierbei werden ebenfalls die synthetischen Gebäudetypen des IÖR in den Vergleich mit einbezogen.

Tabelle 11: Vergleich der Gesamtmetallkonzentration der betrachteten Gebäude

Gebäude	Anteil Metalle		
	kg/m ³ _{BRI}	%	
Gebäudesteckbriefe IÖR	MFH bis 1918	0,4	0,1%
	MFH 1919-1948	12,0	2,4%
	MFH 1949-1978	26,2	5,4%
	MFH 1979-1990	32,5	6,3%
	MFH 1991-2010	28,8	5,7%
	MFH nach 2011	25,1	5,0%
	EFH bis 1960	12,9	3,0%
	EFH 1961-1990	20,4	4,4%
	EFH 1991-2010	20,4	4,5%
	EFH nach 2011	21,8	5,0%
Eigene Auswertungen	EFH Kalksandstein (BJ 2014)	9,1	2,0%
	RH Kalksandstein (BJ 2010)	11,9	2,9%
	MFH Ziegelmauerwerk Gesamt (BJ 1964)	10,9	3,0%
	RH Kalksandstein (BJ 1977)	11,4	3,1%
	MFH Ziegelmauerwerk ohne Aufstockung (BJ 1964)	15,6	3,5%
	Bürobau Massiv (BJ 2016)	18,7	4,3%
	EFH Ziegel (BJ 2004)*	20,0	4,4%
	EFH Porenbeton (BJ 2014)	26,6	7,0%
	EFH Holzständerbauweise (BJ 1996)	28,4	9,9%
	NexusHaus ohne Fundament (BJ 2015)	15,8	14,7%
NexusHaus mit Fundament (BJ 2015)	47,4	25,1%	

*Dachbedeckung aus Titanzink

Bei den synthetischen Wohngebäuden des IÖR sind, je nach Baualter, zwischen 0,1 und 6,3 % Metalle verbaut. Der höchste Anteil fällt dabei auf MFH 1979-1990. Die eigene Auswertung kommt dabei zu ähnlichen Ergebnissen.

Ausnahmen bilden das NexusHaus und das EFH in Holzständerbauweise, die höhere Konzentrationen aufweisen. Dies ist auf die Leichtbauweise zurückzuführen, die eine

geringe Gesamtstoffintensität aufweist und daher der Metallanteil ausgeprägter ist. Beim NexusHaus sind technologiebedingt mehr Metalle in der Anlagentechnik verbaut, als bei vergleichbaren Gebäuden.

Tabelle 12: Vergleich der Metallarten der untersuchten Gebäude

Metalle	Stoffintensität (kg/m ³ BRI)								Ø Anteil (%)
	EFH Porenbeton (2014)	NexusHaus (2015)	EFH Holzständer (1996)	EFH Ziegel (2004)	EFH Kalksandstein (2014)	RH Kalksandstein (1977)	RH Kalksandstein (2010)	Bürobau Massiv (2016)	
Aluminium	0,3	1,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,3	0,9%
Kupfer	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	1,2%
Stahl	26,0	46,0	28,3	11,9	8,5	11,3	11,5	18,2	92,5%
Titanzink	0,0	0,0	0,2	7,8	0,0	0,0	0,2	0,1	5,3%
Zink	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1%
Gesamt	26,6	47,4	28,7	20,0	9,1	11,4	11,9	18,7	100%

Stahl, hat bei allen untersuchten Gebäuden den höchsten Anteil an den Metallen (Tabelle 12). Die restlichen Metalle machen jeweils weniger als 2 % aus. Eine Ausnahme ist der erhöhte Titanzinkanteil beim EFH Ziegel. Dies ist auf die Dachbedeckung zurückzuführen, die aus diesem Stoff besteht.

5.2.4.10 Zwischenfazit

Bei einer Betrachtung von Einzelgebäuden, wird die Heterogenität der stofflichen Zusammensetzung sichtbar. Es ist daher unausweichlich für dieses Modell, auf eine fundierte Datenbasis zurückzugreifen. Diese Datenbasis bieten die synthetischen Gebäude des IÖR. Um mit diesem Modell Aussagen für einzelne Gebäude zu treffen, muss mit Abweichungen gerechnet werden.

Durch die Verwendung von durchschnittlichen Gebäuden als Eingangsdaten kann der IST-Zustand des Bestandes flächendeckend abgebildet werden. Hierbei werden die Gebäudevolumina (nach Baujahr und Gebäudetyp) aus dem Stadtmodell mit den Stoffintensitäten verknüpft.

Um Aussagen zur dynamischen Entwicklung zu machen, sind weitere Faktoren im Modell nötig. Auf Basis von zeitlichen Verschiebungen (z. B. Lebensdauer), können zudem Aussagen zu zukünftigen Stoffströmen (z. B. Sanierung, Abbruch, Ersatzneubau) gemacht werden. Diese Zeitaspekte werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

5.3 Bemessung von Lebens- und Nutzungsdauer

Die Länge der Nutzungs- und Lebensdauer von Bauteilen und Gebäuden spielt eine entscheidende Rolle in der zeitlichen Quantifizierung von Stoffströmen. Der Abbruch ganzer Gebäude oder der Austausch von Bauteilen durch Sanierungs-, Instandhaltungs-, oder Rückbaumaßnahmen setzt Stoffströme in Gang. Auf der Ausgangsseite (Output) fallen nach der Nutzung Abfälle und potentielle Sekundärrohstoffe an. Auf der Eingangsseite (Input) kommen weitere Stoffe hinzu, um die Bauteile oder Bauwerke zu ersetzen.

Im Bauwesen haben Stoffe eine vergleichsweise hohe Verweildauer und Bandbreite, die teilweise mehrere Generationen betragen kann. Dies führt zu Unsicherheiten in der Auftretenswahrscheinlichkeit. Im Bestand stellen beispielsweise Restlebensdauern reine Schätzwerte dar. Die Restlebensdauer gibt an, wie lange ein verbautes Bauteil oder Gebäude noch genutzt werden kann.

Im Zukunft Bau Forschungsprojekt *Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen*, werden Verfahren zur Ermittlung von Lebensdauern anhand von Wahrscheinlichkeitsmodellen und anwendungsorientierte Näherungsmethoden vorgestellt. Laut den Autoren stellen wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden, die den Alterungsprozess einzelner Gebäude und Bauteile mithilfe probabilistischer Ansätze beschreiben, einen hohen Zeit- und Kostenaufwand dar. Anwendungsorientierte Näherungsmethoden hingegen beschreiben die Lebensdauer anhand von Kennwerten, die auf wissenschaftlichen Untersuchungen, Erfahrungswerten aus der Immobilienwirtschaft oder Herstellerangaben basieren. Diese haben zum Teil hohe Abweichungen, da keine einheitliche Methode zur Lebensdauerbemessung vorliegt (Bahr und Lennerts 2010, S. 18).

Durch die schnelle Weiterentwicklung von Baustoffen und -teilen liegen häufig noch keine Erfahrungswerte hinsichtlich der zu erwartenden Lebensdauer vor. Auch die pauschale Übertragbarkeit von Kennwerten von älteren auf jüngere Gebäude, ist mit Vorsicht zu genießen, da sich die verwendeten Baustoffe und ihre Verarbeitung teilweise stark unterscheiden (Bahr und Lennerts 2010, S. 80).

5.3.1 Zeitraum zwischen Einbau zum Abfallanfall

Zwischen Errichtung und Abfallanfall findet eine Phasenverschiebung statt, die mit der Nutzungs- und Lebensdauer bemessen wird. Am Beispiel von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) wird dieses Prinzip aufgezeigt.

Langzeituntersuchungen und Erfahrungen mit WDVS gehen bei fachgerechten Einbau von einer Nutzungsdauer von rund 30 Jahren und mehr aus (Pfeiffer et al. 2010, S. 175). Demnach ist es wahrscheinlich, dass 30 Jahre nach dem Einbau diese als Abfall anfallen. Abbildung 83 zeigt eine Auswertung der Produktionsdaten für WDVS bis zur anstehenden Entsorgung. Der Zeitraum zwischen minimaler und maximaler Lebensdauer (grau schraffierter Bereich) gibt die Spannweite des Entsorgungszeitraums wieder und kann durch die Normalverteilung abgebildet werden, um wahrscheinlichsbasierte Aussagen zum zeitlichen Auftreten von Stoffströmen zu machen (Abbildung 84).

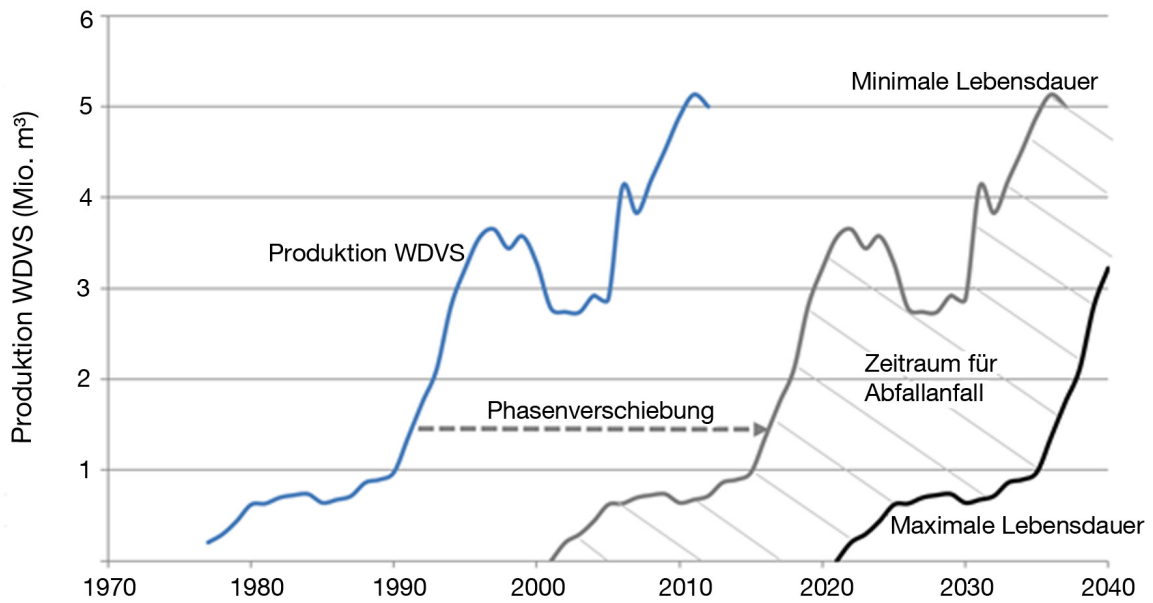


Abbildung 83: Nutzungsdauer anhand des Einbaus eines Bauteils bis zur Entsorgung am Beispiel von WDVS (Eigene Darstellung anhand Produktionsdaten aus (Riedel 2010, S. 33).

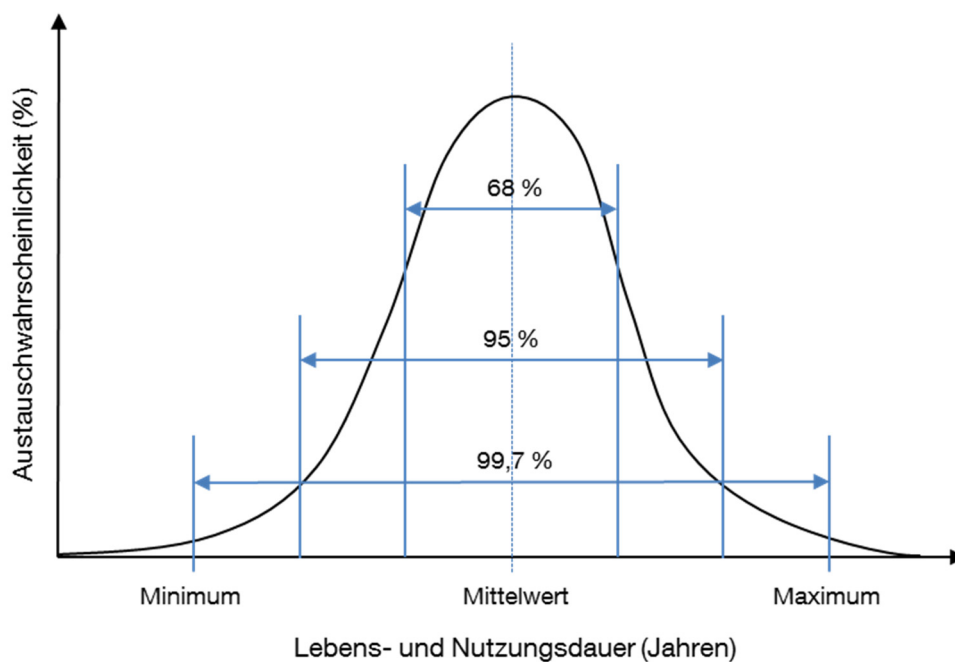


Abbildung 84: Beispielhaft Darstellung der Binomialverteilung zur Lebensdauerbemessung

DIN ISO 15686-8: 2008 stellt Anhand eines Beispiels die unterschiedlichen Verteilungstypen ausgewählter Einflussfaktoren (z. B. Entwurfsqualität, Instandhaltungsniveau u.a.) dar. Durch das Fehlen von Referenzlebensdauer und Werten für die Einflussfaktoren ist die Methode in der Praxis allerdings nur bedingt einzusetzen. In der Dissertation von Ritter werden die Verteilungstypen anhand von Expertenbefragungen ergänzt, um die Genauigkeit und Transparenz zu erhöhen (Ritter 2011, S. 136). Die Normalverteilung für Lebensdauern wird ebenfalls im energetischen Gebäudemodell von Nemeth verwendet (Nemeth 2011, S. 36ff).

Bei der Normalverteilung gilt es zu beachten, dass sich die Verteilungstypen je nach Bauteil oder Gebäude unterscheiden, da diese unterschiedlich stark den jeweiligen Einflussfaktoren unterliegen. Gebäude- und bauteilspezifische Differenzierungen lassen sich bei einer flächendeckenden Untersuchung nicht anwenden, da dies der Betrachtungsrahmen nicht zulässt. Um dies zu gewährleisten, müsste der derzeitige Zustand jedes einzelnen Gebäudes und Bauteils separat erfasst werden.

Im Rahmen dieses Projekts wird auf die Binomialverteilung zurückgegriffen, um die Spannweiten von Nutzungsdauern anhand von Durchschnittswerten zu beschreiben. Das Baujahr der in dieser Arbeit untersuchten Gebäude ist bekannt und im Gebäudemodell hinterlegt. Addiert man das Baujahr und die Gesamtnutzungsdauer (unter Anwendung der Binomialverteilung) kann eine Aussage getroffen werden, in welchem Zeitraum dieses Gebäude voraussichtlich abgerissen wird und ein Ersatzneubau dieses ersetzt (Phasenverschiebung).

5.3.2 Einflüsse auf Lebens- und Nutzungsdauer

Eine Vielzahl von Einflussfaktoren wirken sich auf die Nutzungs- und Lebensdauer aus (Abbildung 85). Vor allem in frühen Lebenszyklusphasen kann wenig über Lebensdauern ausgesagt werden, da viele Einflüsse erst in der Nutzung auftreten. Die Weichen werden allerdings bereits in der Planung gestellt. Die höchste Priorität liegt dabei auf der Materialqualität, Ausführungsqualität, sowie auf Wartung und Pflege (Pfeiffer et al. 2010, S. 4f). Bei unterlassener Instandhaltung liegt beispielsweise die Reduktion der Bauteils-Lebensdauer von Flachdächern bei rund 80 % (Steildächer 70 %; Fenster und Fassaden aus Holz bei 50 %) (Christen und Meyer-Meierling 1999, S. 81).

Nicht erkannte und damit nicht behobene Baumängel, können ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer bewirken. Das Ergebnis einer DEKRA Studie zeigt bei Wohngebäuden Mängel von durchschnittlich € 10.000 (32 Mängel pro Projekt) mit steigender Tendenz. Im Zeitraum von 2003 bis 2007 stieg die durchschnittliche Anzahl festgestellter Mängel um 102%. Als Schwerpunkte gelten Fenster und Außentüren, Putz und Stuckarbeiten sowie Wärmezeugungseinrichtungen und Installationen. Ebenso wurden auch Mängel an Mauerarbeiten, Estricharbeiten, Abdichtungsarbeiten, Holzbauarbeiten und Betonarbeiten festgestellt. Dabei trägt die Kostengruppe (KG) 300 (Bauwerk) einen Anteil von 76 % an den Gesamtmängeln. Die Außenwände (KG 330) haben dabei einen Anteil von fast 30 % (DEKRA 2008, S. 26).

Durch Baumängel und deren Behebung werden Ressourcen in Anspruch genommen. Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von komplexeren Konstruktionen und High-Tech Baustoffe, für die noch keine Langzeiterfahrungen vorliegen, kann davon



Abbildung 85: Einflussfaktoren auf die Nutzungs- und Lebensdauer von Baustoffen, Bauteilen und Bauwerken (Eigene Darstellung nach (Pfeiffer et al. 2010, S.4f; Pfeiffer und Arlt 2005, S.4; Bahr und Lennerts 2010, S.24-40 ; ISO 15686))

ausgegangen werden, dass sich die Anzahl der Baumängel weiter erhöhen wird, was sich auch auf den Rohstoffbedarf und Abfallanfall auswirkt.

5.3.3 Lebens- und Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen

In Ihrem Fachbuch „*Nutzungsdauertabellen von Wohngebäuden*“ werden Bauteillebensdauer aus unterschiedlichen Quellen (z. B. Literatur zu Bauschäden, Befragung von Wohnungsunternehmen) nach der DIN EN 276 dargestellt (Pfeiffer et al. 2010). Grundlage bildet der Forschungsbericht *Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der Wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau* (Institut für Bauforschung e. V.), der *Leitfaden Nachhaltiges Bauen* u.a. Es wird dabei unterschieden zwischen Bauteilen, die mit der Lebensdauer des Gebäudes gleichzusetzen sind (z. B. Tragkonstruktion, Gründung) und Bauteilen, die über die Nutzungsdauer ausgewechselt werden müssen (z. B. Anlagentechnik, Putze, WDVS).

Die Lebensdauer von Bau- und Anlagenteilen werden in zwei Kategorien eingeteilt. An erster Stelle steht die technische Lebensdauer (TL), die den Zeitraum beschreibt bis die vorgesehene Funktion nicht mehr erfüllt werden kann. An zweiter Stelle steht die wirtschaftliche Lebensdauer (WL), die den Zeitraum einer wirtschaftlichen Nutzung im vorgesehenen finanziellen Rahmen beschreibt. Die wirtschaftliche Nutzungsdauer ist tendenziell kürzer als die technische Lebensdauer (Bahr und Lennerts 2010, S. 16).

Je nach Bauteilaufbau kann es nötig sein, angrenzende Bauteile zu demontieren oder auszuwechseln, um an das entsprechende Bauteil zu gelangen. Daher ist es sinnvoll für Konstruktionen, die schwer oder gar nicht trennbar sind, Baustoffe mit ähnlichen Lebensdauern zu verwenden, um den Austausch einzelner Schichten weitgehend zu umgehen.

Die stoffliche Trennbarkeit einzelner Materialsichten entscheidet auch über zukünftige Entsorgungswege. Schwer oder nicht-trennbare (z. B. verklebt) Bauteile

und Baustoffe benötigen einen höheren Aufwand, um sortenrein sortiert zu werden. Dies kann dazu führen, dass eine Aufbereitung nicht mehr lohnenswert ist und Stoffe deponiert werden müssen.

Während Langzeitstudien zur Lebensdauer von Bauteilen teilweise mehrere Jahrzehnte andauerten, ist zum Langzeitverhalten von neueren Bauteilen und Baustoffen nur wenig bekannt. Traditionelle Materialien weisen noch nach Jahren eine hohe Funktionstüchtigkeit auf, während bei moderneren Baustoffen diese Eigenschaft oft fehlt (IP Bau 1994, S. 56). Zu diesem Ergebnis kam eine Untersuchung von 200 Gebäuden unterschiedlichen Baualters des IPBAU (Impulsprogramm BAU des Bundesamtes für Konjunkturfragen). Das Ergebnis: Je jünger ein Bauteil, desto geringer die Lebensdauer. Begründet wird dies durch geringere Lebenserwartungen der Materialien, aggressivere Umwelteinflüsse, reparaturanfällige Konstruktionen, sowie erhöhten Verschleiß durch eine intensivere Nutzung (IP Bau 1994, S. 17).

Daten zu Instandhaltung und Sanierung von einzelnen Gebäuden werden derzeit nicht statistisch erfasst. Dadurch können die momentane Ausstattung bzw. der Sanierungsstand nur geschätzt werden, was zu weiteren Unsicherheiten führt. Um den Alterungsprozess in dieser Arbeit abzubilden, werden jährliche Sanierungsraten pro Baustoffgruppe gebildet. Die Vorgehensweise wird in Abschnitt 5.4 weiter beschrieben.

Zukünftig würde sich anbieten, auf Basis eines fortschreibbaren Datenmodells Sanierungsmaßnahmen zu erfassen, um eine aktuelle Abbildung des Zustands einzelnen Bauteile und Gebäude zu erhalten.

5.3.4 Lebens- und Nutzungsdauer von Gebäuden

Bei Wohnmobilen liegt die Gesamtnutzungsdauer erfahrungsgemäß zwischen 60 und 100 Jahren. Bei Gewerblich genutzten Gebäuden hingegen wird eine viel geringere



Abbildung 86: Bauschäden an 10 Jahre brachliegendem Gebäude (Baujahr 1964) (Eigene Bilder)

Nutzungsdauer veranschlagt. Baumärkte beispielsweise, werden für eine Gesamtnutzungsdauer von nur 15 Jahren ausgelegt (Bogusch und Brandhorst 2013, S. 274).

Pfeiffer geht auf Grundlage von Wirtschaftlichkeits- und Finanzierungsüberlegungen von einer angenommenen Lebensdauer für Wohngebäude von 80 bis 100 Jahren, für Nichtwohngebäude von 50 bis 80 Jahren aus. Durch die schnellen Änderungen der Wohn- und Nutzungsgewohnheiten sind die tatsächlichen Nutzungsdauern als geringer einzustufen. Bei Wohngebäuden werden daher durchschnittliche Nutzungsdauern von 80 Jahren angenommen. In der Realität hat sich allerdings gezeigt, dass die tatsächlichen Nutzungsdauern im Allgemeinen höher liegen als die geschätzten (Pfeiffer et al. 2010, S. 4).

Die veränderten Nutzeranforderungen stellen einen weiteren Einflussfaktor dar. Dies beinhaltet beispielsweise die Veränderung von Grundrissen, Verbesserung der Barrierefreiheit, Umnutzungen, modische Obsoleszenz (z. B. neue Fliesen im Bad), technische Veränderungen, normative Änderungen oder rechtliche Aspekte. Bei diesen immateriellen Faktoren können Bauteile trotz ihrer vollen Funktionsfähigkeit frühzeitig ausgetauscht werden, was eine Vorhersage der tatsächlichen Lebensdauer unmöglich macht.

Zu den oben genannten Faktoren spielt die Einhaltung von Qualitätsstandards der Bau- und Anlagenteile des Gebäudebestands im Rahmen von Instandsetzungsmaßnahmen eine maßgebende Rolle, die die Nutzungs- und Lebensdauern von Gebäuden primär bestimmt (Pfeiffer et al. 2010, S. 58). Eine Immobilie muss gepflegt werden. Wenn ein Gebäude über mehrere Jahre nicht Instandgehalten wird, ist ein Verfall vorprogrammiert. Insbesondere wenn Feuchtigkeit eindringt, die nicht ablaufen kann (stauende Nässe). Dieses Phänomen kann bei über mehrere Jahre verwaisten Immobilien (Brache) beobachtet werden, die nicht mehr geheizt werden und Undichtigkeiten aufweisen. In Abbildung 86 werden beispielhaft Bauschäden, die bei brachliegenden Gebäuden entstehen, aufgezeigt.

Bei dem Beispiel handelt es sich um ein seit 10 Jahren verwaistes Gebäude in München, das durch Unstimmigkeiten der Erbgemeinschaft verfällt. Durch die fehlende Instandhaltung scheidet eine erneute Nutzung aus, da die Bausubstanz bereits angegriffen ist. Durch eine rechtzeitige Sanierung und Instandsetzung hätte dieses Gebäude auch weiter genutzt werden können.

5.4 Stoffströme durch Sanierungsmaßnahmen

Durch Sanierungs- und Umbaumaßnahmen werden zusätzliche Stoffströme in Gang gesetzt. Diese stehen in Abhängigkeit zur Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen. Bei einer energetischen Sanierung werden beispielsweise Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) dem Gebäude hinzugefügt, was zu einer Erhöhung der Gesamtmasse führt. Neben den hinzugefügten Stoffen (Eingangsseite), fallen auch Abfallfraktionen (Ausgangsseite) an. Die Abfallfraktionen beinhalten beispielsweise die ausgetauschten Systeme (z. B. Fenster, Putz u.a.).

Im Rahmen einer eigenen Auswertung von Ökobilanzierungsdaten wurde ermittelt, dass während der Lebenszeit von Wohngebäuden durchschnittlich rund 2 - 5 % der Gesamtmasse ausgetauscht werden. Diese geringen Werte kommen zustande, da die

Konstruktion, die mit der Lebensdauer des Gebäudes gleichgesetzt ist, dem größten Anteil der Gesamtmasse entspricht.

In dieser Arbeit wird bei Sanierungsmaßnahmen auf Untersuchungen des IÖR zurückgegriffen. Hier wird während der Gebäudelebensdauer von einem Input von 5 % und einem Output von 5,5 % ausgegangen (Gruhler und Böhm 2011, S. 52). Demnach wächst das Stofflager durch eine Bestandssanierung leicht an. Dies kommt beispielsweise durch zusätzlich hinzugefügte WDVS oder Fenster mit höherem U-Wert, die eine höhere Masse aufweisen (z. B. 3-Scheiben Verglasung), zustande.

Im *Ressourcenmodell der Stadt Zürich* hingegen wird mit identischen Eingangs- und Ausgangsströmen, bei der Sanierung bilanziert (Stoffdurchlauf) – keine Veränderung des Lagers (Schneider und Rubli 2007, S. 15).

Durch die Einbindung des in dieser Arbeit entwickelten Stoffstrommodells in GIS basiert die Betrachtung der Sanierungszyklen auf der Gebäudeebene (nicht Bauteilebene). Demnach werden jährliche Sanierungsraten der betrachteten Baustoffgruppen definiert.

Durch die durchschnittliche Lebensdauer von Baustoffen, Bauteilen und Gebäuden wurden im *Ressourcenmodell der Stadt Zürich* ebenfalls Sanierungsraten nach Baustoffgruppen ermittelt. Beispielsweise werden bei der Dachbedeckung, jährlich 1 % der Baustoffe ersetzt. Beim Mauerwerk wird von 0,2 % ausgegangen (Schneider und Rubli 2007, S. 72). Die jährlichen Sanierungsraten werden aus dieser Arbeit übernommen und an die untersuchten Baustoffgruppen und die Studie des IÖR angepasst (Tabelle 13).

Tabelle 13: Jährliche Sanierungsraten nach Baustoffgruppen (in Anlehnung an (Schneider und Rubli 2007, S. 72), (Gruhler und Böhm 2011, S. 52)

Baustoffgruppe	Sanierungsraten (%/a)	
	Output	Input
Putze, Estriche, Mörtel	0,6%	0,7%
Betone	0,1%	0,1%
Mauersteine	0,2%	0,2%
Bauplatten	1,0%	1,1%
Holz, Holzwerkstoffe	1,0%	1,1%
Wärmedämmstoffe	3,0%	3,3%
Dachdeckungen	1,0%	1,1%
Beläge, Dichtungsbahnen	4,0%	4,4%
Sonst. Stoffe Schüttungen	0,1%	0,1%
Metalle	1,0%	1,1%

Durch eine zukünftige Einbindung von *Building Information Modeling* (BIM) in dieses Modell kann eine Betrachtung auf Bauteilebene erfolgen. Da in BIM einzelne Bauteile definiert werden können kann eine Verknüpfung der Bauteillebensdauer und -zustand erfolgen.

5.5 Stoffströme durch Gebäuderückbau

Nachdem ein Gebäude das Ende seiner Lebensdauer erreicht hat, erfolgt in der Regel der Rückbau. Die durch Abbruchmaßnahmen freigesetzten Stoffe können dem Stoffkreislauf wieder zugefügt werden oder bedürfen einer Entsorgung (z. B. Deponierung).

In dieser Arbeit wird, unter Anwendung der Binomialverteilung, von einer durchschnittlichen Lebensdauer für Wohngebäude von 80 Jahren ausgegangen. Als zusätzliches Szenario wird eine Gebäudelebensdauer von 50 Jahren und 100 Jahren betrachtet. Dies führt zu einer zeitlichen Verschiebung der betrachteten Stoffströme.

Nicht alle Gebäude werden nach Ende der Lebensdauer direkt abgebrochen. In der Untersuchung von Kohler im Rahmen der Enquete Kommission wird davon ausgegangen, dass deutschlandweit 25 % der Gebäude in einen Zustand der Brache übergehen. Daher fallen keine Stoffströme an, da die Gebäude noch vorhanden sind, aber nicht mehr genutzt werden. Die mittlere Lebensdauer der Brache wird mit 10 (± 5) Jahren angenommen (Kohler et al. 1999, S. 216). Demnach verlängert sich die festgesetzte Lebensdauer dieser Gebäude, was ebenfalls zu einer zeitlichen Verschiebung der Stoffströme aus dem Abbruch führt. Dieser Aspekt wird in dieser Arbeit berücksichtigt, indem die Gebäudelebensdauer anhand einer Binomialverteilung dargestellt wird.

Nach dem Ablauf der angenommenen Lebensdauer werden die im Bestand gebundenen stofflichen Fraktionen wieder freigesetzt. Durch Systemverluste oder potentielle Problemstoffe können die freigesetzten Stoffe nicht gänzlich verwertet werden. Im Modell wird daher mit Verlustraten, bezogen auf die verschiedenen Baustoffgruppen, gerechnet (Tabelle 14).

Tabelle 14: Verlustraten durch Sammlung und Aufbereitung (nach Baustoffgruppen) (Eigene Darstellung nach (Mötzl und Pladerer 2009), (BMUB 2016), (Schiller et al. 2010), (Müller 2016))

Baustoffgruppe	Verlustraten
Putze, Estriche, Mörtel	10%-20%
Betone	5%-20%
Mauersteine	4%-50%
Bauplatten	10%
Holz, Holzwerkstoffe	5%
Wärmedämmstoffe	10%
Dachdeckungen	10%
Beläge, Dichtungsbahnen	50%
Sonst. Stoffe, Schüttungen	10%
Metalle	5%

Die Systemverluste setzen sich zusammen aus Sammlungs-, Aufbereitungs- und dissipativen Verlusten. Ein weiteres Beispiel für Systemverluste stellt die Staubeentwicklung bei Abbruchmaßnahmen dar. Im Österreichischen Forschungsprojekt – *Assessment of Buildings and Construction (ABC) - Disposal* –

werden baustoffbezogene Verlustraten experimentell und anhand von Expertenbefragungen ermittelt (Mötzl und Pladerer 2009, S. 39). Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die dort ermittelten Werte zurückgegriffen, die durch Werte der Ökobaudat ergänzt werden.

Bei den Verlustraten handelt es sich um Durchschnittswerte, die in Abhängigkeit zur Verunreinigung des Ausgangsmaterials, der Aufbereitungsart, Abbruchweise, Gesetzgebung und andere Faktoren stehen. Demnach können sich die Verlustraten zukünftig ändern. Die Verlustraten können im Modell angepasst werden. Die Aufbereitung und Wiedergewinnung von Stoffen wird in Kapitel 2 und 3 behandelt.

5.6 Stoffströme durch Neubau und Ersatzneubau

Die Nachfrage nach Wohnraum in urbanen Räumen steigt stetig an. Das Referat für Stadtplanung und Bauordnung der Landeshauptstadt München prognostiziert für 2035 eine Bevölkerungszunahme von über 19 % im Stadtgebiet. Dies bedeutet, dass in den nächsten Jahren Wohnraum für etwa 300.000 zusätzliche Menschen geschaffen werden muss (Landeshauptstadt München 2017, S. 71). Durch diese Entwicklung werden zusätzliche Rohstoffe für Bautätigkeiten benötigt.

Eines der größten städtebaulichen Entwicklungsgebiete entsteht in Freiham/Neuaubing im Westen der Stadt. Hier soll auf 350 ha für rund 20.000 Menschen Wohnraum entstehen (Landeshauptstadt München 2013, S. 37). Zur Validierung des hier beschriebenen Modells werden die Stofflager und -ströme des Wohnungsbaus dieses Entwicklungsgebiets untersucht. Die Ergebnisse sind in Kapitel 6 dargestellt.

Im Modell wird zwischen Neubau und Ersatzneubau unterschieden. Der Neubau entsteht dabei auf zuvor nichtgenutzten Flächen (z. B. Wiese). Der Ersatzneubau ersetzt hingegen abgerissene Gebäude. Für die Berechnungen ist diese Unterscheidung bedeutend und wird im Folgenden beschrieben.

5.6.1 Neubau

Zur Abbildung der stofflichen Zusammensetzung des Neubaus wird auf Daten des IÖR zurückgegriffen. Dabei wurden synthetische Gebäude gebildet, die zukünftige Entwicklungen (z. B. Konstruktionsarten, Dämmstandard, Größe von Wohneinheiten u.a.) berücksichtigen (Gruhler und Böhm 2011, S. 78ff). Die weitere Vorgehensweise ist dabei identisch zur Abbildung der Bestandsgebäude (Kapitel 5.2).

Die Stoffintensität wurde dabei im Bezug zur Wohneinheit (WE) gebildet und in EFH und MFH unterschieden (Abbildung 87). Dies ist notwendig, da zukünftige städtebauliche Entwicklungen in der Anzahl von WE gemessen werden und nicht nach Gebäudevolumen.

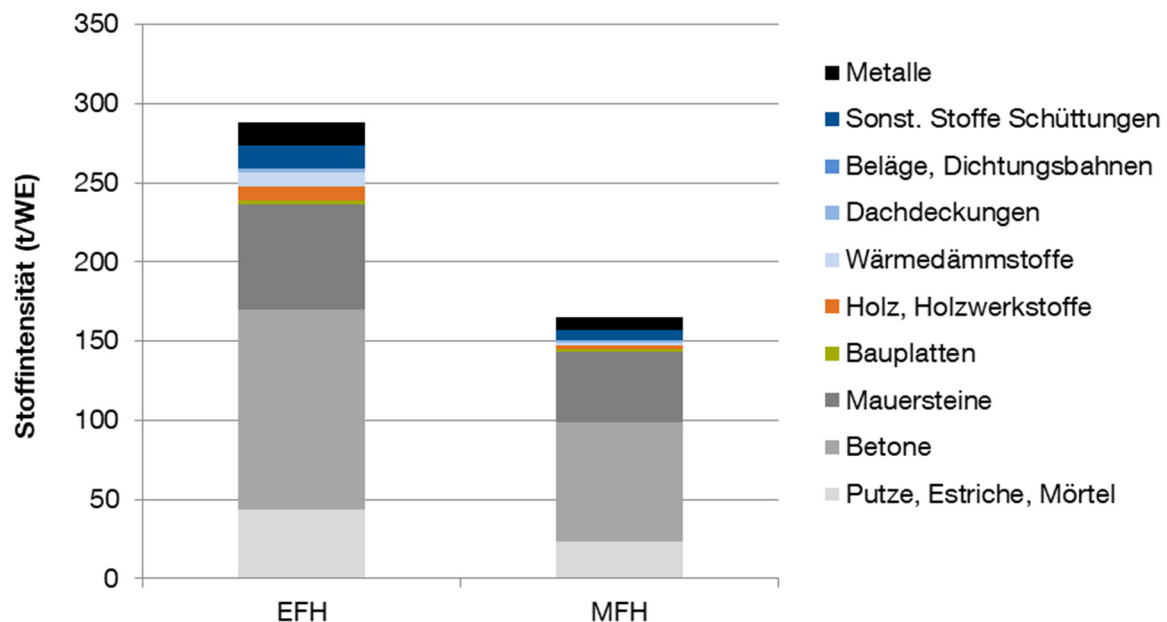


Abbildung 87: Stoffintensitäten von Neubauten nach 2011 (in t/WE) (Eigene Darstellung in Anlehnung an Gruhler und Böhm 2011, S. 84)

Bei EFH wurde eine Stoffintensität von 288 t/WE ermittelt (MFH: 165 t/WE). Die Unterschiede sind unter anderem auf die Größe der WE zurückzuführen. Wohneinheiten in EFH sind tendenziell größer als in MFH. Laut dem Bayerischen Landesamt für Statistik beträgt die durchschnittliche Wohnfläche in Münchner EFH 138 m² (Bayern: 129 m²). In MFH hingegen 68 m² (Bayern: 68 m²) (Bayerische Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2014). Des Weiteren werden Wohnungen in EFH durch einen höheren Anteil an Außenwandflächen umschlossen (Gruhler und Böhm 2011, S. 86).

5.6.2 Ersatzneubau

Im Modell wird, analog zu den Neubauten, mit identischen Stoffintensitäten gerechnet. Allerdings wurden für diesen Zweck, die Stoffintensitäten im Bezug zum BRI gesetzt, da das Volumen (und Zeitpunkt) der abgerissenen Gebäude aus dem Modell ermittelt werden kann.

Bei EFH, wurde eine Stoffintensität von 420 kg/m³_{BRI} ermittelt. Bei MFH von 528 kg/m³_{BRI} (Abbildung 88). Durch die gewählte Bezugseinheit (m³_{BRI}), kommen diese Unterschiede zustande. Hier spielen beispielsweise Unterschiede in den Raumhöhen und Dimensionierung von Treppenhäusern eine Rolle (Gruhler und Böhm 2011, S. 87).

Bedingt durch die vergleichsweise hohen Grundstückspreise wird bei den Ersatzneubauten in Innenstädten das maximale Baurecht ausgenutzt. Dies kann dazu führen, dass Ersatzneubauten ein unterschiedliches Volumen aufweisen (größer oder kleiner), als die abgerissenen Gebäude. Beispielsweise können bestehende Areale auch nachverdichtet (z. B. Aufstockung) werden, was ebenfalls zu unterschiedlichen Gebäudevolumen führt.

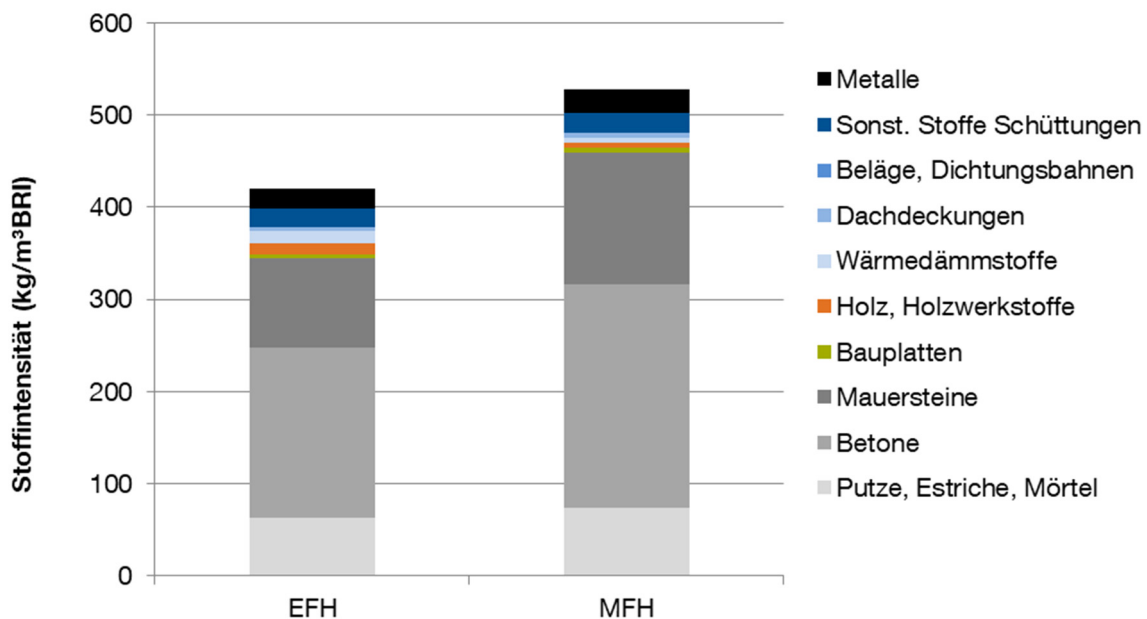


Abbildung 88: Stoffintensitäten von Neubauten nach 2011 (in kg/m³_{BRI}) (Eigene Darstellung in Anlehnung an Gruhler und Böhm 2011, S. 87)

Ein weiterer Faktor sind Nutzungsänderungen (z. B. Transformation zu einem Bürogebäude). Diese Faktoren, müssen jeweils im Einzelfall betrachtet werden, da sich unterschiedliche Betrachtungsräume stark unterscheiden können.

Eine Möglichkeit bietet eine Untersuchung von Bebauungsplänen im Untersuchungsgebiet, um die maximal mögliche Bebauung zu ermitteln. In dem hier vorgestellten Modell können diese Faktoren durch eine Anpassung des Gebäudevolumens für Ersatzneubauten berücksichtigt werden. Pauschale Annahmen sind nur bedingt aussagekräftig, da Ersatzneubauten tendenziell unterschiedliche Gebäudevolumen aufweisen als die ersetzen Bestandsgebäude.

5.6.3 Bauabfälle aus Neubau und Ersatzneubau

Durchschnittlich 3 % der Massen (Eingangsseite) aus dem Neubau, Sanierung und Ersatzneubau, fallen als Bauabfälle (z. B. Verschnitt) an (Deilmann et al. 2017, S. 73). Diese Werte stimmen mit Untersuchungen aus der Schweiz überein (Schneider und Rubli 2007, S. 14). Dieser Wert wird für die Berechnungen im Model übernommen.

5.7 Stoffströme durch potentielle Problemstoffe

Potentielle Problemstoffe, auch Schadstoffe genannt (z. B. Asbest, Holzschutzmittel, PCB-Fugenmaterial etc.), die derzeit im Bestand gebunden sind, haben einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der anfallenden Fraktionen sowie deren Entsorgungskosten. Seit dem letzten Jahrhundert, insbesondere in der Nachkriegszeit und den 1960er-Jahren, wurden zahlreiche neue Produkte in alle Bereiche der

Bauwirtschaft eingeführt. Durch den schnellen Wandel in der Bauwirtschaft konnten Erfahrungen mit den neuen Baustoffen hinsichtlich gesundheitlicher, ökologischer und bauphysikalischer Auswirkungen, nicht Schritt halten. Dies hatte bautechnische Schwachstellen und den Einbau von zum Teil hochgiftigen Produkten zur Folge (Dieckmann 2002, S. 1). Neue Baustoffe mit langer Haltbarkeit kamen auf den Markt, die heute teilweise Probleme darstellen können (z. B. Einfluss auf Wohnqualität, Gesundheit, Ökologie, Entsorgung u. Ä.).

Durch eine immer grösser und komplexer werdende Anzahl von Baustoffen wird die Thematik der Problemstoffe weiter verschärft – nicht alle zukünftigen Auswirkungen sind heute bekannt. Die Verwendung von Nano Technologien im Bauwesen ist beispielsweise noch wenig erforscht, dennoch wird immer mehr davon eingesetzt (z. B. in Beschichtungen oder Wärmedämmverbundsystemen).

Die gängige Praxis ist die Entnahme von Rohstoffen aus der Erdkruste, um sie dann mit potentiellen Problemstoffen zu vermischen. Das Ziel sollte sein, weniger komplexe und leichter zerlegbare Produkte zu entwickeln (Bardi und Leiprand 2013, S. 188).

Es gilt daher, bei Gebäuden der Baualtersklassen 1950 bis in die 1990er-Jahre sowie bei Sanierungsmaßnahmen, die in diesem Zeitraum durchgeführt worden sind, besonders auf verbaute Schadstoffe zu achten. Das bedeutet nicht, dass Schadstoffe in diesen Baualtersklassen vorhanden sein müssen, aber ein Auftreten ist dennoch wahrscheinlich.

Durch die derzeitige Datenlage (u. a. Auftretenswahrscheinlichkeiten, Massen, Stoffkonzentrationen), kann keine fundierte Aussage getroffen werden. Genauso wenig können Abschätzungen gemacht werden, wie viele Problemstoffe derzeit im Bestand gebunden ist. Durch Sanierungsmaßnahmen wurde ein Teil der Schadstoffe bereits beseitigt. Dies kann jedoch nicht quantifiziert werden. Als sicher gilt, dass heute noch eine Vielzahl von schadstoffhaltigen Stoffen verbaut ist, die in den nächsten Jahren gezielt entsorgt werden müssen. Von Gesetzeswegen ist es verpflichtend, Schadstoffe aus dem Kreislauf auszuschleusen (Ausschleusungsgebot). Diese müssen getrennt erfasst werden und dementsprechend entsorgt werden.

Hierbei spielen Grenzwerte eine entscheidende Rolle. Eine Veränderung von Grenzwerten kann eine Verschiebung von Stoffströmen verursachen. Werden beispielsweise Grenzwerte für bestimmte Stoffe verschärft, kann diese Maßnahme eine erhöhte Deponierungsrate zur Folge haben.

Dieser Effekt wurde zunehmend bei der Diskussion zur Mantelverordnung sichtbar. Diese forciert eine Harmonisierung von länderspezifischen Regelungen zu einer bundesweit einheitlichen Regelung. Der Fokus liegt dabei auf mineralischen Fraktionen und einer Vereinheitlichung der Grundwasserverordnung, Ersatzbaustoffverordnung und Bodenschutzordnung. Die Mantelverordnung ist umstritten, insbesondere was die Festlegung von Grenzwerten betrifft. Es wird befürchtet, dass Verwertungsoptionen deutlich eingeschränkt werden. Die potentiellen Auswirkungen wurden in einem Planspiel der Bundesregierung zum Gesetzesentwurf untersucht (Bleher et al. 2017). Zu diesem Zeitpunkt ist es nicht ersichtlich, wann und in welchem Umfang die Verordnung in Kraft tritt.

Die als derzeit gefährlich eingestuften Abfallmengen werden erst seit 2006 vom Statistischen Bundesamt erfasst. Der größte Anteil am Bauwesen ist auf

bitumenhaltige Stoffe zurückzuführen. 2014 wurden rund 2,7 Mio. t entsorgt, mit steigender Tendenz.

Ebenfalls von Bedeutung sind Asbest, Künstliche Mineralfasern (KMF), Schwermetalle, Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Polychlorierte Biphenyle (PCB). In Abbildung 89 wird die Entsorgung von als gefährlich eingestuftem Bauabfällen aufgezeigt. Insgesamt wurden 2014 rund 7,7 Mio. t davon entsorgt. Der Großteil davon wurde deponiert. Rückschlüsse auf den Wohngebäudebestand sind nicht aussagekräftig, da der Anfall gefährlicher Stoffe lediglich für das gesamte Bauwesen statistisch erfasst wird.

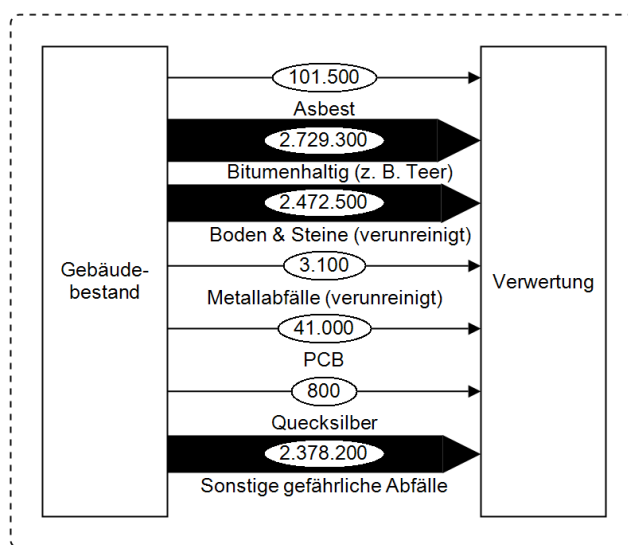


Abbildung 89: Entsorgung von gefährlichen Bauabfällen in Deutschland 2014 (in Tonnen)
(Destatis 2016a, 2016b)

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde eine Auswertung von Entsorgungsnachweisen von Abbruchgebäuden durchgeführt. Dabei wurden drei NWG und ein MFH untersucht. Beim MFH-Ziegelbauweise (BJ 1957) wurden 0,1 % (0,4 kg/m³_{BRI}) als gefährlicher Abfall entsorgt. Dies setzte sich jeweils zur Hälfte aus als gefährlich eingestuftem Dämmmaterial (AVV 17 06 03*) und asbesthaltigen Baustoffen (AVV 17 06 05*) zusammen. Der Kostenanteil des gefährlichen Abfalls an den Gesamtentsorgungskosten hingegen betrug 2,5 % (Gensbaur 2017, S. 62).

Zum Vergleich betrug bei den untersuchten NWG der Anteil der als gefährlich eingestuftem Abfälle zwischen 1,1 und 15,5 %. Im Extremfall lagen die Entsorgungskosten von gefährlichen Abfällen bei 42 % der Gesamtentsorgungskosten (Gensbaur 2017, S. 62). Um jedoch fundierte Aussagen zu treffen, bedarf es einer Auswertung einer Vielzahl von Gebäuden, die sich anhand des Baualters unterscheiden.

Durch die Einführung von Entsorgungsnachweisen durch die Nachweisverordnung (NachwV) von 2006 werden die benötigten Daten bereits erhoben. Dabei werden die Massen nach Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) in die entsprechenden Abfallschlüssel unterteilt. Dadurch kann nach jedem Abbruchvorhaben eine fundierte

Datenbasis zu den anfallenden Fraktionen und des Schadstoffgehalts auf Gebäudeebene geschaffen werden. Ebenso können Aussagen zu Transportwegen gemacht werden, da der Ursprungsort und Zieldestination bekannt sind.

Tabelle 15: Verwendungszeiträume von ausgewählten Problemstoffen in Gebäuden (Bogusch und Brandhorst 2013, S. 49, S. 66 [KMF], S. 71, [Lindan]), (BBSR 2011, S. 3), (UBA 2012, S. 12)

Problemstoff	Verwendung in Bauteilen	Verwendung ab	Herstellungs- verbot	Verwendungs- verbot
Asbest	Fassade, Zementzusatz , Bodenbeläge, Dämmung	1920	1993	1993
KMF	Gedämmte Bauteile (z.B. Wände, Dach)	1900	2000	2000
PCP	Holzschutzmittel, Beschichtungen	1970	1989	1989
Polychlorierte Biphenyle (PCB)	Fugen, Farben, Kunststoffe	1929	1983	1989
Polycyclische aromatische Kohlenwasser- stoffe (PAK)	Kleber, teerhaltige Produkte (z.B. Abdichtungen, Asphalt)	1850	1970	
Lindan	Holzschutzmittel	1950	1984	2006

Um derzeit Aussagen zu Auftreten und Schädlichkeit von Stoffen zu machen, sind weiterhin Messungen und Analysen notwendig (z. B. Schadstoffbegehung, Schadstoffkataster). Das Gebäudebualter bietet lediglich einen Anhaltspunkt. Tabelle 15 zeigt eine Übersicht der Verwendungszeiträume ausgewählter in Gebäuden verwendeter Problemstoffe.

Für Gebäude, die in den aufgezeigten Zeiträumen gebaut oder saniert wurden, ist ein Auftreten von Problemstoffen möglich. Die gängigsten werden im Folgenden beschrieben.

5.7.1 Asbest

Im Zeitraum von 1948 bis 1989, wurden fast 6 Mio. t Reinasbest nach Deutschland (BRD+DDR) importiert. Zwischen 1965 und 1980 war der Höhepunkt erreicht - mit einem durchschnittlichen Import von 230.000 t im Jahr (Albracht und Schwerdtfeger 1991, S. 20, 81). Welcher Anteil davon in Gebäuden verbaut wurde ist nicht bekannt, allerdings wird davon ausgegangen, dass das Bauwesen der größte Abnehmer war. Laut Bayerischem Landesamt für Umwelt wurde der überwiegende Teil des importierten Asbests als Asbestzement (z. B. Wellasbestplatten zur Dacheindeckung und Fassadenplatten) verarbeitet (Axmann 2017, S. 2).

In Österreich gehen Immobiliensachverständige davon aus, dass die Verweildauer von Asbestzement im Gebäudebestand zwischen 30 und 50 Jahren liegt. In Deutschland wird von 70 Jahren ausgegangen (Kratochwil 2011, S. 27). Demnach steht ein Entsorgungsmaximum noch an. Seit Beginn der Aufzeichnung von asbesthaltigen Abfällen, seit 2006, wurden rund 5 Mio. t entsorgt (Destatis 2016). Diese Zahlen beziehen sich nicht auf 100 % Asbestanteil, da asbesthaltige Baustoffe nicht gänzlich daraus bestehen. Zur Einstufung als gefährlichen Abfall liegen die Grenzwerte derzeit bei 0,1 % Asbest (Axmann 2017, S. 3). Bei der Trennung von asbesthaltigen Klebern von Estrichen beispielsweise ist der größte Anteil des Abfalls auf mineralische Fraktionen zurückzuführen (Kontamination).

Im Gebäudebeispiel (MFH 1962) hat sich gezeigt, dass über die Jahre rund 3,5 t Vinyl-Asbest-Platten (Floor-Flex-Platten) ausgetauscht worden sind, um durch neue Bodenbeläge ersetzt zu werden. Diese Platten enthalten 8-15 % Asbest. Floor-Flex-Platten wurden in den 1960ern bis Anfang 1980 verbaut. Der verwendete bitumenhaltige Kleber enthielt in vielen Fällen selbst Asbest. Daher gilt es benachbarte Bauteile zu berücksichtigen, die ebenfalls kontaminiert sein könnten.



Abbildung 90: Beispiel für asbesthaltige Bauteile (Eigene Bilder)

Der verwendete Kleber, oft ebenfalls asbesthaltig, ist mit dem Estrich dauerhaft verbunden, daher gilt es die Klebeschicht zu entfernen, was mit einer Fräse bewerkstelligt werden kann. Die abgefräste Fraktion muss gesondert als gefährlicher Abfall entsorgt werden.

Millionen m² dieser Platten, wurden in unseren Gebäuden verbaut. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Teil davon bereits entsorgt worden ist. Allerdings kann keine Aussage getroffen werden, wieviel sich noch in den Gebäuden befindet. Selbst beim Verlegen von neuen Bodenbelägen kann es vorkommen, dass die Platten nicht ausgebaut wurden, sondern der neue Boden darüber verlegt worden ist. Neben den oben erwähnten Bodenfliesen fand Asbest auch Verwendung in Fassadenplatten, Dachbekleidung (z. B. Eternitplatten), als Zementadditiv, sowie in Dämmung (Abbildung 90). 1989 wurde die Verwendung von Asbest verboten.

5.7.2 Künstliche Mineralfasern (KMF)

Künstliche Mineralfasern (KMF) sind seit etwa 1931 im Einsatz. Bis 1996 wurden durchwegs Dämmwollen eingebaut, die nach heutigem Erkenntnisstand als krebserregend einzustufen sind. Von 1996 bis zu dem Verbot von KMF im Jahr 2000 wurden sowohl krebserregende und nicht-krebserregende Produkte verwendet (BBSR

2011, S. 12). Es ist daher davon auszugehen, dass bei Gebäuden bis Baujahr 1996 problematische Produkte verbaut wurden. Baustoffe, die ab 2000 verwendet wurden, sind demnach als unproblematisch einzustufen (Bogusch und Brandhorst 2013, S. 66). Letztendlich kann nur eine Vorort-Untersuchung Aufschluss darüber geben, ob Problemstoffe verbaut sind (z. B. Schadstoffbegehung).

5.7.3 Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind Bestandteile von Teer, Kohle und Erdöl. Zu finden sind diese Stoffe in Parkettkleber, Dämm- und Dichtungsbahnen und teerhaltigen Produkten (Teerasphalt). Teerhaltige Pappen wurden bis Mitte der 1970er Jahre verwendet. PAK wurden bereits seit ca. 1850 bis zu einem Verbot in 1989 verwendet. Eine energetische- und stoffliche Verwertung ist nicht möglich (Kratochwil 2011, S. 20), (UBA 2012, S. 16f).

5.7.4 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Bereits seit 1929 fand eine industrielle Herstellung von Polychlorierte Biphenyle (PCB) statt. Diese fanden noch bis in die späten 1970er Jahre im Bauwesen Verwendung. Die Produktion wurde um 1983 eingestellt und ein Verwendungsverbot um 1980 erlassen. PCB wurde beispielsweise für dauerelastische Fugenmassen, Farben und Lacke, Akustikdämmplatten, Flammenschutzanstriche, Spachtelmassen, Klebstoffe, Kitte, Kabelummantelungen sowie Fensteranschlüsse eingesetzt (Bonner 2012, S. 3ff). Diese Produkte haben eine relativ hohe Haltbarkeit und stellen daher heute noch ein Gesundheits- und Entsorgungsproblem dar. PCB kann auch benachbarte Bauteile kontaminieren und die Ausgasungen sind erwiesenermaßen gesundheitsschädlich für den Menschen.

5.7.5 Pentachlorphenol (PCP) und Lindan

Die Holzschutznorm (von 1956) verlangte, dass ein vorbeugender Holzschutz einzusetzen ist (Bogusch und Brandhorst 2013, S. 71). Dies führte zu einem großflächigen Einsatz von schadstoffhaltigen Holzschutzmitteln. Seit 1984 wurde die Produktion von Lindan in Deutschland eingestellt, aber bis zu einem endgültigen Verbot in 2006 dennoch weiterverwendet. Es muss davon ausgegangen werden, dass Lindan und PCP bis Mitte der 1980er Jahre in fast allen verbauten Hölzern eingesetzt worden ist, sowohl im Innen- und Außenbereich. Lindan wurde in der Regel immer in Verbindung mit PCP eingebaut. Daher gilt es, beide Stoffe zu betrachten. Meist wurde PCP und Lindan im Rahmen der Erstellung von Dachstühlen von 1950 bis 1989 verwendet sowie als nachträgliche Imprägnierung von Holzbauteilen (Bogusch und Brandhorst 2013, S. 72).

Diese potentielle Belastung gilt nicht nur für Gebäude in den dementsprechenden Baualterklassen, sondern auch für Gebäude, die in diesem Zeitraum saniert oder modernisiert wurden. PCP-haltige Hölzer sind als gefährlicher Abfall (Sonderabfall) zu entsorgen, was strengen Richtlinien unterliegt. Die Vermischung mit anderen Bauabfällen ist nicht zulässig. Laut Altholzverordnung (AltholzV §9) muss Altholz seit 1.3.2003 thermisch verwertet werden und darf nicht mehr deponiert werden.

5.7.6 Einsatz von Chemischen Stoffen

Die Nutzung chemischer Produkte im Bauwesen beschränkte sich bis Ende des 19. Jahrhunderts überwiegend auf die Bereiche Holz- und Korrosionsschutz sowie Dichtungen und Anstrichstoffe. Daher können diese Stoffe auch in 150 Jahre alten Gebäuden vorhanden sein. Arsen und Quecksilber dienten schon lange als Holzschutzmittel (Rudolphi 2009, S. 3).

Dem LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH zufolge besteht praktisch für alle Gebäude, die vor 1996 errichtet worden sind, der Verdacht für gesundheitsgefährdende Stoffe wie Asbest, KMF, PCP, PCB, PAK oder Schwermetalle (Kisskalt 2016, S. 1).

5.7.7 Aktuelle Problemstoffe - Flammschutzmittel in Polystyrol

Polystyrol Dämmplatten (z. B. XPS, EPS), haben durch ihren günstigen Preis und einfache Verlegbarkeit einen hohen Marktanteil erzielt. Es hat sich gezeigt, dass die Verwendung von Flammschutzmitteln (HBCD) ein zunehmendes Problem darstellt. Seit Anfang Oktober 2016 mussten HBCD-haltige Dämmplatten als gefährlicher Abfall entsorgt werden – es wurde von einem Entsorgungsnotstand gesprochen. Durch die herrschenden Unsicherheiten haben sich beispielsweise Bauvorhaben verzögert, bzw. wurden ganz ausgesetzt.

Die Entsorgungskosten dieser Fraktionen erreichte € 7.000 - € 8.000 pro Tonne, was einer Vervierzigfachung entsprach. Diese Zahlen wurden durch den Hauptverband der Deutschen Bauindustrie und dem Industrieverband Hartschaum am Runden Tisch für Ressourceneffizienz im Bauwesen in Berlin am 14.11.2016 bestätigt.

Hier zeigt sich der Zielkonflikt zwischen dem Thema Brandschutz und Ökologie. Laut Bauindustrieverband kann auch nicht sichergestellt werden, dass Produkte die jetzt auf den Markt kommen, frei von HBCD sind. Es wird bereits eine Kennzeichnung (z. B. durch Einfärbung) durch die Verbände und Dämmstoffhersteller diskutiert.

Ende Dezember 2016 wurde die Regelung für ein Jahr ausgesetzt. Derzeit wird im Bundestag über einen zukünftigen Umgang mit der Thematik diskutiert (BMUB 2017, S. 1).

Zwischen 1988 und 2015 wurden rund 33.000 t EPS und 16.600 XPS im Bauwesen eingesetzt (Höhepunkt: 2011 mit 2.700 t). Noch in den nächsten Jahrzehnten kann dies ein Entsorgungsproblem darstellen. Der Höhepunkt der zu entsorgenden Massen, wird unter Berücksichtigung der Lebensdauer voraussichtlich um 2050 erreicht werden (Potrykus und Milunov 2015, S.85f, 93).

5.7.8 Fazit

Die Vergangenheit hat gezeigt, dass etliche Stoffe, die über längere Zeiträume verbaut worden sind, sich als problematisch herausgestellt haben. Durchschnittlich liegen rund 10 Jahre „Inkubationszeit“ zwischen der wissenschaftlichen Entdeckung, bis zur öffentlichen Aufmerksamkeit. Ein ähnliches Phänomen ist beispielsweise bei Umweltproblemfeldern (z. B. Ozonabbau, Klimawandel) zuerkennen (Klöpffer und Grahl 2009, S. 222).

Das jüngste Beispiel im Bauwesen sind HBCD-haltige Dämmplatten die 2016 als gefährlicher Abfall eingestuft würden und dadurch einen *Entsorgungsnotstand* ausgelöst haben. Wie bereits erwähnt könnten manche Nano-Baustoffe eventuell in ein paar Jahren ein ähnliches Problem darstellen. Auch das Flammenschutzmittel Decabromdiphenylether (deca-BDE) soll nach EU-Informationen nicht in die EU-Chemikalienverordnung (REACH) aufgenommen, sondern stattdessen verboten werden.

Zur Messbarkeit der Quantität sowie der Qualität von Problemstoffen in Gebäuden kann keine pauschale Aussage getroffen werden. Die Erfassung anhand von Wahrscheinlichkeiten stellt einen möglichen Weg dar. Allerdings müssen diese Werte erst noch ermittelt werden, was im Rahmen dieser Arbeit nicht durchführbar ist. Eine Schadstoffbegehung einzelner Gebäude kann Abhilfe leisten. Allerdings ist dies sehr aufwendig und es können keine pauschalen Rückschlüsse auf Gebäude gleicher Bauart getroffen werden.

Dennoch steht fest, dass noch unzählige problematische Stoffe in unseren Gebäuden verbaut sind. Während einige verboten wurden, werden sich noch Jahre danach Problemstoffe finden, die entsorgt werden müssen. Nichtsdestotrotz verbauen wir derzeit immer noch Stoffe, die vielleicht erst in Jahren verboten werden. Daher ist es bereits in der Gebäudeplanungsphase von hoher Relevanz Materialinventare zu erstellen und potentiell gefährliche Stoffe im Vorfeld auszuschließen.

5.8 Geometrische Erfassung von Gebäuden

Die Geometrie der einzelnen Gebäude im Untersuchungsraum stellt eine entscheidende Eingangsgröße für das Stoffstrommodell dar. Der abgeleitete Brutto-Rauminhalt (BRI) wird mit den jeweiligen Stoffintensitäten multipliziert, um das Gesamtstofflager der einzelnen Gebäude zu ermitteln.

Wie bereits beschrieben, bilden aufbereitete LoD 1 Daten die Grundlage dieser Arbeit (Kapitel 2.2.3.3). Neben dem benötigten BRI können auch individuelle Flächen (z.B. Grundflächen, Dachflächen etc.) abgeleitet werden. Die Ableitung der Flächen bietet den Vorteil, Berechnungen zu einzelnen Gewerken (z.B. Dachbedeckung oder Außenwänden) durchzuführen.

LoD 1 Modelle sind in Deutschland flächendeckend verfügbar und werden von den Vermessungsämtern zur Verfügung gestellt. Daher wurde auf diese Detaillierungsstufe zurückgegriffen, da flächendeckende LoD 2 Daten für München derzeit gerade erst erfasst werden. Im Stoffstrommodell ist es jedoch möglich, detailliertere Eingangsdaten (LoD 2 oder höher) zu verwenden. Um möglichst hochauflösende Eingangsdaten zu bekommen, werden die LoD 1 Daten im Rahmen dieser Arbeit angepasst und benötigte Größen (z. B. Flächen) aus dem Datensatz abgeleitet.

5.8.1 Erfassung des Brutto-Rauminhalts

Das überirdische Gebäudevolumen (m^3_{BRI}) wird direkt aus der Gebäudedatei (3D-Stadtmodell) abgeleitet. Anschließend muss die LoD 1 Datenbasis angepasst werden, um ein Dach und einen Keller hinzuzufügen. Diese Positionen werden summiert, um das Gesamtvolumen der einzelnen Gebäude zu ermitteln (Abbildung 91).

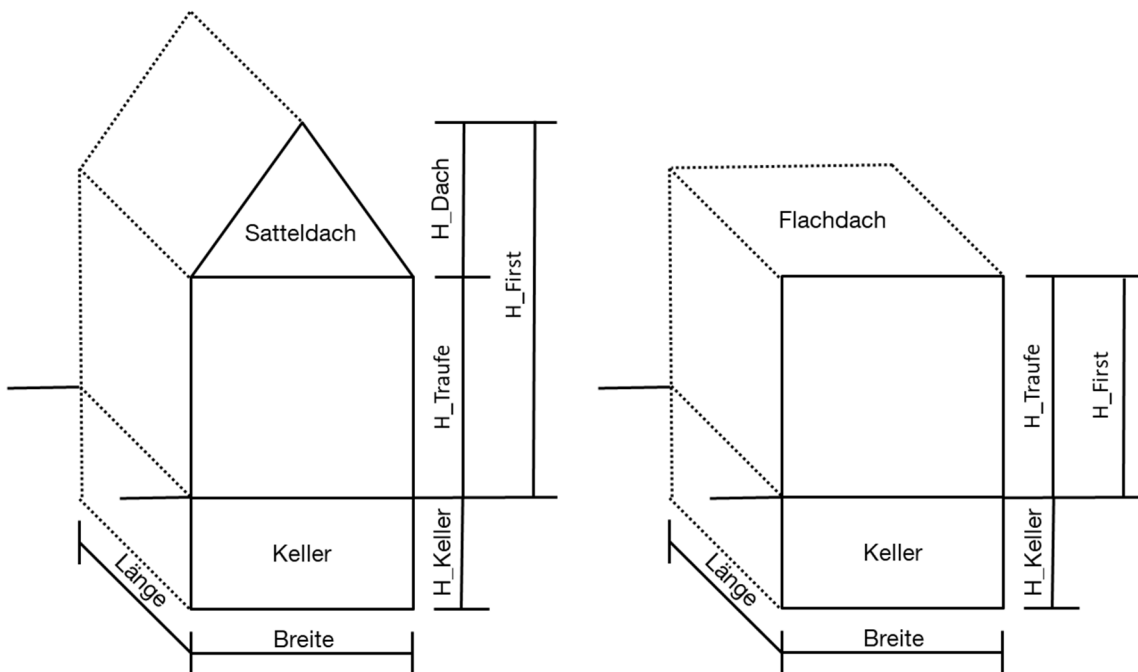


Abbildung 91: Ableitung von Volumen und Flächen aus dem 3D-Stadtmodell

5.8.1.1 Dach

In der Gebäudedatei (3D-Stadtmodell) werden die Anzahl der Stockwerke, sowie die Höhe der Traufe (H_{Traufe}) und des Firsts (H_{First}), ausgewiesen. Aus der Differenz ergibt sich die Höhe des Daches. Im Fall das $H_{\text{First}} = H_{\text{Traufe}}$, hat das betrachtete Gebäude ein Flachdach (Abbildung 91).

Die Länge und die Breite der Gebäude kann ebenfalls aus der Gebäudedatei abgeleitet werden, da der Grundriss bekannt ist. Aus diesen Werten kann das Volumen des Daches berechnet werden.

$$\text{Volumen Dach (m}^3\text{)} = \frac{1}{2} \times (H_{\text{First}} - H_{\text{Traufe}}) \times \text{Breite} \times \text{Länge}$$

Bei einer zukünftigen Verwendung von LoD 2 Daten (oder höher), kann diese Ableitung entfallen, da die Dachformen bereits dargestellt werden.

5.8.1.2 Keller

Im Datensatz müssen unterirdische Geschosse (z. B. Keller) hinzugefügt werden, da lediglich oberirdische Geometrien erfasst werden. Demnach muss der BRI der einzelnen Gebäude um ein zusätzliches Geschoss erweitert werden. Dabei wird auf Daten des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) zurückgegriffen, um den Anteil unterkellerten Gebäude zu ermitteln.

Laut IWU sind 87,4 % der Bestandsbauten unterkellert (Diefenbach et al. 2010, S.60). Eine konkrete Angabe zur Deckenhöhe des jeweiligen Kellers wird nicht gemacht. Es erfolgt lediglich eine Einstufung in hoch, niedrig und sehr niedrig. Die Einstufung hoch bedingt, dass eine erwachsene Person bequem aufrecht stehen kann. 76 % der Keller fallen in diese Kategorie.

In dieser Arbeit werden folgende Annahmen getroffen: Bei MFH wurde für den Keller von einer Geschosshöhe von 2,7 m (incl. Bodenplatte) ausgegangen, bei EFH von 2,6 m. Die Unterschiede ergeben sich, da konstruktionsbedingt EFH eine geringer dimensionierte Bodenplatte haben als MFH. Diese Annahmen bestätigen sich durch Messungen der Deckenhöhe in Kellergeschossen, die ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt worden sind (Anhang A). Der BRI des Kellers errechnet sich anhand der Geschosshöhe (m) multipliziert mit der bebauten Fläche (m²), die aus der Gebäudedatei abgeleitet wird.

Bei der Verteilung der Keller wurde davon ausgegangen, dass alle MFH unterkellert sind. Der Anteil nicht-unterkellerten Gebäude (12,6 %) wurde demnach auf EFH der älteren Baujahre verteilt. Im Fallbeispiel war eine Übereinstimmung festzustellen, da EFH vor Baujahr 1949 ebenfalls rund 12 % entsprechen. Im Falle einer Unterkellerung, wurde ebenfalls die errechnete BGF um ein zusätzliches Geschoss erweitert.

5.8.2 Ermittlung und Ableitung von Flächen

Aus gebäudebezogenen Geoinformationsdaten können neben dem Volumen auch einzelnen Flächen (z. B. Außenwand-, Fensterflächen) abgeleitet werden. Dies bietet den Vorteil, dass die stoffliche Zusammensetzung einzelner Gewerke (z. B. Fenster oder Dachbedeckungen) detaillierter untersucht werden kann.

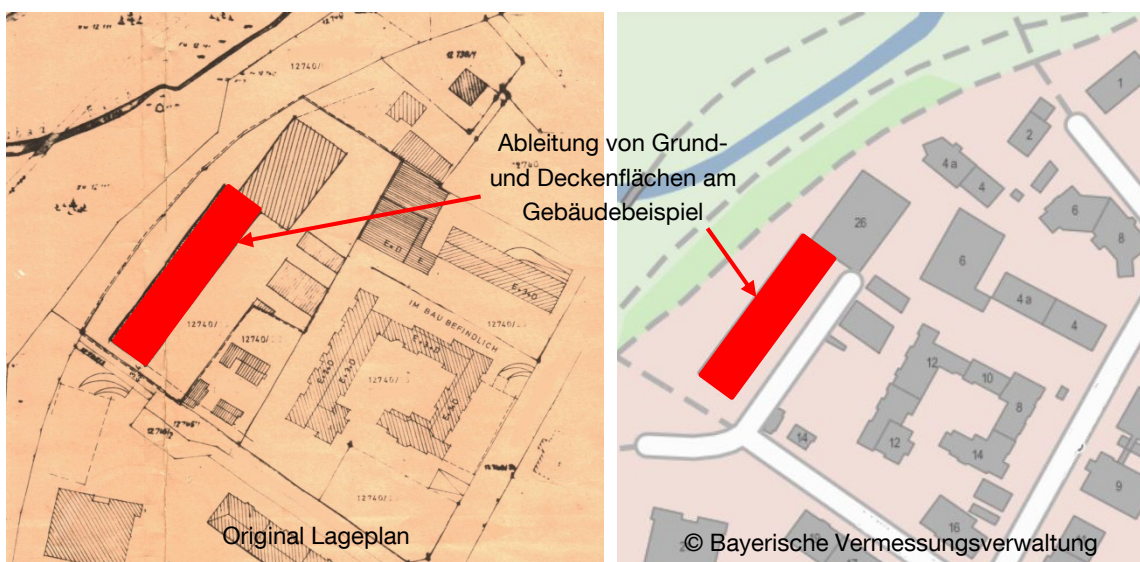


Abbildung 92: Lageplan des Beispielgebäudes von 1962 (links) im Vergleich zur digitalen Darstellung aus Vermessungsdaten von 2015 (rechts) zur Ableitung von Grund- und Deckenflächen

5.8.2.1 Bebaute Fläche (BF)

Die bebaute Fläche (BF) des Gebäudes kann direkt aus dem Stadtmodell abgeleitet werden. Die Geodaten basieren auf dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS), bzw. der digitalen Flurkarte, welche die bebaute Fläche ausweist (Abbildung 92). Die BF kann auch zur Bestimmung der Deckenflächen herangezogen werden.

5.8.2.2 Außenwandflächen

Aus 3D-Stadtmodellen kann die Außenwandfläche eines Gebäudes automatisch abgeleitet werden, da die Kubatur der Gebäude bekannt ist (Abbildung 93). Ebenso können anhand des Flächenschätzverfahrens des IWU Fassadenflächen abgeschätzt werden. Die Fassadenfläche wird dabei analog zum Verhältnis zur Wohnfläche ermittelt. Das Flächenschätzverfahren wurde zum Zweck energetischer Untersuchungen entwickelt und basiert auf einer Auswertung von 4.016 Gebäuden (Loga et al. 2005, S. 5).

Im Rahmen dieser Arbeit werden beide Verfahren angewandt, um die Plausibilität der Eingangsdaten zu überprüfen. Die anhand des Flächenschätzverfahrens ermittelten Werte sind vergleichbar mit den abgeleiteten Werten des Gebäudemodells (siehe Kapitel 6). Auf eine genaue Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.



Abbildung 93: Auszug aus einem CityGML Model im 3DCityDB Webclient des Lehrstuhls für Geoinformation mit Erkennung der Gebäudehülle (Mit freundlicher Genehmigung von Thomas Kolbe 2015)

Öffnungsanteile der Fassade

Die Öffnungsanteile (z. B. Fensteröffnungen, Türen, Tore u.a.) werden im LoD 1 (sowie LoD 2) nicht erfasst. Diese haben jedoch eine Auswirkung auf die errechneten Materialintensitäten. Bei geringen Öffnungsanteilen steigt der Stoffanteil der Außenwandkonstruktion (z. B. Mauerwerk). Bei größeren Öffnungsanteilen steigt beispielsweise der Glasanteil. Abbildung 94 zeigt eine beispielhafte Untersuchung anhand ausgewählter Beispiele.

Die Öffnungen der Fassade sind rot gekennzeichnet und werden als prozentualer Anteil des Fassadenausschnitts ausgewiesen. In den gezeigten Beispielen liegt der Öffnungsanteil zwischen 23 und 50 %. Es hat sich gezeigt, dass die Öffnungsanteile von Gebäuden jüngeren Baujahrs zugenommen haben. Dies hat auch mit der Entwicklung von technisch anspruchsvollen Baustoffen zu tun (z. B. hochdämmende Verglasungen, Doppelfassaden u.a.). Um allgemeingültige Aussagen zu treffen, muss die Anzahl der untersuchten Fassaden weiter erhöht werden, was im Rahmen dieser Arbeit nicht durchführbar ist.

Eine weitere Möglichkeit die Öffnungsanteile detailliert zu erfassen bieten Photogrammetrische Methoden, wie z. B. das Auswertungssystem PHIDIAS (Kombinierte Auswertung von Bildaufnahmen und Punktwolken) oder das Generieren von Punktwolken anhand von Laserscanning Daten. Die Laserscandaten können mittels Befahrung oder Befliegung erhoben werden und teilautomatisiert ausgelesen werden.

Laut Bormann et al. besitzt die Auswertung von Punktwolken ein hohes Entwicklungspotential - auch was die Innenraumvermessung angeht. Daher wird Laserscannern in Zukunft noch mehr Bedeutung zukommen als heute (Bormann et al. 2015, S. 356). Arbeiten an der Technischen Universität München haben gezeigt, dass die Verwendung von Punktwolken, um beispielsweise Innenraummodelle zu produzieren, ein großes Potential aufweist. Diese Art der Erfassung ist jedoch mit hohem Aufwand verbunden, da es sich derzeit um einen halbautomatischen Prozess handelt. Sollte die Automatisierung diesbezüglich weiter fortschreiten, kann eine flächendeckende Anwendung zunehmend interessanter werden.

Derzeit stehen in Stadtmodellen keine flächendeckenden Daten zu Fassadenöffnungsanteilen zur Verfügung. Daher wird in dieser Arbeit ebenfalls auf das Flächenschätzverfahren zurückgegriffen (Loga et al. 2005). Dabei wurde eine detaillierte Flächenaufnahme an Gebäuden, unterschiedlicher Baualtersklasse und Gebäudetyp (EFH, MFH) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in einer Matrix (Tabelle 16 dargestellt, die mit den Gebäudedaten verknüpft werden.

Hierbei wird die Wohnfläche (WF) aus der Gebäudedatei mit den korrespondierenden Faktoren der Matrix multipliziert. Bei EFH wurden durchschnittlich $0,2 \text{ m}^2$ Fensterfläche (FF) pro m^2_{WF} ermittelt. Bei MFH beträgt der Anteil $0,19 \text{ m}^2_{\text{FF}}/\text{m}^2_{\text{WF}}$ (Diefenbach et al. 2010, S. 78) (Loga et al. 2005, S. 17).



Abbildung 94: Ermittlung der Öffnungsanteile von Fassaden anhand unterschiedlicher Baualtersklassen (Eigene Darstellung)

Tabelle 16: Fensterflächen pro m² Wohnfläche (m²_{FF}/m²_{WF}) (Diefenbach et al. 2010, S. 78), (Loga et al. 2005, S. 17)

Gebäudetyp	Baualtersklasse						Ø alle
	bis 1918	1919-1948	1949-1957	1958-1968	1969-1978	ab 1978	
Ø EFH	0,174	0,192	0,209	0,216	0,200	0,197	0,200
Ø MFH	0,169	0,172	0,184	0,200	0,172	0,172	0,181
Ø alle	0,173	0,188	0,201	0,212	0,195	0,193	0,195

Aus der Auswertung des IWU ist ersichtlich, dass die Fensterflächenanteile bei EFH und MFH, bis zur Baualtersklasse 1958-1968 ansteigen. Danach ist ein Rückgang zu verzeichnen.

5.8.2.3 Innenwände

Bei der derzeitigen Erfassung von Stadtmodellen ist es nicht möglich in Gebäude hineinzugehen, um beispielsweise Innenwände zu erfassen. Anhand von Flächenkennwerten können diese jedoch abgeschätzt werden.

Eine Auswertung von BKI Daten von 76 Objekten hat ergeben, dass die Konstruktionsgrundfläche (KGF) bei Ein- und Zweifamilienhäusern zwischen 16,2 bis 21,9 % der Bruttogrundfläche (BGF) liegt (Mittelwert 18,8) (Kalusche 2011, S. 40). Die BGF hingegen kann aus dem Stadtmodell abgeleitet werden, da die Grundfläche und die Anzahl der Stockwerke bekannt sind. Durch Abzug der Grundfläche der Außenwände kann die Grundfläche der Innenwände ermittelt werden. Multipliziert mit der Raumhöhe (ableitbar aus Modell) und Standardwerten für Innenwandstärken, kann das Konstruktionsvolumen (KV) errechnet werden.

Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit haben ergeben, dass der Öffnungsanteil der Innenwände bei rund 10 % der Innenwandfläche liegt (Anhang A). Um eine aussagekräftige Datenbasis zu bekommen, bedarf es zusätzlicher Untersuchungen.

5.8.2.4 Böden und Decken

Zur Berechnung der Boden- und Deckenflächen (z. B. BGF) kann die BF des Gebäudes herangezogen werden. Hier gilt es eventuell vorhandene Dachüberstände zu berücksichtigen. Zusätzlich spielt die Anzahl der Geschosse eine Rolle.

In den Eingangsdaten für dieses Modell ist die Anzahl der Geschosse bereits ausgewiesen. Sollten diese Daten nicht hinterlegt sein, können beispielsweise anhand von Fassadenbildern (z. B. Google Street View), typischer Bauweisen der Nachbargebäude, sowie aus regionalen Höhenbegrenzungen Schätzungen abgeleitet werden. Die Vorgehensweise ist vereinfachend in Abbildung 95 dargestellt. Die Deckenstärke sowie die verwendeten Baustoffe können beispielsweise aus dem Katalog des Zentrums für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) entnommen werden.



Abbildung 95: Auswertung der Geschossezahlen am Gebäudebeispiel (Bild aus Google Earth)

Es gilt zu beachten, dass Aussparungen (z. B. für das Treppenhaus oder Atrien) nicht berücksichtigt werden. Bei zweiläufigen Treppen (z. B. U-Treppe mit Halbpodest), kann die Decke ohne Aussparung übermessen werden, falls diese aus dem gleichen Baustoff wie die Treppe besteht (z. B. Stahlbeton), da das Volumen der Treppe ungefähr mit dem der Aussparung übereinstimmt. Eine zusätzliche Erfassung der Treppenformen würde den Erhebungsaufwand erschweren, da Vor-Ort-Untersuchungen nötig wären.

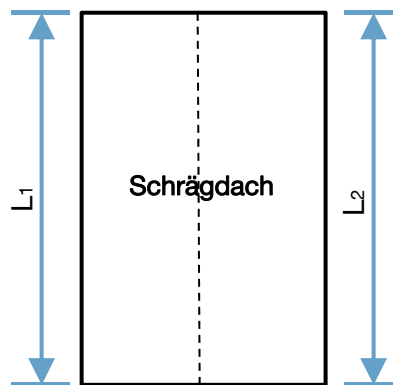
5.8.2.5 Dächer

Die Dachflächen können analog zum Dachvolumen berechnet werden. Die benötigten Werte werden aus dem Gebäudemodell abgeleitet (siehe auch 5.8.1.1). Zur Vereinfachung werden Dachüberstände nicht berücksichtigt - in LoD 2 Modellen werden auskragende Bauteile ebenfalls nicht mit einbezogen (SIG3D 2013). Diese Eigenschaften werden erst in LoD 3 dargestellt. Eine flächendeckende Erstellung von LoD 3 Modellen ist derzeit nicht angedacht.

Angaben zur Materialität der Dachbedeckung hingegen können nur eingeschränkt gemacht werden. Selbst wenn der Ziegeldachstein vielerorts überwiegt, kommen auch andere Materialien, wie z. B. Eternit, Photovoltaik, Kupfer, Titanzink und andere Metalle zum Einsatz. Eine Auswertung von hochauflösenden Luftbildern kann bei der Identifizierung behilflich sein. Eine hohe Genauigkeit kann letztendlich eine Vor-Ort-Begehung liefern.

5.8.2.6 Dachrinnen und Fallrohre

Die Länge der Dachrinnen und der Fallrohre kann ebenfalls aus der Gebäudekubatur abgeleitet werden. Hierzu sind die Länge des Dachs, sowie die Gebäudehöhe entscheidend (Abbildung 96).



Berechnung der Dachrinnenlänge

$$\text{Schrägdach} = \sum L1 + L2$$

Abbildung 96: Ermittlung der Dachrinnenlänge bei Schrägdächern

5.8.2.7 Technische Anlagen

Die Leitungslängen für Elektrik, Wasser, Abwasser und Heizung können anhand von Kennwerten beschrieben werden. Im Gebäude- und Fallbeispiel wurden die gemessenen Leitungslängen auf Flächen- und Volumenwerte bezogen. Die Ergebnisse werden in Anhang B und Kapitel 6 aufgezeigt. Ebenso wurde auf Arbeiten des IÖR zurückgegriffen, in der weitere Leitungskennwerte ermittelt wurden (Krauß et al. 2016, S. 32f)

Es ist dennoch notwendig, weitere Leitungskennwerte zu generieren, um eine aussagekräftigere Datenbasis zu schaffen. Ebenfalls muss auch, wie bei den Öffnungsanteilen der Fassaden, nach unterschiedlichen Baualtersklassen und Gebäudetypen differenziert werden.

Das direkte Ableiten von Leitungslängen aus den verwendeten Gebäudemodellen stellt sich als schwierig heraus. Als Beispiel: Bei der Warmwasserverteilung oder Lüftungsanlagen ist entscheidend, ob diese zentral oder dezentral angeordnet sind, da sich die Leitungslängen und Anzahl der Einzelsysteme in beiden Fällen stark unterscheiden. Für eine bauteil- und komponentenbasierte Darstellung ist BIM geeignet, das diesen Aspekt berücksichtigt. Derzeit stellt die Ableitung anhand vom Kennwerten die vielversprechendste Methode dar.

5.8.3 Plausibilitätsprüfung von Gebäudegeometrien

Zur Prüfung der Plausibilität der Eingangsdaten für dieses Modell wurden Flächen- und Volumenkennwerte von BKI Gebäuden gebildet. Insgesamt wurden 65 EFH und 34 MFH der Baujahre 1994 bis 2014 ausgewertet (Tabelle 17). In Kapitel 6 werden diese Werte mit denen des Fallbeispiels verglichen.

Tabelle 17: Auswertung von Flächen- und Volumenkennwerten anhand von BKI Objekten (Eigene Auswertung)

Kennwerte	Einheit	EFH		MFH	
		Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung
BRI/BGF	(m ³ /m ²)	3,10	0,32	2,85	0,31
BRI/NF	(m ³ /m ²)	4,61	0,59	4,17	0,58
BGF/NF	(m ² /m ²)	1,49	0,15	1,46	0,12
BRI/BF	(m ³ /m ²)	7,77	2,07	12,10	3,97
BGF/BF	(m ² /m ²)	2,53	0,73	4,26	1,33
AW/BF	(m ² /m ²)	1,95	1,86	2,55	0,80
AW/BRI	(m ² /m ³)	0,29	0,07	0,22	0,06
AW/BGF	(m ² /m ²)	0,89	0,23	0,62	0,21
IW/BF	(m ² /m ²)	1,35	1,38	3,28	1,55
IW/BRI	(m ² /m ³)	0,20	0,05	0,27	0,07
IW/BGF	(m ² /m ²)	0,64	0,17	0,77	0,22
AW/IW	(m ² /m ²)	1,49	0,55	0,85	0,29
BF/DF	(m ² /m ²)	0,91	0,30	0,83	0,29

BRI	Brutto-Rauminhalt (m ³)	DF	Dachfläche (m ²)
BGF	Brutto-Grundfläche (m ²)	AW	Außenwandfläche (m ²)
NF	Nutzfläche (m ²)	IW	Innenwandfläche (m ²)
BF	Bebaute Fläche (m ²)		

Durch die Kennwerte werden auch die Unterschiede von EFH und MFH erkennbar. Beispielsweise ist bei MFH ein höherer Anteil BGF im Bezug zum BRI vorhanden. Im Modell wird auch aus diesen Gründen zwischen EFH und MFH unterschieden.

5.8.4 Fazit

Wie in diesem Kapitel dargestellt, ist das Ableiten der Haupt-Geometrien und -Massen (Konstruktion, Außenwände, Decken, Dächer, Innenwände u.a.) eines Gebäudes anhand LoD 1 Modellen möglich. Dennoch ist diese Erfassungsmethode mit Unsicherheiten verbunden, insbesondere bei der Betrachtung der Anlagentechnik, da diese schwer ableitbar ist.

Durch das Generieren von Kennwerten kann dieses Problem umgangen werden. Allerdings ist es nötig zu wissen, welche Anlagentechnik letztendlich verbaut ist.

Wasserleitungen und Kabel sind in nahezu jedem Gebäude verbaut und werden nach ähnlichen Vorgehensweisen verlegt. Bei Heizsystemen hingegen besteht ein Unterschied, ob beispielsweise ein auf Heizkörper basiertes System oder eine Flächenheizung eingesetzt wird, da diese sich stark in den eingesetzten Baustoffen unterscheiden.

Eine sich ergänzende Vorgehensweise mit LoD 1 Modellen und einer Verknüpfung von berechneten Durchschnittskennwerten stellt eine sinnvolle Möglichkeit da, um Gebäudeinformationen zu erfassen und sollte weiter forciert werden. Eine Kopplung mit Vor-Ort-Untersuchungen (z. B. *ResourceApp*), wo beispielsweise stoffliche Daten den entsprechenden Gewerken im Modell direkt zugeordnet werden können, würde eine Datenerfassung ebenfalls verbessern.

5.8.4.1 Die Rolle von Building Information Modelling (BIM)

Die Rolle von Building Information Modellen (BIM) und dessen Integration in Stadtmodelle (z. B. CityGML) wurde bereits im vorherigen Kapitel angesprochen. BIM ist ein Werkzeug auf der Gebäudeebene, Stadtmodelle erlauben eine räumliche Darstellung.

Bormann beschreibt BIM als ein digitales Abbild eines Bauwerks mit großer Informationstiefe. Neben der dreidimensionalen Geometrie der Bauteile zählen Zusatzinformationen wie Typinformationen, Kosten oder technische Eigenschaften als wichtige Faktoren. Der Begriff wird ebenfalls verwendet um die Nutzung dieses digitalen Modells über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks hinweg zu beschreiben. Von der Planung und Ausführung, über die Bewirtschaftung, bis hin zum Rückbau. Hier liegt laut Bormann das größte Potenzial der BIM-Technologie (Bormann et al. 2015, S. 4).

Mittlerweile ist es möglich, BIM in CityGML Modelle zu integrieren um detailliertere Modelle auf räumlicher Ebene zu erhalten. Durch das standardisierte *Industry Foundation Classes* (IFC) Datenmodell ist ein Austausch digitaler Modelle über verschiedene Anwendungen und Systeme der unterschiedlichen Hersteller gegeben. Das IFC Datenmodell erlaubt eine detaillierte digitale Modellierung und eine umfassende semantische Beschreibung eines Gebäudes.

Durch die Verabschiedung der EU Richtlinie für Vergaberecht wurde beschlossen, dass die EU Mitgliedstaaten die BIM-Nutzung bei der Realisierung von öffentlichen Bau- und Infrastrukturprojekten fördern sollen (Bormann et al. 2015, S. VI). Auch in der Praxis findet BIM immer mehr Anhänger. Andere Länder sind Deutschland diesbezüglich schon weit voraus, wie z. B. Singapur, wo die Verwendung von BIM bereits Standard und für Baugenehmigungen verpflichtend ist.

Es ist zu erwarten, dass diese Methode in Zukunft auch in Deutschland großflächige Verwendung findet. Hieraus ergäbe sich die Chance, eine einheitliche Dokumentation über den gesamten Gebäudelebenszyklus von Bauwerken zu bekommen. Dies würde auch eine Analyse der Stoffströme vereinfachen. 2015 wurde bereits der BIM Stufenplan des Bundesministeriums für Verkehr und Infrastruktur (BMVI) herausgebracht, der BIM bis 2020 verpflichtend für öffentliche Infrastruktur-Bauten machen soll.

Aus einem BIM lässt sich eine präzise Massenermittlung ableiten, vorausgesetzt die Materialinformationen (Semantische Informationen) der Bauteile sind im Modell

hinterlegt. Die Massenermittlung kann beispielsweise bei einem Rückbau von Gebäuden verwendet werden. Dies ist nur möglich, wenn das BIM über den gesamten Lebenszyklus aktualisiert (einpflegen von baulichen Veränderungen, Sanierungsmaßnahmen), für alle relevanten Akteure zugänglich gemacht wird und am Ende des Lebenszyklus noch einsehbar ist.

Da Bauwerke eine verhältnismäßig lange Lebensdauer aufweisen, muss das Modell über Jahrzehnte beibehalten und gepflegt werden, um als Basis für eine Lebenszyklusbetrachtung zu dienen.

Ein BIM von einem in der Planung befindlichen Gebäude zu erstellen ist aus vielen Gründen sinnvoll. Allein zum Zweck einer Massenermittlung eines Bestandgebäudes, überwiegt jedoch der Aufwand den Nutzen. Es ist zwar möglich, bestehende Baupläne zu vektorisieren, in ein BIM umzuwandeln und mit Objektdatenbanken zu verknüpfen. Dieser Weg bedarf jedoch auch manueller Schritte, da es sich lediglich um einen halbautomatischen Prozess handelt.

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben ist eine flächendeckende Gebäudedarstellung in BIM derzeit nicht realisierbar. Allerdings wird in den Vermessungsämtern derzeit daran gearbeitet, flächendeckende LoD 2 Daten im CityGML-Standard bereitzustellen.

Durch den Aufbau dieses Stoffstrommodells ist es möglich, zukünftig Gebäudemodelle mit höheren Detaillierungsgraden als Datenbasis zu verwenden. Für eine bauteilbasierte Betrachtung sind weitere Anpassungen nötig.

5.8.4.2 Vorort Aufnahme durch mobile Apps

Durch fortschreitende Technologie stellt auch die Datenaufnahme vor Ort eine Möglichkeit dar. Hierbei würde es sich anbieten, bei einer Vor-Ort-Untersuchung ein digitales Gebäudemodell mit semantischen Daten (Materialität, Schadstoffpotenzialen u.a.) anzureichern und um fehlende Information ggf. zu ergänzen. Die aufgenommenen Informationen würden im digitalen Modell an entsprechender Stelle hinterlegt werden. Diese Vorgehensweise wäre beispielsweise bei einer Erfassung von Leitungen im Hinblick auf Metalle sinnvoll.

Im r^3 Verbundprojekt *ResourceApp* werden derzeit Ansätze entwickelt, um mithilfe einer App Rohstoffpotenziale im Hochbau zu erkennen und zu erschließen (Stier et al. 2014). Dieses Projekt zielt darauf ab, den Anteil an Metallen in Gebäuden zu erfassen. Anhand von Bilderkennung sollen Rohstoffinventare bei einer Vor-Ort-Begehung erstellt werden.

Bei einer flächendeckenden Anwendung und einem höheren Automatisierungsgrad, kann eine zusätzliche Datenbasis geschaffen werden. Dies ist insbesondere bei einer Betrachtung von „kleinen“ Massenströmen (z. B. Metalle, Kunststoffe) interessant.

6 Validierung des Stoffstrommodells

Nach Prognosen der Stadt München wird die Bevölkerung Münchens bis 2030 auf 1,8 Millionen Einwohner ansteigen. Dies ist im Vergleich zu 2015 ein Anstieg von über 16 % (Landeshauptstadt München 2017, S. 59). In Freiam-Neuaubing, eines der größten Stadtentwicklungsprojekte in Deutschland, wird in den nächsten 20 bis 30 Jahren Wohnraum für bis zu 25.000 Menschen geschaffen (Abbildung 97). Zur Validierung des in dieser Arbeit beschriebenen Stoffstrommodells wurde dieser stark wachsende Stadtteil ausgewählt.

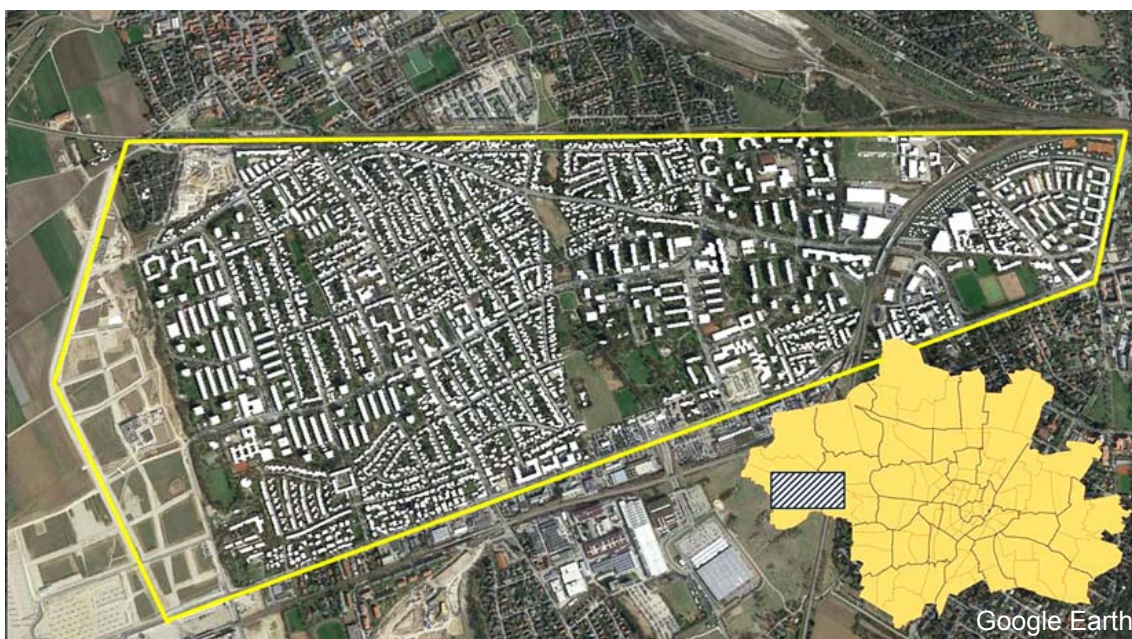


Abbildung 97: Übersicht des Untersuchungsraums – Stadtteil München-Freiam/Neuaubing

Zur Erstellung von Wohnungen und der benötigten Infrastruktur bedarf es einer Vielzahl an Rohstoffen. Freigesetzte Stoffe aus dem Bestand (z. B. durch Gebäuderückbau) können einen entscheidenden Beitrag leisten, um einen Teil des Bedarfs zu decken. Ziel ist es, mit diesem Fallbeispiel die Stoffströme des Wohnungsbaus und den potenziellen Selbstversorgungsgrad (SVG) für Rohstoffe (Grad der stofflichen Autarkie) des Untersuchungsraums zu ermitteln.

Für das rund 4 km² große Areal, wurde ein 3D-Stadtmodell (LoD 1) von der Landeshauptstadt München (LHM) (Referat für Geoinformation und Referat für Stadtplanung) zur Verfügung gestellt. Das Modell umfasst insgesamt 2.401 Wohngebäude (bis Baujahr 2012) und wurde mit gebäudespezifischen Daten (Geometrie, Baujahr, Anzahl Wohneinheiten, Nutzungsart u.a.) aus dem Datenbestand der LHM angereichert.

6.1 Geometrische Abbildung des Wohnbestands

Aus dem Stadtmodell wurden in einem ersten Schritt die jeweiligen Brutto-Rauminhalte (BRI) nach Baualtersklasse und Wohngebäudetyp (Einfamilienhaus (EFH);

Mehrfamilienhaus (MFH) entnommen. Als EFH wurden Gebäude mit maximal zwei Wohneinheiten definiert. Die Anzahl der Wohneinheiten ergeben sich aus der Gebäudedatei der LHM, was eine Unterscheidung ermöglichte. Die Vorgehensweise, um geometrische Gebäudedaten aus einem LoD 1 Modell anzupassen und zu abstrahieren, wird in Kapitel 5 beschrieben.



Abbildung 98: Verteilung von Gebäudetypen und Baujahr in Freiam (Eigene Bilder)

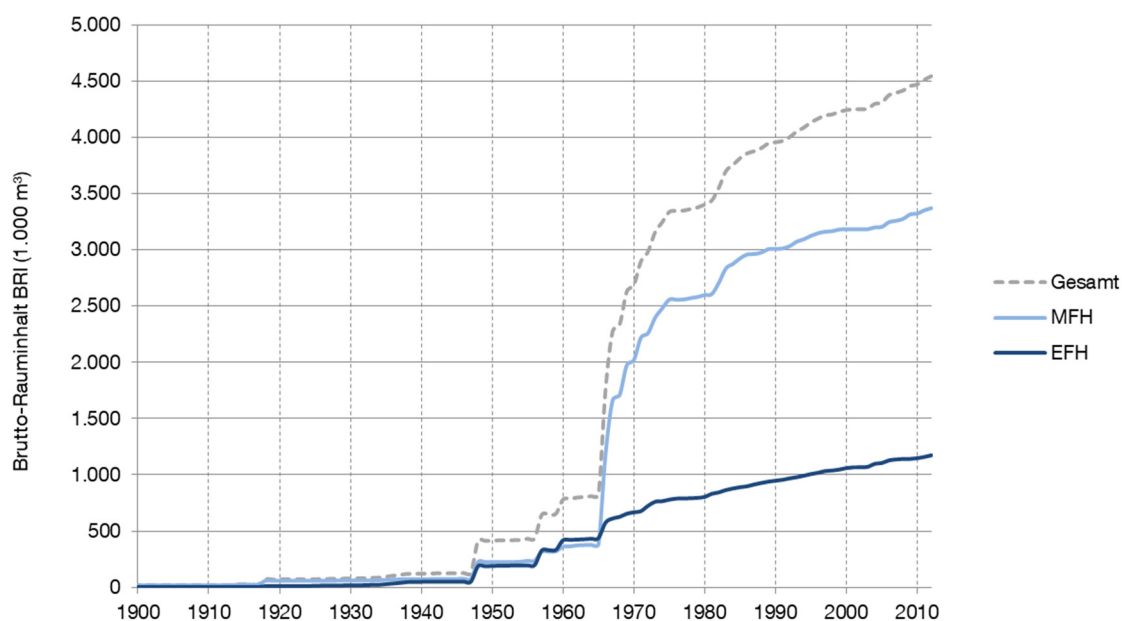
Das Untersuchungsgebiet besteht überwiegend aus Wohngebäuden (WG). Daten zu Nichtwohngebäuden (NWG) wurden im bestehenden Gebäudemodell nicht erfasst. Abbildung 98 zeigt die Verteilung von gängigen Gebäudetypen im Untersuchungsraum. Tabelle 18 zeigt eine Zusammenfassung der aus dem Modell abgeleiteten Flächen- und Volumenkenwerte.

Zur Prüfung der Plausibilität der Ableitung von Flächen und Volumen aus dem LoD 1 Gebäudemodell wurden die ermittelten Kennwerte der Gebäudedatei mit ermittelten Werten des BKI verglichen. Insbesondere das Verhältnis von BRI/BGF stellt einen bedeutenden Kennwert dar. Eine eigene Auswertung und Kennwertberechnung (von 65 EFH und 34 MFH) anhand Gebäudedaten des BKI (siehe Kapitel 5) ergab ähnliche Werte (BGF/BRI für EFH: 3,1; MFH: 2,9). Weitere Flächen- und Volumenkenwerte der 2.401 betrachteten Gebäude sind in Anhang D aufgeführt.

Tabelle 18: Flächen- und Volumenkenwerte der untersuchten Wohngebäude im Bezugsraum

	EFH	MFH	Gesamt
Anzahl Gebäude	1.466	935	2.401
Wohneinheiten (WE)	1.888	9.933	11.821
BGF (m ²)	385.815	1.109.347	1.495.162
BRI (m ³)	1.174.161	3.370.430	4.544.592
Bebaute Fläche (BF) (m ²)	130.977	198.116	329.093
Kenwerte			Mittelwert
BGF/WE	138,4	125,6	132
BRI/WE	629,7	389,1	509,4
BF/WE	73,3	28,5	50,9
BRI/BGF	3,05	3,11	3,08

Die betrachteten Gebäude mit insgesamt 11.821 Wohneinheiten (WE) weisen eine Gesamtfläche von rund 1,5 Mio. m²_{BGF} auf. Bei einer durchschnittlichen Wohnfläche pro Einwohner in München von 39 m² (≈ 58 m²_{BGF}) und einer durchschnittlichen Haushaltsgröße von 1,8 Personen wohnen im Untersuchungsraum derzeit zwischen 21.000 und 26.000 Einwohner. Auf rund 330.000 m² bebauter Fläche hat sich bis einschließlich 2012 ein Wohngebäudebestand mit über 4,5 Mio. m³_{BRI} gebildet (EFH: 1.174.161 m³_{BRI}; MFH: 3.370.430 m³_{BRI}). Die Bestandsentwicklung ist in Abbildung 99 aufgezeigt.

Abbildung 99: Entwicklung des akkumulierten Brutto-Rauminhalts in Freiam (in m³)

Während vor dem Zweiten Weltkrieg EFH und MFH einem moderaten Wachstum unterlagen, verzeichnete Freiam insbesondere nach 1948 und Mitte der 1960er Jahre einen starken Wachstumsschub (Abbildung 99 und Abbildung 100). Allein im Zeitraum von 1965 bis 1974 verneunfachte sich das Gebäudevolumen von MFH.

Den größten Anteil am Gesamtgebäudevolumen haben MFH aus der Bauzeit zwischen 1958 und 1968 (35 %), gefolgt von MFH aus der Bauzeit zwischen 1969 bis 1978 (22 %). Allein 1966 entstanden insgesamt 2.575 Wohneinheiten (WE) (1967: 1395), überwiegend in MFH. Der rasante Anstieg ist dadurch bedingt, dass Freiham 1963 als Siedlungserweiterungsfläche (Entlastungsstadt) im Stadtentwicklungsplan ausgewiesen wurde und gewachsen ist (Landeshauptstadt München 2015, S. 1).

Das Gesamtvolumen von EFH hingegen beträgt lediglich 19,8 % des Gesamtvolumens, wobei ebenfalls die Baualtersklasse 1958 bis 1968 mit insgesamt 4,6 % dominiert. EFH der Baualtersklasse 1919 bis 1948 stellt mit 3,6 % die nächstgrößte Gruppe dar. Die Verteilung nach Brutto-Grundfläche (BGF), Bebaute Fläche (BF) und Anzahl von Wohneinheiten ist in Anhang D aufgeführt.

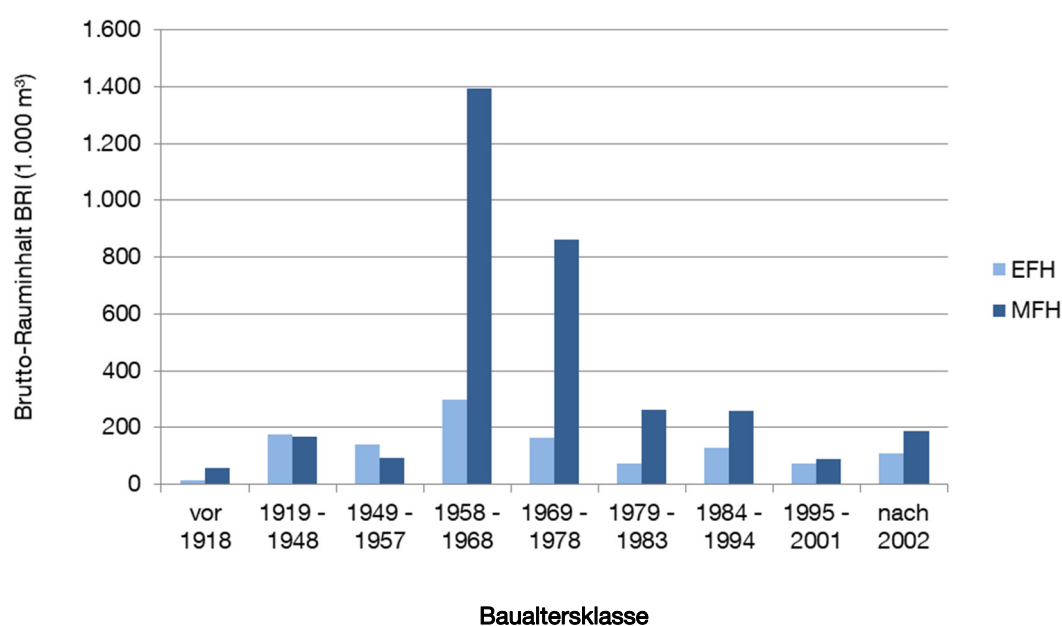


Abbildung 100: Verteilung des Brutto-Rauminhalts in Freiham nach Baualter und Typ

Ein Vergleich der Zusammensetzung der Gebäude (Anzahl) in Freiham mit anderen Bezugsräumen (z.B. Deutschland, Bayern, Oberbayern, LHS München) ergibt einen deutlichen Unterschied. In Freiham sind 50 % der Gebäude im Zeitraum von 1949 bis 1978 entstanden. Diese Baualtersklasse stellt mit geringerem Anteil auch in den anderen Bezugsräumen die größte Gruppe dar (Abbildung 101). Durch den hohen Anteil ist es sinnvoll, diese Baualtersklasse hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung detaillierter zu betrachten (siehe Kapitel 5 und Anhang B).

Mit 43 % Anteil (nach Anzahl der Gebäude) sind EFH der meistvertretere Gebäudetyp in Freiham. Im Vergleich zu anderen Bezugsräumen (z. B. Deutschland, Bayern u. a.), mit Ausnahme der LHS München, ist dieser Anteil gering (Abbildung 102). In den Bezugsräumen Deutschland, Bayern, Oberbayern beträgt der Anteil von EFH 65 – 66 %. Der Anteil von Gebäuden mit 3 oder mehr Wohnungen (MFH), beträgt in Freiham 39 % und ähnelt den berechneten Werten für die LHS München (41 %). Allein aus Gründen des geringeren Platzbedarfs und der tendenziell höheren Grundstückspreise in Städten, war es zu erwarten, dass der Anteil von EFH in urbanen Räumen geringer ist und MFH stärker vertreten sind, als in ländlicheren Räumen.

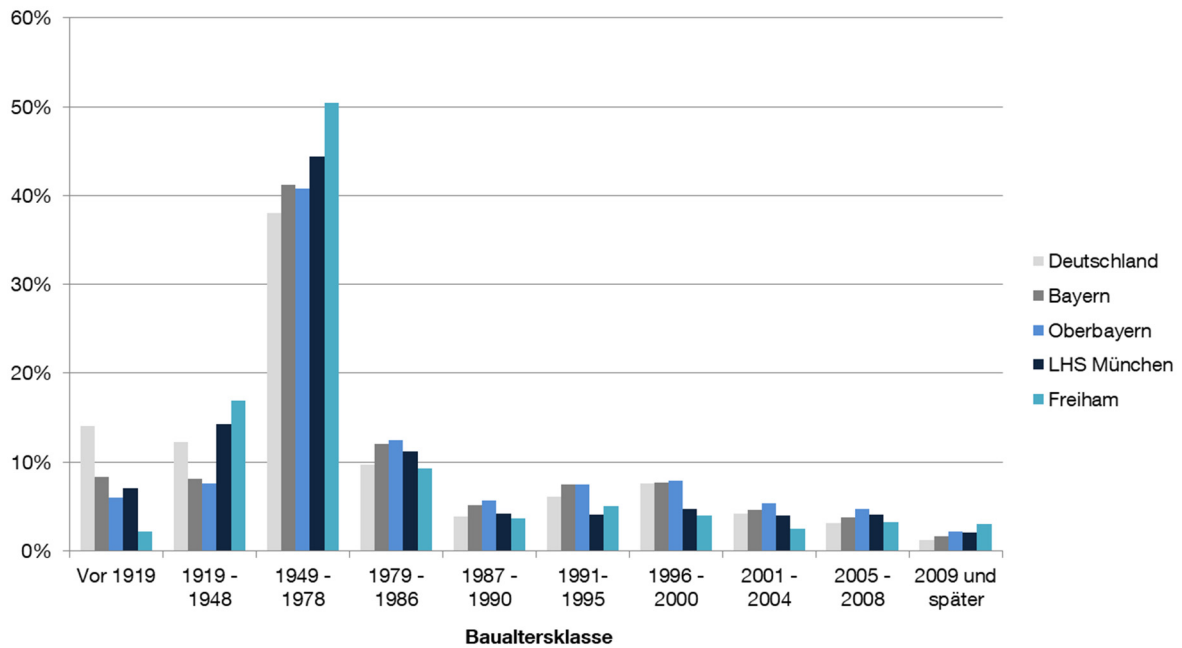


Abbildung 101: Vergleich der Verteilung von Wohngebäuden nach Baualterklasse in unterschiedlichen Bezugsräumen (nach Anzahl der Gebäude)

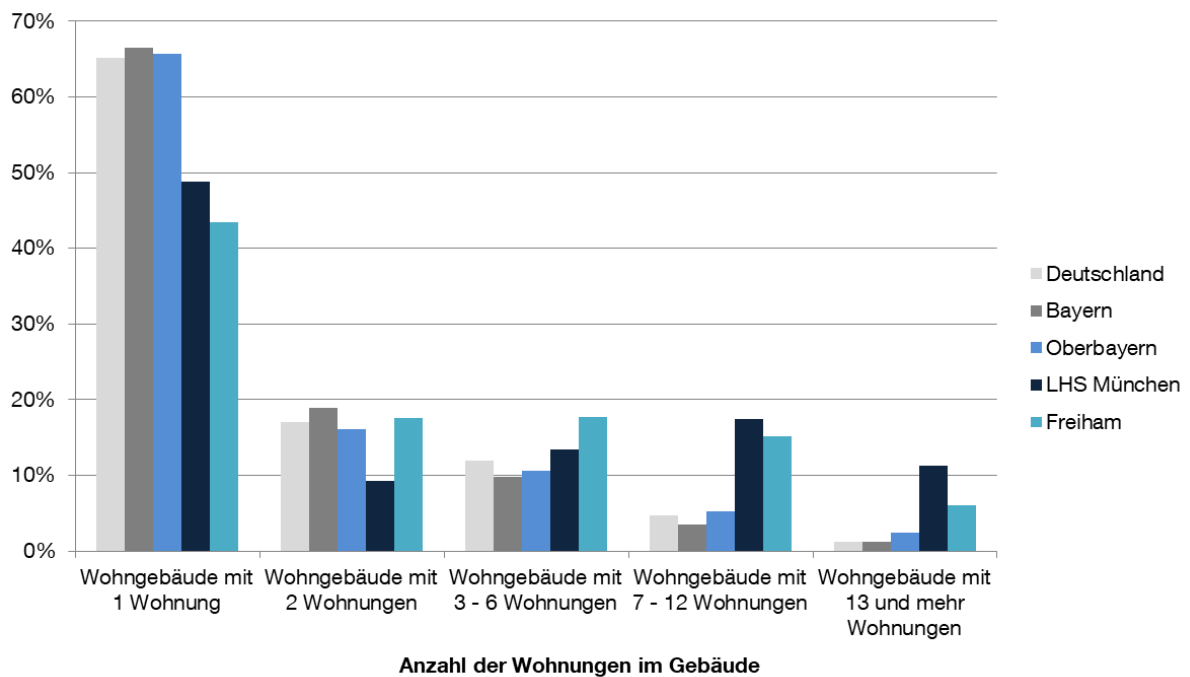


Abbildung 102: Vergleich der Verteilung von Wohngebäuden nach Gebäudetyp in unterschiedlichen Bezugsräumen (nach Anzahl der Wohneinheiten)

Die aufgezeigten Unterschiede der jeweiligen Bezugsräume und Maßstabsebenen unterstreichen nochmals die Notwendigkeit einer gesonderten Betrachtung urbaner Räume. Pauschale Aussagen zur Dynamik und Zusammensetzung des stofflichen Lagers auf nationaler Ebene können nicht ohne weiteres auf einzelne urbane Räume übertragen werden.

6.2 Stoffliche Zusammensetzung des Wohngebäudebestands im Bezugsraum

Der BRI ist eine entscheidende Eingangsgröße für das Stoffstrommodell. Um die materielle Zusammensetzung des Untersuchungsraums zu ermitteln, wurden der BRI (m^3) mit den korrespondierenden Stoffintensitäten ($\text{kg}/\text{m}^3_{\text{BRI}}$) der jeweiligen Gebäudetypen (Typ und Baulter) verknüpft (siehe Kapitel 4). Die materielle Zusammensetzung der jeweiligen Baualterklassen und Gebäudetypen unterscheidet sich durch unterschiedliche Konstruktionsarten und Verwendung von Baustoffen. Bei der Auswertung wurde daher bewusst zwischen EFH und MFH unterschieden. Die Zusammensetzung der verwendeten Eingangsdaten für die korrespondierenden Stoffintensitäten der unterschiedlichen Gebäude wurde bereits in Kapitel 5 aufgezeigt.

6.2.1 Stofflager Einfamilienhaus (EFH)

Im Bestand der EFH des Bezugsraums sind derzeit insgesamt 531.900 t Baustoffe verbaut (Abbildung 103). Diese Berechnung geht davon aus, dass sich die Gebäude

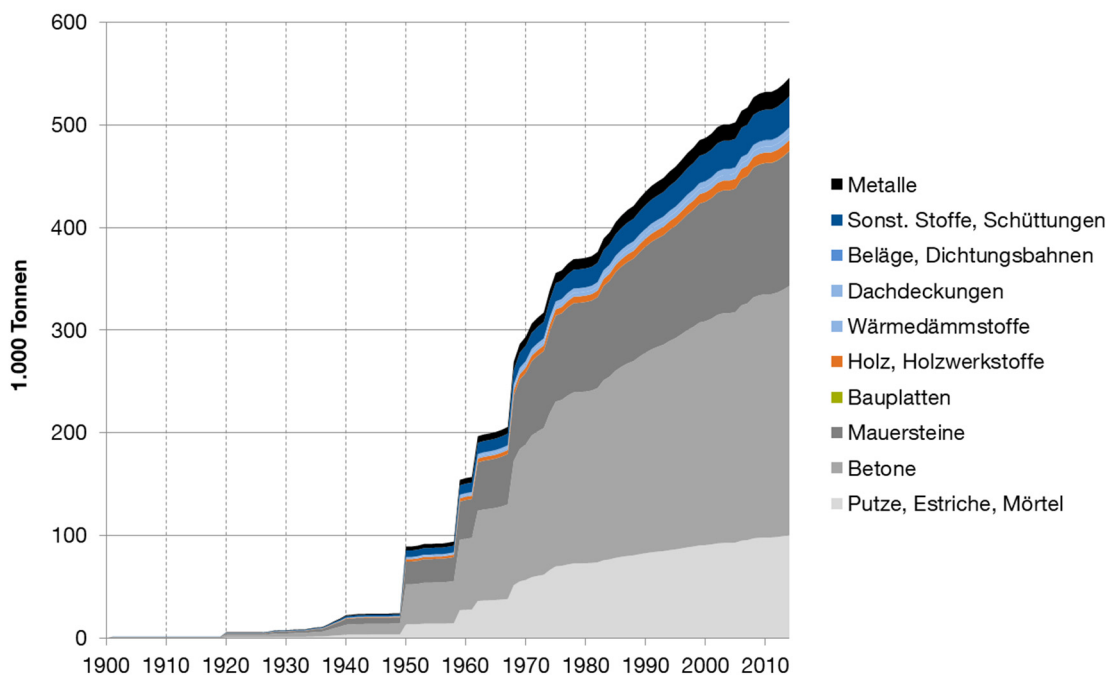


Abbildung 103: Entwicklung der stofflichen Zusammensetzung der EFH im Bezugsraum

seit ihrer Fertigstellung nicht verändert haben. Die Eingangsdaten der Stoffintensitäten basieren auf dem Jahr der Fertigstellung. Als Beispiel: Ein Gebäude von 1900 wird zum heutigen Zeitpunkt nicht mehr in seinem originalen Zustand sein. Demnach ist es nötig, den Anteil der hinzugefügten Stoffe (z. B. Sanierung) zu ermitteln.

Im Modell wurden durchschnittliche jährliche Sanierungsraten hinterlegt, um den Anteil der hinzugefügten Stoffe zu ermitteln. Die Ermittlung der verwendeten Sanierungsraten wird in Kapitel 5 beschrieben. Tabelle 19 zeigt eine Übersicht der verwendeten Werte.

Tabelle 19: Durchschnittliche jährliche Sanierungsraten des Gebäudebestands (nach Baustoffgruppen) (In Anlehnung an Schneider und Rubli 2007, S. 72; Gruhler und Böhm 2011, S. 52)

Baustoffgruppe	Jährliche Sanierungsraten (%/a)	
	Output	Input
Putze, Estriche, Mörtel	0,6%	0,7%
Betone	0,1%	0,1%
Mauersteine	0,2%	0,2%
Bauplatten	1,0%	1,1%
Holz, Holzwerkstoffe	1,0%	1,1%
Wärmedämmstoffe	3,0%	3,3%
Dachdeckungen	0,6%	1,1%
Beläge, Dichtungsbahnen	4,0%	4,4%
Sonst. Stoffe, Schüttungen	0,1%	0,1%
Metalle	1,0%	1,1%

Der Massenanteil der zusätzlich (Input-Output) durch Sanierung hinzugefügten Stoffe (z. B. Wärmedämmung) beträgt bei den EFH 0,04 % der Bestandsmasse (Abbildung 104). Dies entspricht rund 200 Tonnen. Neben den mineralischen Anteilen (70 %) entfallen jeweils 10 % der Masse auf Metalle und Wärmedämmung. Im Vergleich zum Gesamtlager ist dieser Anteil vernachlässigbar.

Der aus Sanierung hinzugefügte Anteil wird zu den Bestandsdaten addiert, um den Status der stofflichen Zusammensetzung zu ermitteln (Abbildung 105). Betone sind mit 41 % der am meist vertretene Baustoff, gefolgt von Mauersteinen (26 %) und der Gruppe der Putze, Estriche und Mörtel (PEM) (17 %). Metalle, überwiegend Bewehrungsstahl, haben einen Anteil von 4 %. Holz und Holzwerkstoffe (z. B. Dachstuhl) machen 2,5 % der Gesamtmasse aus. Insgesamt sind in den EFH in Freiam derzeit 532.100 t Baustoffe gebunden (Ist-Zustand).

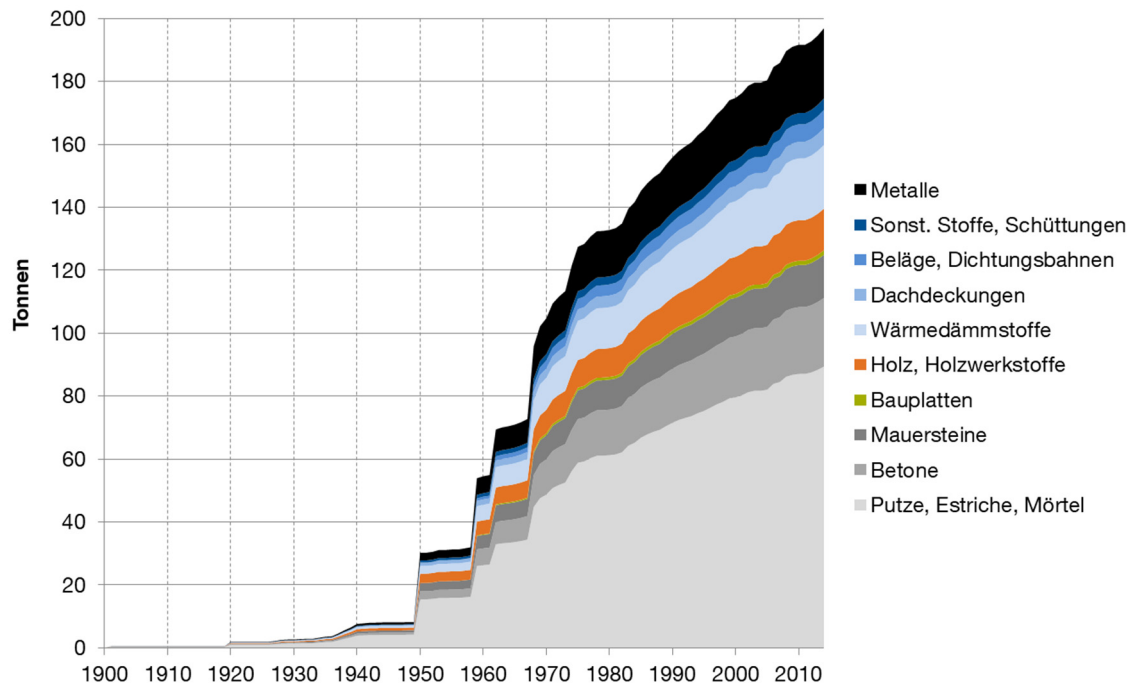


Abbildung 104: Anteil der durch Sanierung eingebrachten Stoffe bei EFH im Bezugsraum

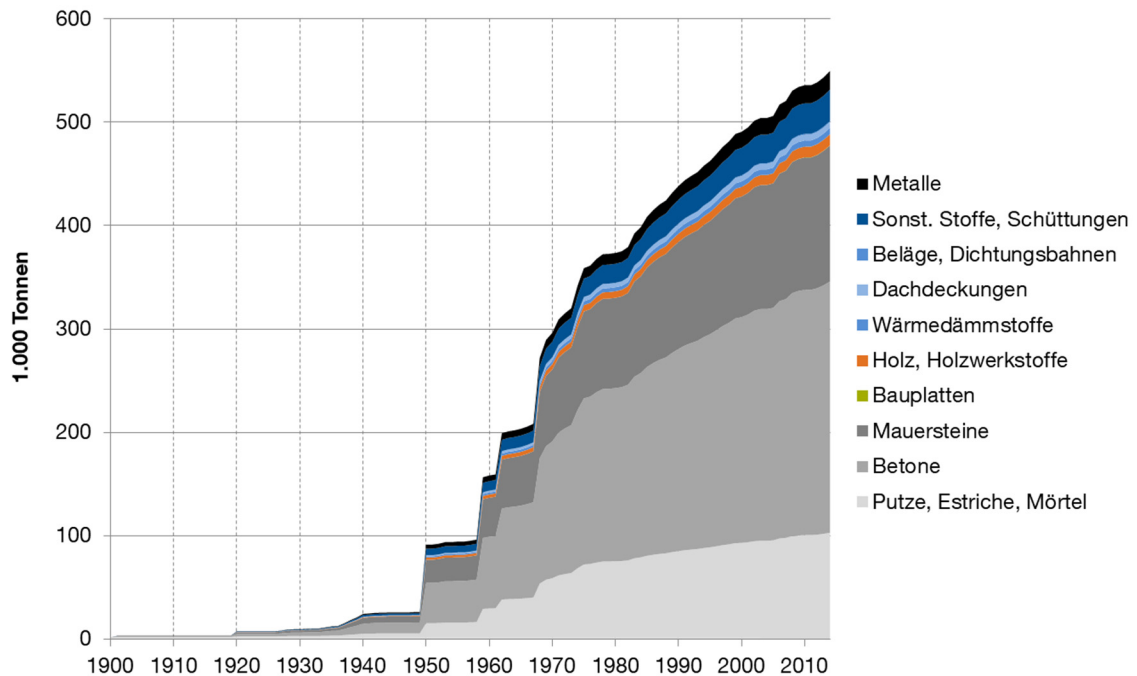


Abbildung 105: Ist-Zustand der stofflichen Zusammensetzung der EFH im Bezugsraum

Die ermittelten Werte beziehen sich auf die Gebäude. Stoffe, die für die Erschließung und Außenflächen (z. B. Zufahrt) verwendet wurden, werden hingegen nicht betrachtet.

6.2.2 Stofflager Mehrfamilienhaus (MFH)

Gebäude mit mehr als zwei Wohneinheiten werden in dieser Arbeit als MFH definiert. Die Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie bei den EFH. Die Resultate sind in Abbildung 106 bis Abbildung 108 aufgezeigt.

Insgesamt sind in den MFH im Bezugsraum rund 1,66 Mio. t an Baustoffen gebunden. Davon entfallen fast 50 % auf Betone, 23 % auf Mauersteine und 16 % auf PEM. Metalle haben einen Anteil von über 5 %, was eine höhere Konzentration als bei den EFH darstellt. Dies ist auf den erhöhten Anteil an Stahlbeton-Konstruktionen zurückzuführen. Die restlichen Baustoffgruppen betragen weniger als 1 % der Masse.

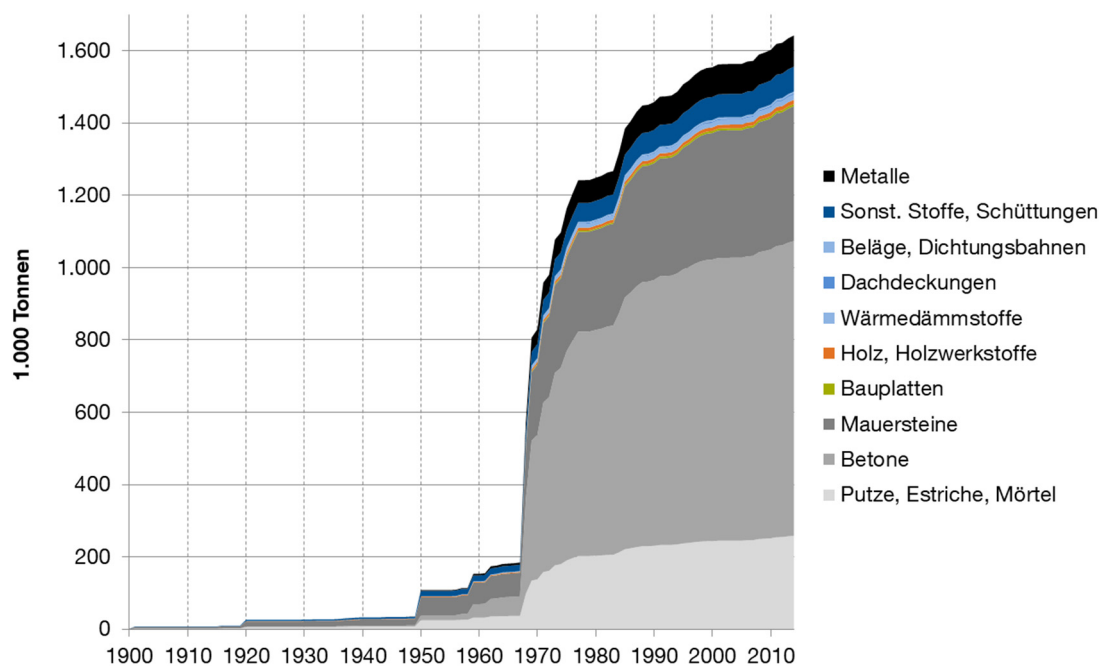


Abbildung 106: Entwicklung der stofflichen Zusammensetzung der MFH im Bezugsraum

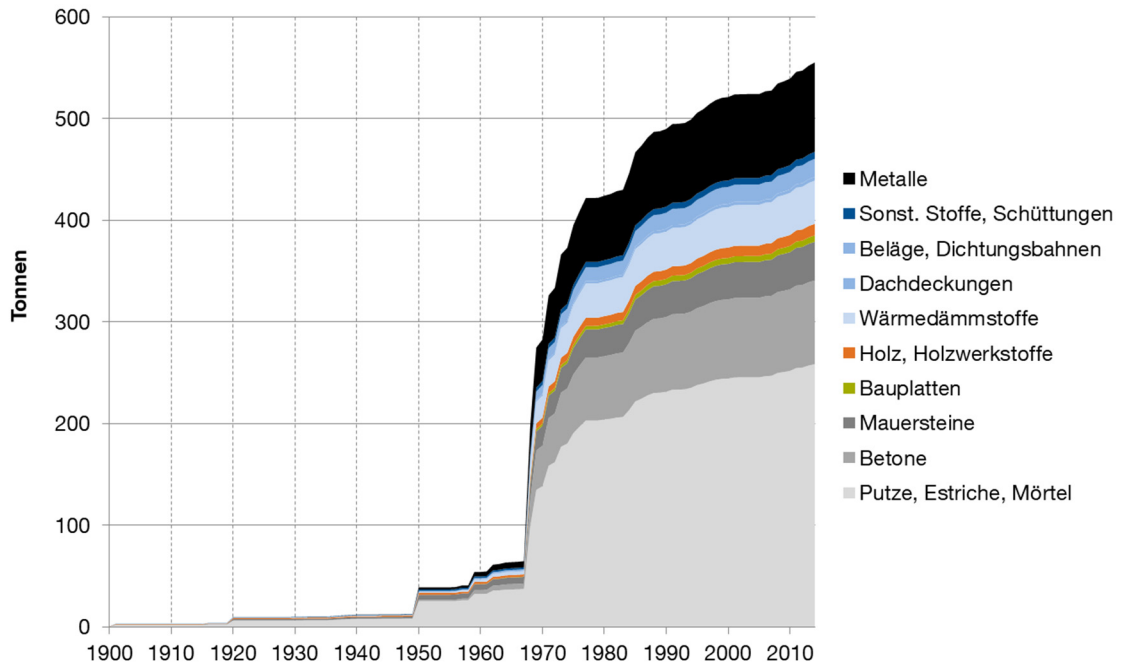


Abbildung 107: Anteil der durch Sanierung eingebrachten Stoffe bei MFH im Bezugsraum

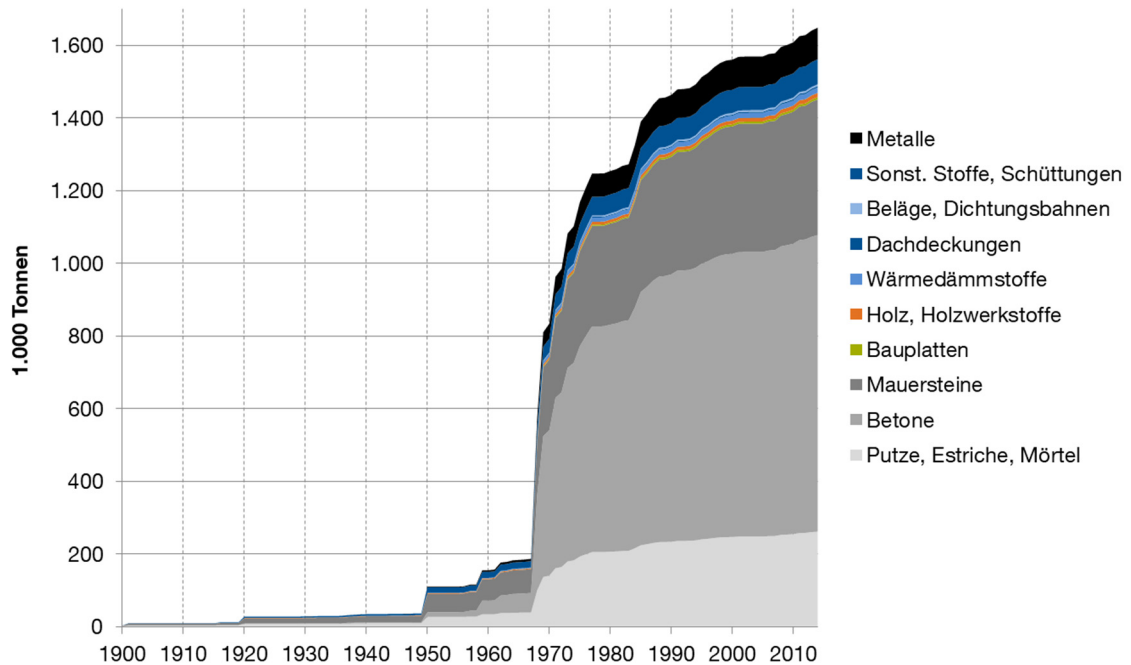


Abbildung 108: Ist-Zustand der stofflichen Zusammensetzung der MFH im Bezugsraum

6.2.3 Stofflager des Wohnbestands im Bezugsraum

Der Gesamtwohnbestand setzt sich aus EFH und MFH zusammen. Ähnlich wie die Entwicklung des Gebäudevolumens ist nach 1947 und 1966 ein stetiges Lagerwachstum (Akkumulation von Stoffen) zu verzeichnen. Insgesamt sind im Untersuchungsraum Freiham rund 2,2 Mio. t Baustoffe gebunden. Die Entwicklung des stofflichen Lagers ist in Abbildung 109 aufgezeigt, die prozentuale Verteilung in Abbildung 110.

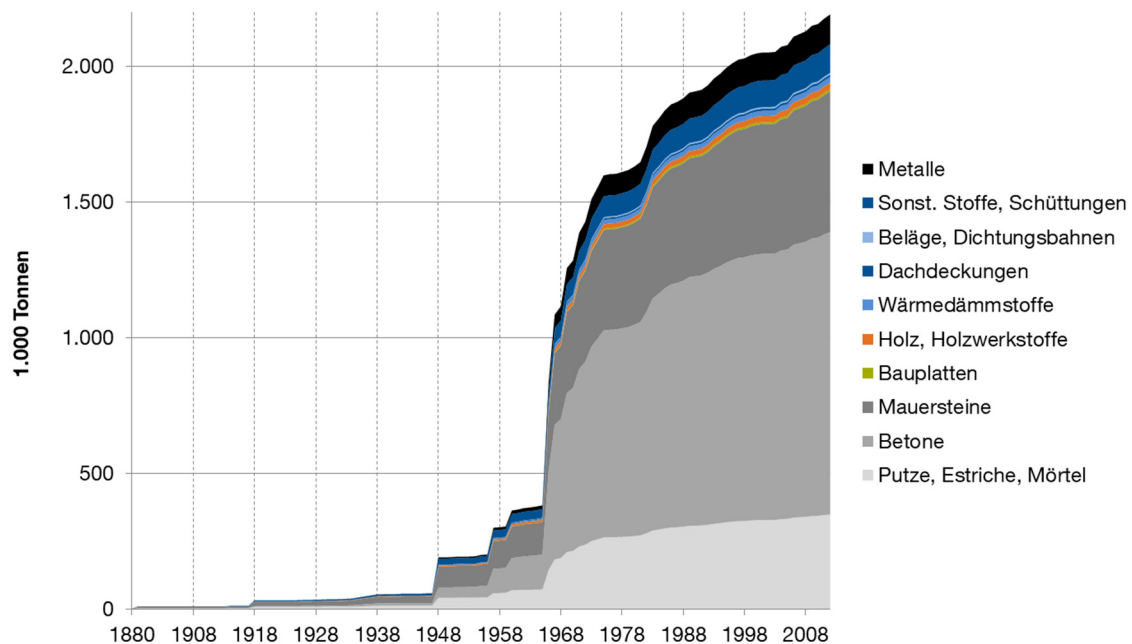


Abbildung 109: Stoffliche Zusammensetzung des Wohngebäudebestands im Bezugsraum (Ist-Zustand)

Beton ist mit 48 %, (1,04 Mio. t) der am häufigsten vertretene Baustoff, gefolgt von Mauersteinen (24 %; 518.000 t) und PEM (16 %; 348.000 t). Demnach stellen mineralische Fraktionen einen Anteil von 87 % (1,9 Mio. t) der Gesamtmasse. Der Anteil von Holz und Holzwerkstoffen hingegen beträgt rund 1 % (25.000 t). Metalle haben einen Anteil von rund 5 % (110.000 t). Wie bereits erwähnt ist ein großer Teil auf Bewehrungsstahl zurückzuführen. Dennoch ist es lohnenswert, die Gruppe der Metalle weiter zu disaggregieren, um ein besseres Verständnis der Zusammensetzung zu bekommen.

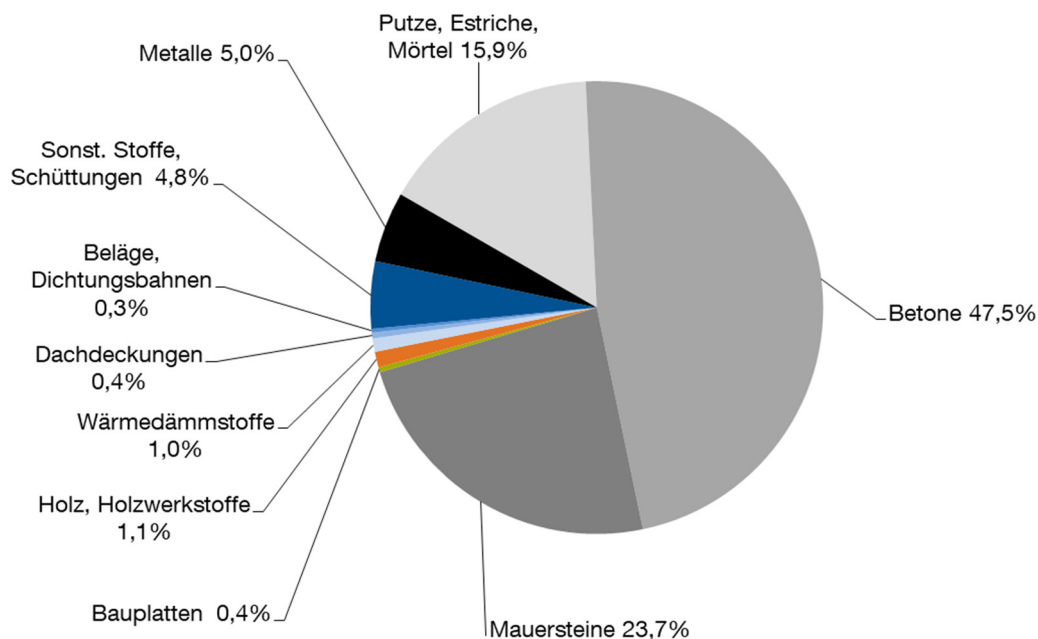


Abbildung 110: Stoffliche Zusammensetzung des Wohngebäudebestands im Bezugsraum (in %)

Tabelle 20: Zusammenfassung der stofflichen Zusammensetzung der Wohngebäude im Bezugsraum

Baustoffgruppe	EFH		MFH		Gesamt	
	Masse (t)	Anteil	Masse (t)	Anteil	Masse (t)	Anteil
Putze, Estriche, Mörtel	89.473	17%	258.800	16%	348.273	16%
Betone	218.039	41%	823.406	50%	1.041.445	48%
Mauersteine	137.306	26%	381.159	23%	518.466	24%
Bauplatten	1.443	0,3%	6.298	0,4%	7.741	0,4%
Holz, Holzwerkstoffe	13.244	2,5%	11.380	0,7%	24.625	1,1%
Wärmedämmstoffe	6.762	1,3%	14.240	0,9%	21.002	1,0%
Dachdeckungen	5.413	1,0%	3.622	0,2%	9.035	0,4%
Beläge, Dichtungsbahnen	1.448	0,3%	4.465	0,3%	5.913	0,3%
Sonst. Stoffe, Schüttungen	36.334	6,9%	68.640	4,1%	105.275	4,8%
Metalle	22.302	4,2%	87.987	5,3%	110.289	5,0%
Gesamt	532.065	100%	1.659.998	100%	2.192.063	100%

6.2.3.1 Zusammensetzung der Metalle

Anhand der Erkenntnisse aus Kapitel 3 und 5 kann der Anteil an Metallen weiter disaggregiert werden. Verknüpft man die Gruppe der Metalle mit der ermittelten Zusammensetzung von Gebäuden aus Kapitel 5, ergeben sich nachstehende Werte für gebundene Metalle (Tabelle 21). Die Tabelle zeigt neben der prozentualen Verteilung von Metallen den aktuellen Tagesschrottpreis sowie den derzeitigen monetären Gegenwert.

Tabelle 21: Verteilung der gebundenen Metalle im Bestand (nach Masse und Wert)

Metall	Anteil an Metallen*	Masse (t)	Schrottpreis** (€ / t)	Wert (€)	Anteil am Gesamtwert
Stahl	94,9%	104.674	140 €	14.654.351 €	72%
Gusseisen	3,0%	3.345	140 €	468.292 €	2%
Kupfer	0,8%	925	4.240 €	3.920.047 €	19%
Aluminium	0,7%	819	800 €	655.186 €	3%
Titanzink	0,5%	527	1.400 €	737.237 €	4%
Gesamt	100%	110.289		20.435.114 €	100%

* Ermittelte Werte aus Kapitel 5

** Entnommen aus www.metallankauf24.de (Stand 23.08.2017)

Die im Wohngebäudebestand von Freiham gebundenen Metalle haben einen aktuellen (Stand: 23.08.2017) Gegenwert von ca. € 20,4 Mio. Neben Stahl (95 % der Metall-Gesamtmasse), der 72 % des Gesamtwerts ausmacht, trägt das gebundene Kupfer (0,8% der Metall-Gesamtmasse) 19 % zum Gesamtwert bei. Neben dem stofflichen Lager wurde ein monetäres Lager (Gebäude als Materialbank) geschaffen, das an den Rohstoffpreis gekoppelt ist. Abbildung 111 zeigt die zeitliche Veränderung der ausgewählten Rohstoffpreise in US \$ von 1960 bis 2016.

Neben der preislichen Fluktuation ist ein genereller Anstieg der Rohstoffpreise zu erkennen. Ebenfalls ist zu bemerken, dass durch den internationalen Handel eine Kopplung an den US \$ gegeben ist, was einen Einfluss des fluktuierenden Wechselkurses mit sich bringt, der an dieser Stelle vernachlässigt wird.

Insbesondere bei den NE-Metallen waren während der Lebensdauer von Gebäuden hohe Renditen zu verzeichnen. Bei einem Gebäuderückbau können die freigesetzten Metalle wieder veräußert werden. Die berechneten Werte sind auf das Erstellungsjahr 1960 bezogen, wobei die Renditenermittlung für 2016 inflationsbereinigt erfolgt (Tabelle 22).

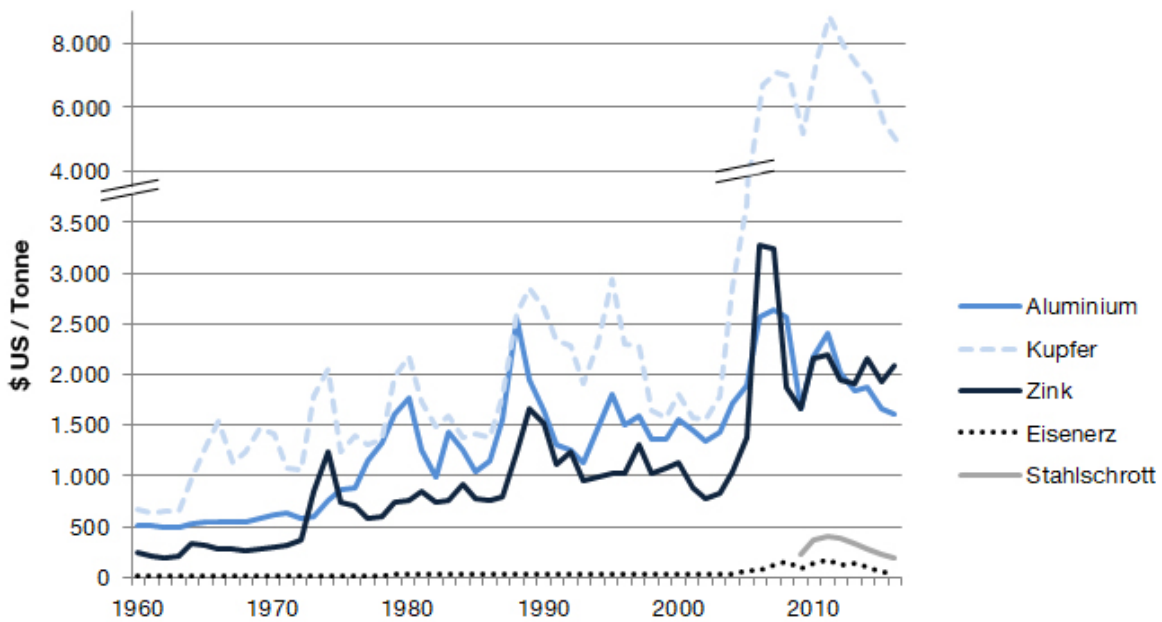


Abbildung 111: Entwicklung der Metallpreise von 1960 bis 2016 (Eigene Darstellung nach World Bank und Thomson Reuters 2018a, 2018b, 2018c, 2018d)

Mit einer jährlichen Preissteigerung von durchschnittlich 3,9 % weist Zink bei den NE-Metallen den höchsten monetären Gewinn auf, gefolgt von Kupfer (3,6 %) und Aluminium (2,1 %). Bei den Eisenmetallen wurde auf den Rohstoff Eisenerz (3 % Preissteigerung) zurückgegriffen. Durch die unzähligen Stahlsorten, sowie der Art der statistischen Erfassung können keine einheitlichen Werte für Stahl ermittelt werden.

Werden die ermittelten Werte auf das Gesamtlager Freiham übertragen und nach ihrer Verteilung gewichtet, ergibt sich seit 1960 eine durchschnittliche jährliche Preissteigerung von 3,2 %. Durch den vergleichsweise hohen finanziellen Wert von Metallen, im Unterschied zu den anderen betrachteten Stoffen, bieten Metalle derzeit das größte Potenzial einer Wiedervermarktung. Parallel zu dem Begriff *Urban Mining* wird hier der Begriff *Financial Mining* eingeführt.

Tabelle 22: Ermittlung der jährlichen Preissteigerung von ausgewählten Metallen und Erzen

	NE-Metalle			
	Aluminium	Kupfer	Zink	Eisenerz
Rohstoffpreis 1960 (US \$)*	511,47	678,76	246,19	11,42
Rohstoffpreis 2016 (US \$)*	1.604,18	4.867,90	2.089,98	58,42
Gesamtgewinn	213,6%	617,2%	748,9%	411,6%
Durchschnittlicher Jahresgewinn	3,9%	11,1%	13,6%	7,4%
Preissteigerung	2,1%	3,6%	3,9%	3,0%

*Daten von World Bank und Thomson Reuters 2018a, 2018b, 2018c, 2018d)

Bei einer zukünftigen positiven Preisentwicklung anderer Baustoffe (z. B. seltene Erden, Glass etc.) können diese ebenfalls ein monetäres Zwischenlager darstellen. Allerdings können bei einem Preisverfall oder durch Verunreinigung (z. B. Schadstoffen) Kosten (Negativpreis) entstehen.

Elektrisches Leitungsnetz

Das elektrische Leitungsnetz von Gebäuden stellt ein großes Kupferdepot dar. In Kapitel 5 und Anhang B, wird die Auswertung des Kupferanteils dieser Kostengruppe für MFH und EFH beschrieben. Tabelle 23 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 23: Kupferanteil im elektrischen Leitungsnetz von ausgewählten Gebäuden

	BGF (m ²)	BRI (m ³)	kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}
MFH 1962	5.586	14.776	0,277	0,105
EFH 1996	352	1.189	0,243	0,072
EFH 2013	385	1.127	0,225	0,077

Bei den MFH wurde ein Kupfergehalt der elektrischen Leitungen von 0,11 kg/m³_{BRI} (0,28 kg/m²_{BGF}) ermittelt. Bei der Auswertung von EFH unterschiedlicher Baujahre wurden Werte von durchschnittlich 0,074 kg/m³_{BRI} (0,22 kg/m²_{BGF}) ermittelt. Die Werte basieren auf im Gebäude verbauten Leitungen. Die Erschließung (z. B. öffentliches Leitungsnetz) wird nicht betrachtet.

Die Kennwerte wurden mit den jeweiligen Gebäudetypen (nach BGF und BRI) verknüpft, um das Kupferlager des elektrischen Leitungsnetzes des Untersuchungsraums zu ermitteln (Tabelle 24).

Tabelle 24: Masse und Wert von Kupfer im elektrischen Leitungsnetz von Gebäuden im Bezugsraum

	Kupfer (t)			Wert (€)
	Nach m ² _{BGF}	Nach m ³ _{BRI}	Mittelwert	
MFH	307,7	353,3	330,5	1.401.303 €
EFH	90,2	87,3	88,7	376.164 €
Gesamt	397,8	440,6	419,2	1.777.467 €

Insgesamt sind derzeit in den Wohngebäuden des Untersuchungsraums Freiham rund 419 t Kupfer im elektrischen Leitungsnetz verbaut (330 t in MFH und 89 t in EFH). Nach dem aktuellen Kupferschrottpreis ergibt dies einen Gesamtwert von ca. € 1,8 Mio.

Rohrleitungen von Heizungsanlagen

Bei der Ermittlung der Rohrleitungslängen von Heizungsanlagen wurde auf die ermittelten Kennwerte in Anhang B sowie auf die bottom-up Untersuchung des IÖR zurückgegriffen (Tabelle 25) (Krauß et al. 2016). In der Untersuchung wurden Leitungslängen und Materialkennziffern anhand unterschiedlicher Gebäudetypen und des Baualters gebildet. Die Berechnungen basieren auf den Mittelwerten der drei

untersuchten Leitungstypen und der materialbezogenen Verteilung nach Baujahr. Als Bezugsgröße wurde m² Wohnfläche (WF) verwendet.

Tabelle 25: Mittelwerte der spezifischen Materialkennwerte von Heizungsleitungen (In Anlehnung an Krauß et al. 2016, S. 32ff)

Mittelwerte der Materialkennwerte (kg/m ² WF)						
Baualter	Gebäudetyp	Stahl	Kupfer	Kunststoff	Aluminium im Verbund	Kunststoff im Verbund
bis 1990	1-2 WE	2,33	0,67	0,23	0,05	0,15
	3-6 WE	1,62	0,63	0,18	0,04	0,12
	7-12 WE	1,42	0,55	0,15	0,03	0,10
	13 + WE	1,27	0,49	0,14	0,03	0,09
	Anteil (Mittelwert)	75%	16%	7%	1%	1%
ab 1990	1-2 WE	2,35	0,90	0,23	0,05	0,15
	3-6 WE	1,65	0,64	0,18	0,04	0,12
	7-12 WE	1,44	0,55	0,16	0,03	0,10
	13 + WE	1,30	0,50	0,14	0,03	0,09
	Anteil (Mittelwert)	17%	43%	31%	5%	5%

Aus der Gebäudedatei wurde die hinterlegten WF den korrespondierenden Gebäudetypen zugeordnet. Zur Prüfung der Plausibilität der Eingangswerte wurden die BGF und das Verhältnis von WF zu BGF ermittelt (Tabelle 26). In den jeweiligen Baualtersklassen und Gebäudetypen wurde eine WF von insgesamt 833.436 m² ermittelt. Dieser Wert entspricht einem Verhältnis von 50 - 60 % der BGF.

Tabelle 26: Ableitung und Verhältnis von BGF und WF im Bezugsraum

Baualter	Gebäudetyp	m ² BGF	m ² WF	WF/BGF
bis 1990	1-2 WE	303.544	198.053	0,65
	3-6 WE	199.768	97.047	0,49
	7-12 WE	349.919	192.859	0,55
	13 + WE	446.928	232.355	0,52
ab 1990	1-2 WE	82.896	52.725	0,64
	3-6 WE	54.257	27.050	0,50
	7-12 WE	41.499	22.999	0,55
	13 + WE	16.351	10.350	0,63
	Gesamt	1.495.162	833.436	0,56

In einem nächsten Schritt wurden die jeweiligen WF den Mittelwerten aus Tabelle 25 zugeordnet, um die materielle Zusammensetzung der Heizungsrohre zu ermitteln (Tabelle 27). Mit 922 t ist Stahl, gefolgt von Kupfer (102 t) und Kunststoff (16 t) der

meist verwendete Baustoff. Allein das Kupfer besitzt einen derzeitigen Gegenwert von rund € 430.000. Der Gegenwert des Stahls liegt bei ca. € 130.000.

Tabelle 27: Stoffliche Zusammensetzung der Heizungsrohre im Bezugsraum

		Verbaute Stoffmengen (t)				
Baualter	Gebäudetyp	Stahl	Kupfer	Kunststoff	Aluminium im Verbund	Kunststoff im Verbund
bis 1990	1-2 WE	343,3	21,6	3,3	0,1	0,3
	3-6 WE	117,1	9,9	1,2	0,04	0,1
	7-12 WE	204,0	17,1	2,1	0,06	0,2
	13 + WE	220,4	18,6	2,4	0,07	0,2
ab 1990	1-2 WE	21,1	20,1	3,8	0,13	0,3
	3-6 WE	7,6	7,3	1,5	0,05	0,1
	7-12 WE	5,6	5,4	1,1	0,03	0,1
	13 + WE	2,3	2,2	0,4	0,01	0,04
Gesamt		921,5	102,2	15,9	0,5	1,4

Der Anteil von Verbundrohren liegt bei unter 1 % der Gesamtmasse. Zukünftig ist davon auszugehen, dass dieser Anteil weiter steigen wird, da diese Rohrtypen häufiger verwendet werden (Krauß et al. 2016, S. 34).

Im Vergleich der Kennwerte aus dem Gebäudebeispiel in Anhang B und den verwendeten Werten des IÖR ergeben sich Abweichungen von unter 20 %. Demnach kann diese Berechnungsmethode auch an Einzelgebäuden angewandt werden, vorausgesetzt die stoffliche Zusammensetzung der Leitung ist bekannt.

Dachrinnen und Fallrohre

Die Ermittlung der Massen der Dachrinnen und Fallrohre wird in Kapitel 5 beschrieben. Bei Gebäuden mit 1 bis 6 WE ergibt die Gesamtlänge der Dachrinnen fast 38 km (Mittelwert: 19,9 m/Gebäude). Bei den Gebäuden mit > 7 WE rund 32 km (Mittelwert: 62,6 m/Gebäude). Dies ergibt eine Gesamtlänge von ca. 70 km für den gesamten Untersuchungsraum. Tabelle 28 zeigt die ermittelten Kennwerte.

Die Dimensionierung der Dachrinne und der Fallrohre hängt von der zu entwässernden Dachfläche ab. Dies ist in DIN EN 12 056-3 geregelt. Je größer die Dachfläche und der erwartete Niederschlag, desto größer ist die Dimensionierung. Die jeweiligen Werte aus der Norm wurden den einzelnen Dachflächen im Gebäudemodell zugeordnet um die Massen zu erheben. Da insbesondere Starkregenereignisse zugenommen haben (Erhöhung der Maximallast), werden zukünftig großzügiger dimensionierte Entwässerungssysteme benötigt, was zu einer Erhöhung der benötigten Stoffe führt.

Tabelle 28: Ermittlung von Dachrinnen- und Fallrohrängen sowie der Masse im Bezugsraum

	Länge (m)			Gesamtmasse (t)		
	Gesamt	Mittelwert	Standard Abweichung	Zink / Titanzink / verzinktes Stahlblech	Kupfer	Gesamt
Dachrinnen						
EFH	27.154	18,5	3,7	40,9	13,2	54,0
MFH	42457	45,4	21,2	63,9	20,6	84,5
1 bis 6 WE	37.690	19,9	4,7	56,7	18,3	75,0
7 plus WE	31.921	62,6	12,5	48,1	15,5	63,5
Gesamt	69.611	29	18,8	104,8	33,7	138,5
Fallrohre						
EFH	14.168	9,7	3,6	17,8	5,6	23,3
MFH	36.311	38,8	30,4	45,5	14,3	59,8
1 bis 6 WE	19.756	10,5	4,1	24,8	7,8	32,5
7 plus WE	30.723	60,2	26	38,5	12,1	50,6
Gesamt	50.479	21	23,9	63,3	19,9	83,2

Die Ermittlung der Fallrohrlänge folgt einem ähnlichen Prinzip. Hierbei wurde die Gebäudehöhe (Bodenplatte bis Traufe) mit der Fläche der Dachentwässerung verknüpft, um die Anzahl und die Dimensionen der Fallrohre zu ermitteln. Im gesamten Untersuchungsraum wurden eine Gesamtfallrohrlänge von 50,5 km ermittelt (1 bis 6 WE: 17,7 km; 7 plus WE: 30,7 km). Die Ergebnisse und Kennwerte sind in Tabelle 28 und Tabelle 29 zusammengefasst.

Zur materiellen Verteilung von Dachentwässerungssystemen sind keine Daten vorhanden. Zu den gängigsten Materialien gehören Zink / Titanzink, Kupfer, verzinktes Stahlblech, Aluminium und Kunststoff. Aufgrund von Erfahrungswerten ist davon auszugehen, dass ein Großteil der Systeme aus Zink / Titanzink oder verzinktem Stahlblech bestehen. Kupfer besitzt eine höhere Haltbarkeit als die vorher genannten Materialien, ist jedoch kostenintensiver in der Anschaffung. Aufgrund von geringer Haltbarkeit und Ästhetik sind Kunststoffsysteme bei Gebäuden in der Minderheit.

Im Sachstandbericht zum Einsatz von Kupfer und Zink bei Dächern, Dachrinnen und Fallrohren wird das Marktvolumen der beiden Metalle untersucht, um benetzte (der Witterung ausgesetzt) Flächen zu ermitteln. Aus den ermittelten Werten ergibt sich eine Verteilung von 23 % (Kupfer) und 77 % (Zink / Titanzink / verzinktes Stahlblech) (Hullmann et al. 2001, S. 7). Andere Materialien werden in dieser Studie hingegen nicht betrachtet.

Tabelle 29 zeigt die verwendeten Werte nach Dimensionierung und Material, die der jeweiligen Entwässerungsfläche nach DIN EN 12 056-3 der einzelnen Gebäude zugeordnet wurden.

Tabelle 29: Kennwerte für Dachrinnen und Fallrohre (Eigene Aufstellung nach <http://www.dachrinnen-shop.de>)

Baustoff	Dachrinnen		Fallrohre	
	Dimension	Masse (kg/m)	Dimension	Masse (kg/m)
Zink / Titanzink	RG 333	1,68	DN 100	1,46
	RG 400	2,14	DN 120	1,75
Kupfer	RG 333	1,794	DN 100	1,56
	RG 400	2,42	DN 120	1,87
Aluminium	RG 333	0,7	DN 100	0,61
	RG 400	0,89	DN 120	0,73
Verzinktes Stahlblech	RG 333	1,75	DN 100	1,5
	RG 400	2,25	DN 120	1,8

Im untersuchten Stadtteil Freiham sind rund 138,5 t Metalle (zinkhaltig: 104,8 t; kupferhaltig: 33,7 t) in den Dachrinnen und weitere 83,2 t (zinkhaltig: 63,3 t; kupferhaltig; 19,9 t) in den Fallrohren gebunden. Bei einer Bewertung anhand der gängigen Marktwerte (siehe Abschnitt 6.2.3.1), entspricht dies einem derzeitigen Materialwert von rund € 612,000.

6.2.3.2 Zusammensetzung weiterer ausgewählter Fraktionen

Durch die Abstraktion einzelner Bauteilflächen und -volumina (Bottom-Up Methoden) kann das Stofflager weiter in seine Einzelteile zerlegt werden.

Fassaden und Fenster

Die Fassadenflächen wurde aus dem Gebäudemodell abgeleitet (siehe Kapitel 4), sowie zu Vergleichszwecken anhand des Flächenschätzverfahrens des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) berechnet (Loga et al. 2005). Der Anteil der Fensterfläche wurde ebenfalls mithilfe des Flächenschätzverfahrens ermittelt, da eine direkte Ableitung aus dem Gebäudemodell nicht möglich ist (Tabelle 30).

Tabelle 30: Ermittlung der Außenwand- und Fensterflächen

Gebäudetyp	Aus Gebäudemodell	Anhand des Flächenschätzverfahren (IWU)	
	Außenwandflächen (m ²)	Außenwandflächen (m ²)	Fensterflächen (m ²)
EFH	314.019	303.583	50.084
MFH	669.948	547.408	115.526
Gesamt	983.967	850.991	165.610

Bei den EFH ergibt sich bei der Auswertung der Außenwandflächen eine Abweichung beider Methoden von 3 %. Bei den MFH beträgt die Abweichung 18 %. Die Abweichung kann dadurch begründet werden, dass beim IWU Verfahren mit Durchschnittswerten für die Raumhöhe gerechnet wird. Beim Gebäudemodell ist die Gebäudehöhe hingegen gegeben. Insbesondere bei mehrgeschossigen Gebäuden kann es zu Abweichungen in der Höhe kommen. Dennoch spricht die geringe Abweichung der jeweiligen Werte für die Plausibilität der Gebäudedatei und für das

Flächenschätzverfahren. Für weitere Berechnungen wurden die Werte aus der Gebäudedatei verwendet.

Im Untersuchungsraum sind fast 1 Mio. m² Außenwandflächen und 170.000 m² Fensterflächen vorhanden. Anhand der ermittelten Ergebnisse aus Kapitel 3, 5 und Anhang B kann der Anteil der Rahmen- und Glasflächen bestimmt werden. Die Auswertung des Beispielgebäudes hat ergeben, dass rund 64 % der Fläche des Fensters auf den Glasanteil, und 36 % auf den Rahmen fallen. Die Verteilung der Materialität des Rahmens ist aus Produktionsstatistiken entnommen (siehe Kapitel 3.1.5). Es wurde angenommen, dass flächendeckend eine Standard 2-Scheiben Isolierverglasung mit einem Gewicht von 20 kg/m² verbaut wurde (BMUB 2016).

Die Massenanteile der unterschiedlichen Rahmentypen wurden aus einer Ökobilanzstudie abgeleitet, die auf EPDs des ift Rosenheim basieren (Popp und Waltenberger 2015, S. 31). Die verwendeten Werte der Berechnung sind in Tabelle 31 aufgeführt.

Tabelle 31: Stoffliche Zusammensetzung unterschiedlicher Fensterkonstruktionen
(In Anlehnung an Popp und Waltenberger 2015, S. 31)

Baustoff	Massenanteile (kg/m ² Fensterfläche)			
	Holz/Aluminium	Holz	Aluminium	Kunststoff
PVC				7,5
Holz	10,4	15,6		
Aluminium	2,2	0,3	8,0	
Beschläge	1,3	1,3	1,1	1,3
Stahlblech				7,0
Isolierglas	20	20	20	20
Sonstige	1,1	1,1	3,6	
Gesamt	34,9	38,4	32,7	35,8
Anteil am Bestand	3%	17%	19%	61%

Rund 61 % der derzeit produzierten Fenster haben einen Kunststoffrahmen, gefolgt von Aluminium (19 %) und Holz (17%). Anhand von Produktionsstatistiken des Verbands für Fenster und Fassade, die bis 1971 zurückreichen, kann die Verteilung des Rahmenmaterials ermittelt werden (VFF/BF 2014).

Bei einer Verknüpfung der Daten aus der Matrix in Tabelle 31 mit den ermittelten Werten der Gebäudedatei können die jeweiligen Massen der in den Fenstern gebundenen Stoffe ermittelt werden (Tabelle 32).

Die Gesamtmasse des derzeit verbauten Glases entspricht rund 2.100 t (105.700 m²). Dabei lässt sich nicht nach Glassorte differenzieren. Daher kann keine eindeutige Aussage zum Recyclingpotential dieser Fraktion gemacht werden, da für Glasrecycling die Sortenreinheit von entscheidender Bedeutung ist (siehe Kapitel 3.1.5).

Tabelle 32: Massenermittlung der Fenster im Bezugsraum

Baustoff	Masse (t)	Anteil
PVC	482,1	12,8%
Holz	312,4	8,3%
Aluminium	173,3	4,6%
Beschläge	136,1	3,6%
Stahlblech	452,1	12,0%
Isolierglas	2.113,8	56,1%
Sonstige	96,5	2,6%
Gesamt	3.766,3	100%

Beim Rahmen haben Kunststoffe (482 t) den größten Anteil, gefolgt von Stahlblech (452 t), Holz (312 t) und Aluminium (173 t). Das derzeit gebundene Aluminium hat einen aktuellen Gegenwert von € 230.000.

Dachhaut

Die Dachflächen wurden Anhand der Methode in Kapitel 5 ermittelt. Bei der Auswertung der Gebäudedatei und einer Besichtigung des Stadtteils wurde evident, dass EFH und kleine MFH (bis zu 6 Wohneinheiten) Satteldächer (30°-60° Dachneigung) mit keinem bis geringem Dachüberstand aufweisen. Diese Dächer sind überwiegend mit Dachpfannen (Ziegel) bedeckt. Bei den größeren MFH (mehr als 6 Wohneinheiten) hingegen überwiegen Flachdächer (Abbildung 112).



Abbildung 112: Gängige Gebäudetypen im Untersuchungsraum (Eigene Bilder)

Insgesamt wurden rund 254.800 m² geneigte Dachflächen ermittelt (Mittelwert: 134,8 m²) (Tabelle 33). Bei den geneigten Dächern wird davon ausgegangen, dass diese mit Dachziegeln bedeckt sind. Bei einem durchschnittlichen Gewicht von 45 kg/m² (BMUB 2016) sind im Untersuchungsraum ca. 11.500 t Dachziegel verbaut.

Tabelle 33: Ermittlung von Grund- und Dachflächen im Bezugsraum

	Gesamt	Flächen (m ²)	
		Mittelwert (Gebäude)	Standard Abweichung (Gebäude)
Bebaute Fläche (BF)			
EFH	130.834	89,3	42,3
MFH	197.257	211,4	100,7
1 bis 6 WE	198.247	104,8	54,2
7 plus WE	129.844	255,6	108,3
Gesamt	328.091	136,8	92,7
Dachflächen			
EFH	173.004	118,1	46,0
MFH	216.348	231,9	97,4
Gesamt	389.352		
1 bis 6 WE	254.835	134,8	57,8
7 plus WE	134.518	264,8	110,8
Gesamt	389.353		

Bei Gebäuden mit mehr als 7 WE (7 plus WE) ist die Flachdachfläche mit der bebauten Fläche gleichzusetzen. Die Dachfläche summiert sich auf insgesamt 134.500 m² (Mittelwert: 265 m²). Allerdings kann in dieser Gebäudegruppe keine genaue Aussage zur Dachhaut getroffen werden. Bei einer Betrachtung von Standardaufbauten von Flachdächern ist davon auszugehen, dass eine Vielzahl von Metallen, sowie Kies, Kunststoffe oder Bitumenbahnen verbaut sind. Um eine genaue Aussage treffen zu können, muss eine detaillierte Bestandsaufnahme vor Ort erfolgen.

6.3 Stoffliche Lagerexploitation

Neben der Ermittlung des Stofflagers spielt die Nutzbarmachung (Exploitation) eine entscheidende Rolle. Durch Verknüpfung der Lagerinformationen mit Lebens- und Nutzungsdauern von Gebäuden und Bauteilen (siehe Kapitel 5) kann prognostiziert werden, zu welchem Zeitpunkt Stoffe für eine weitere Nutzung zur Verfügung stehen oder entsorgt werden müssen. Als Beispiel ist die durchschnittliche Lebensdauer von Wohngebäuden zu nennen, die in dieser Arbeit mit 80 Jahre bemessen wird.

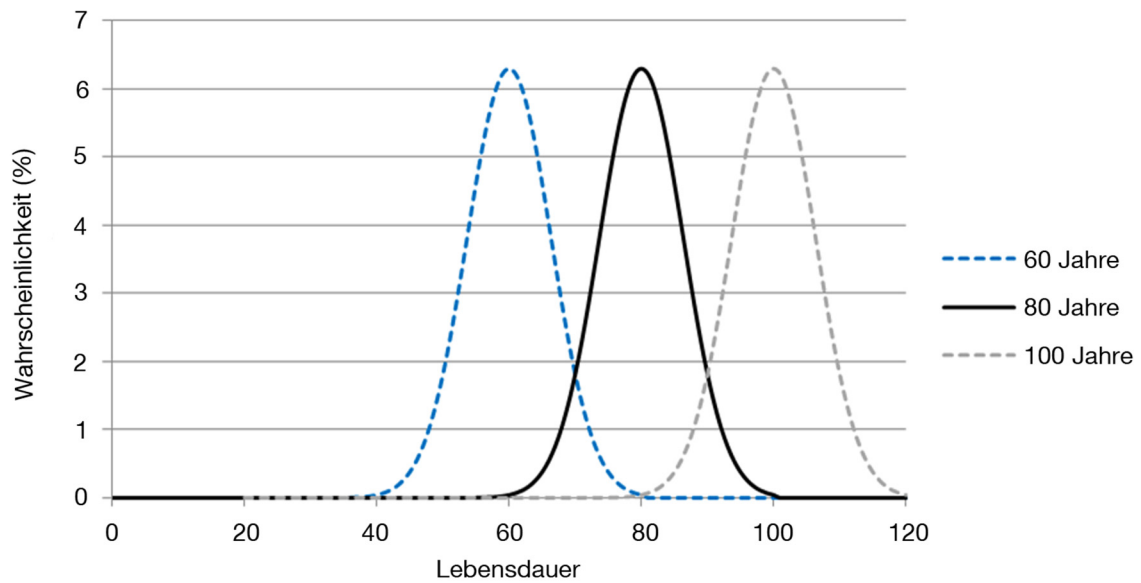


Abbildung 113: Darstellung der Lebensdauer Szenarien anhand der Binomialverteilung

Durch die Binomialverteilung kann die Bandbreite der Lebensdauern abgebildet werden. Als zusätzliches Szenario wird auf den Effekt von unterschiedlichen Durchschnittslebensdauern eingegangen. Dabei wurden 60 und 100 Jahre gewählt. Hierbei findet eine zeitliche Verschiebung der Stoffströme statt (Abbildung 113).

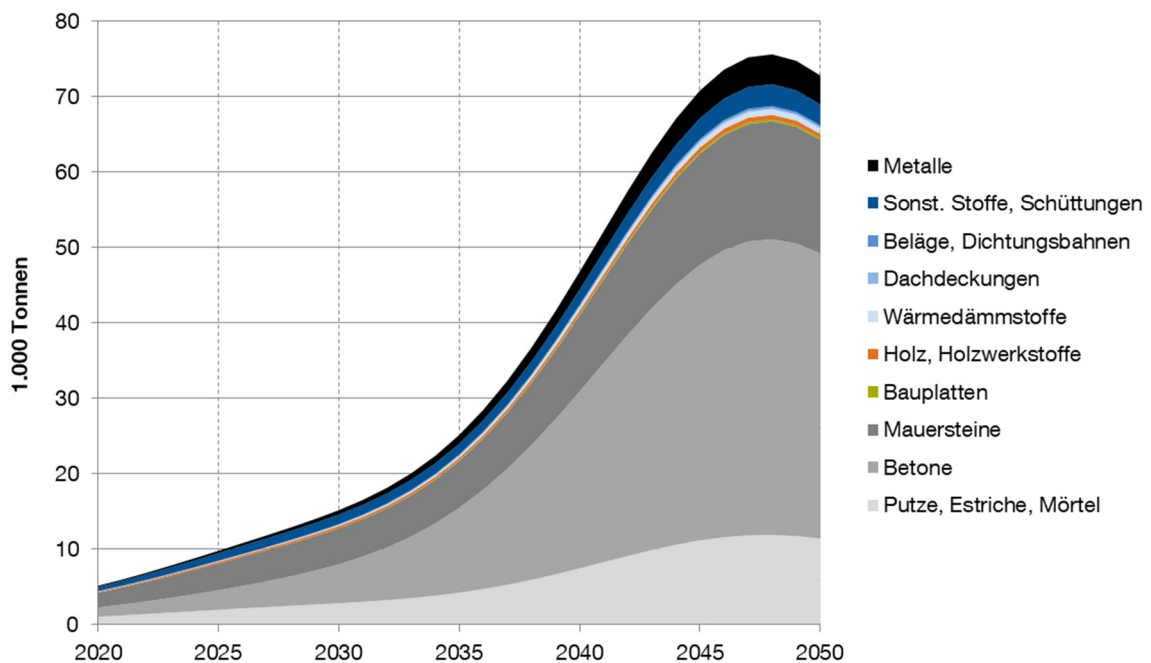


Abbildung 114: Jährlich freigesetzte Stoffe aus dem Bestand durch Gebäuderückbau im Bezugsraum (Maximal)

Durch Unsicherheiten der Auftretungswahrscheinlichkeiten kann, wie bereits zu Beginn der Arbeit beschrieben, keine eindeutige Aussage zum Freisetzungszeitpunkt von Stoffen gemacht werden. Aus diesen Gründen wurde bei der Auswertung auf Verteilungsfunktionen zurückgegriffen. Abbildung 114 beschreibt die voraussichtliche zeitliche Freisetzung der momentan im Untersuchungsraum verbauten Stoffe.

Wie bereits beschrieben, ist eine hundertprozentige Nutzbarmachung der derzeit verbauten Stoffe nicht durchführbar. Die Systemverluste können unter anderem technischer-, ökonomischer-, oder dissipativer Natur sein. Für die in diesem Beispiel untersuchten Stoffgruppen wurden Verlustraten aus der Literatur ermittelt (Tabelle 14 in Kapitel 5.5). Diese beziehen sich auf Sammlungs- und Aufbereitungsverluste. Dissipative Verluste, wie beispielsweise Korrosion bei Metallen während der Nutzungsphase, werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Die aufgezeigten Raten beziehen sich auf aktuelles Wirtschaften. Es ist jedoch damit zu rechnen, dass die Verlustraten zukünftig weiter reduziert werden können, was unter anderem auf die technische Weiterentwicklung von Recycling- und Sortieranlagen zurückzuführen ist.

In Abbildung 115 sind die anteiligen Verluste ausgewiesen. Abbildung 116 zeigt die nach derzeitigem Stand zurückgewinnbaren Massen, die als potentieller RC-Baustoff genutzt werden können. Der Höhepunkt der anfallenden Stoffmassen ist 2048 erreicht. Insgesamt 71.000 t verwertbare Fraktionen fallen voraussichtlich in diesem Zeitraum an. Die Hälfte davon sind Betone (52 %). Weitere 21 % sind Mauersteine, 15 % PEM und 5 % Metalle (Abbildung 117). Nach diesem Zeitpunkt sind die anfallenden Massen rückläufig. Dies ist auf die Bautätigkeiten der 1960er Jahre zurückzuführen.

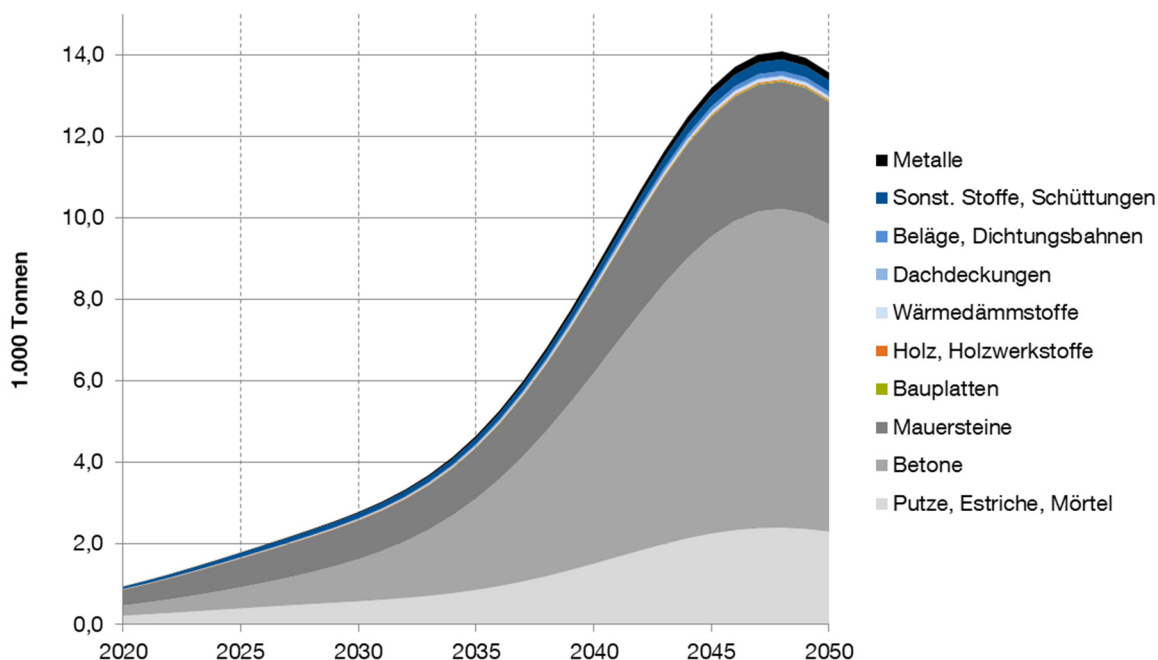


Abbildung 115: Verlustraten bei der Sammlung und Aufbereitung von Abbruchabfällen im Bezugsraum

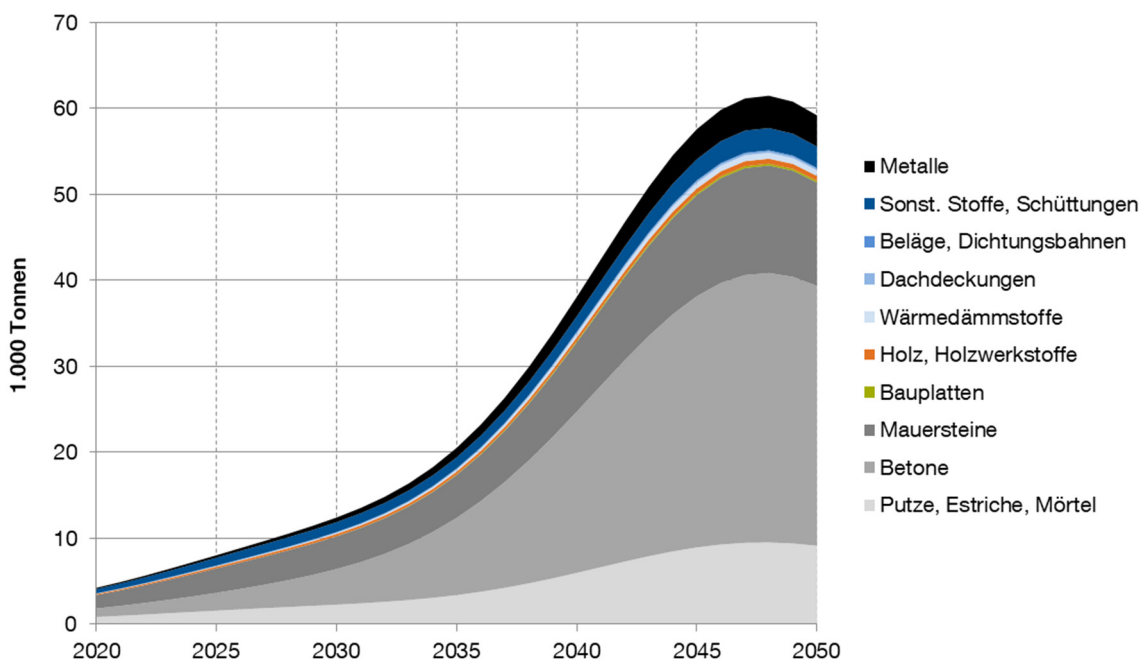


Abbildung 116: Verwertbare Stofffraktionen aus dem Gebäuderückbau im Bezugsraum

Betrachtet man den prozentualen Anstieg von verwertbaren Fraktionen von 2020 bis 2050, sind alle Fraktionen anwachsend (Tabelle 34). Bauplatten haben einen geringen Anteil am Gesamtaufkommen, verzeichnen jedoch das größte Wachstum mit einer 14.000 % (144-fache) Steigerung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in Deutschland nach dem Zweiten Weltkrieg die industrielle Produktion mit Gipskartonplatten begann, was den Innenausbau revolutionierte (Material Archiv 2018).

Weitere nennenswerte Fraktionen, mit hohen Wachstumsraten sind: Betone (3.000 %), Wärmedämmstoffe (2.100 %), Metalle (2.500 %) und Beläge und Dichtungsbahnen (4.900 %). Der durchschnittliche Anstieg vom Gesamtaufkommen aller betrachteten Baustoffgruppen beträgt 1.300 % (14-fache). Diese Steigerung ist ebenfalls auf die erhöhten Bautätigkeiten der Nachkriegszeit zurückzuführen (z. B. erhöhter Einsatz von Stahlbeton und Wärmeschutz).

Parallel zu den verwertbaren Fraktionen ist der Anstieg auf die Verlustfraktionen zu übertragen. Demnach ist es nötig, weiterhin Deponiekapazitäten und Anlagen zur thermischen Verwertung bereitzustellen um nicht-verwertbare Fraktionen zu behandeln.

Tabelle 34: Zusammenfassung der anfallenden Fraktionen aus dem Gebäuderückbau von 2020 bis 2050 im Bezugsraum

Baustoffgruppe	Anfallende Fraktionen (t)			Anstieg Aufkommen 2020 bis 2050
	Gesamt	Verluste	Verwertbar	
Putze, Estriche, Mörtel	177.897	35.590	142.320	952%
Betone	514.757	102.951	411.805	2.965%
Mauersteine	249.379	49.876	199.503	669%
Bauplatten	2.937	294	2.643	15.548%
Holz, Holzwerkstoffe	11.630	581	11.048	385%
Wärmedämmstoffe	10.560	1.056	9.504	2.086%
Dachdeckungen	4.205	421	3.785	381%
Beläge, Dichtungsbahnen	2.896	1.448	1.448	4.932%
Sonst. Stoffe, Schüttungen	52.766	5.277	47.489	385%
Metalle	52.610	2.631	49.979	2.510%
Gesamt	1.079.636	200.124	879.508	

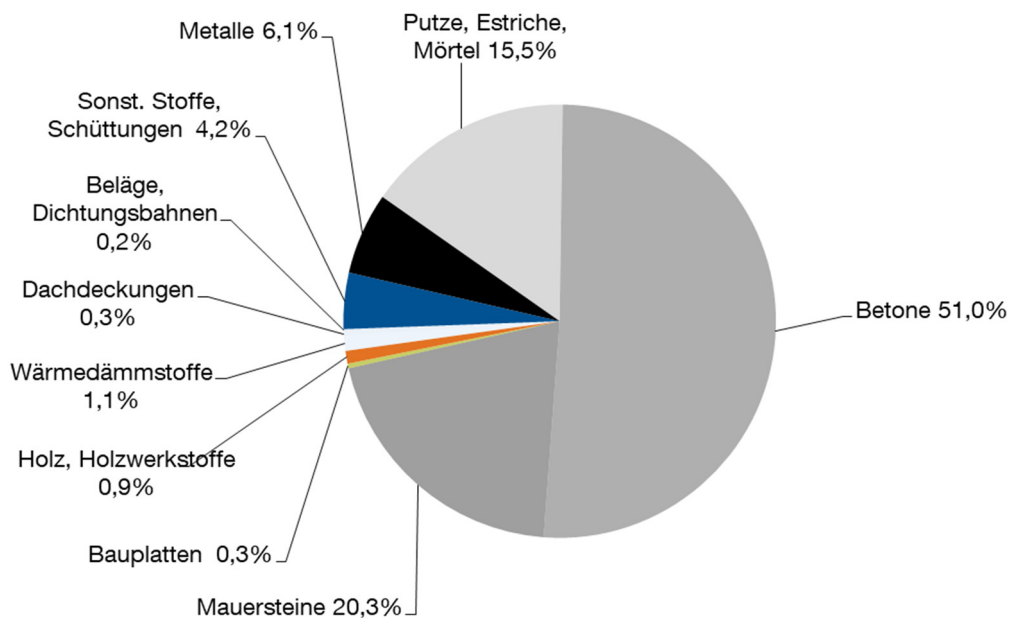


Abbildung 117: Voraussichtliche Verteilung der freigesetzten Stoffe im Jahr 2047 im Bezugsraum

Der jährliche Gesamtanteil an freigesetzten Stoffen aus dem Bestand ist in Abbildung 118 aufgezeigt. Dieser setzt sich aus folgenden Positionen zusammen:

- Gebäuderückbau
- Bauabfälle aus Neubau, Ersatzneubau und Sanierung (siehe Kapitel 5.1)

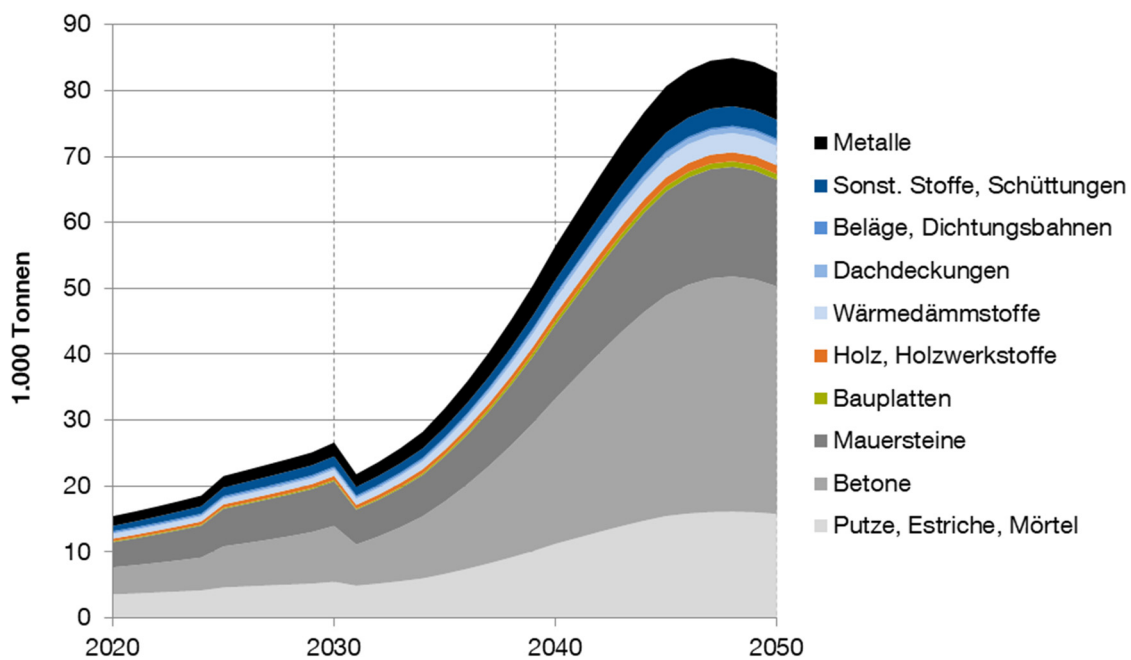


Abbildung 118: Jährlich freigesetzte Stoffe aus dem Gebäuderückbau (abzüglich Verluste) und Bau- und Sanierungsabfällen im Bezugsraum

In Tabelle 35 wird der Gesamtbetrachtungszeitraum (2020 bis 2050) zusammengefasst. Unter Berücksichtigung von Systemverlusten können potentiell rund 1,37 Mio. t aus dem Untersuchungsraum zur Produktion von Sekundärrohstoffen herangezogen werden. Der Großteil (38 %) ist auf Betone zurückzuführen, die auch den höchsten prozentualen Anstieg verzeichnen. Mit 9 % Anteil bietet die Gruppe der Metalle ein hohes Verwertungspotenzial.

Tabelle 35: Zusammenfassung der verwertbaren Stoffe aus dem Gebäuderückbau und Bau- und Sanierungsabfällen von 2020 bis 2050 im Bezugsraum

Baustoffgruppe	Gesamt (t)	Anteil am Gesamtaufkommen	Anstieg Aufkommen 2020 bis 2050
Putze, Estriche, Mörtel	273.786	20%	340%
Betone	515.841	38%	740%
Mauersteine	287.961	21%	324%
Bauplatten	12.791	1%	573%
Holz, Holzwerkstoffe	26.070	2%	230%
Wärmedämmstoffe	50.787	4%	304%
Dachdeckungen	14.035	1%	374%
Beläge, Dichtungsbahnen	8.277	1%	19%
Sonst. Stoffe, Schüttungen	56.803	4%	259%
Metalle	119.393	9%	388%
Gesamt	1.365.744	100%	

Um neben dem Basisszenario (80 Jahre) zwei zusätzliche Szenarien zu betrachten, werden die gewählten Gebäudelebensdauern (Kapitel 5.3) angepasst. Wie oben beschrieben, wird auf eine identische Verteilungsfunktion zurückgegriffen. Durch die Spannweiten der Nutzungs- und Lebensdauern von Bauteilen und Gebäuden können lediglich voraussichtliche Zeitpunkte bestimmt werden.

Minimum Szenario

Durchschnittliche Lebensdauer: 60 Jahre

Verschiebung des Höhepunkts (Jahr): 2027

Maximum Szenario

Durchschnittliche Lebensdauer: 100 Jahre

Verschiebung des Höhepunkts (Jahr): 2067

Zur Übersichtlichkeit werden die Ergebnisse anhand des Basisszenarios (80 Jahre) beschrieben. Die Potentiale und Nutzbarmachung der jeweiligen Baustoffgruppen, werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Hierbei wird exemplarisch auf ausgewählte Baustoffgruppen eingegangen. Zum einen werden die Betone und Mauersteine betrachtet, da diese den größten Massenstrom darstellen und für die Herstellung von Recyclingbetonen geeignet sind. Ebenfalls haben diese Fraktionen ein hohes Potential (kurze Transportwege) innerhalb der Betrachtungsgrenzen verwertet zu werden.

Zum anderen werden die Gruppe der Metalle exemplarisch betrachtet. Diese haben derzeit den höchsten monetären Wert. Zudem besteht bei den Rohstoffen, die zur

Herstellung benötigt werden (z. B. Erze, Koks Kohle u.a.), eine nahezu vollständige Importabhängigkeit. Ebenfalls weisen Metallschrotte ein hohes Potential in der Sekundärproduktion aus, um die Umweltwirkungen im Vergleich zur Primärproduktion zu verringern (Siehe Kapitel 3.2).

6.3.1 Ausgewählte mineralische Fraktionen – Betone und Mauersteine

Im Untersuchungsraum steigt ab 2020 der Anteil an freigesetzten mineralischen Stoffen. Bei Betonen und Mauersteinen zeigt sich bis zur Hälfte des Jahrhunderts ein exponentieller Anstieg der Massen. Dies bietet große Möglichkeiten zur Produktion von Sekundärbaustoffen (z. B. RC-Betone). Abzüglich der Erfassungsverluste von 20 % fallen von 2020 bis 2050 rund 516.000 t Betone und 288.000 t Mauersteine an (Tabelle 35). Nach 2047 sind die anfallenden Fraktionen rückläufig.

Der derzeitige Stand der Technik sieht ein Verfüllen (z. B. im Tiefbau) von mineralischen Stoffen wie Betone und Mauerwerk vor (Deilmann et al. 2014, S. 14). Je nach Prüfergebnis (z. B. Schadstoffgehalte und Sortenreinheit) können aus den verwertbaren mineralischen Fraktionen rund 521.000 m² Straße hergestellt werden. Dies entspricht einer 87 km langen 2-spurigen Straße (BK 1.8). Diese Berechnung basiert auf Werten des Materialbestands von Infrastrukturbauwerken durch das Wuppertal Institut (Steger et al. 2011, S. 12).

Für die Erschließung des Neubaugebiets Freiham werden rund 54.000 m² neue Straßen benötigt. Das anfallende mineralische Sekundärmaterial übertrifft den benötigten Bedarf für den Straßenbau zur weiteren Erschließung (Neubau und Erhalt) um den Faktor 10. Der Materialbedarf für die Erschließung von Infrastruktur wird exemplarisch in Kapitel 6.4.6 behandelt.

Eine hochwertigere Form des Recyclings ist die Verwendung der Fraktionen zur Herstellung von Recycling Beton (RC-Beton). Derzeit werden in Deutschland weniger als 0,5 % der Gesteinskörnung für diesen Zweck genutzt (Deilmann et al. 2014, S. 47). Der RC-Beton kann genutzt werden um den lokalen Bedarf zu decken. Eine ökologische Betrachtung von RC-Beton und Normalbeton der TU Cottbus kam zu dem Ergebnis, dass die energetischen Vorteile und die damit verbundenen Emissionen durch den Einsatz von RC-Gesteinskörnung (Betonsplitten) zur Betonherstellung ausschließlich aus einer Verkürzung der Transportwege resultieren. Daher ist die Verwendung von RC-Material, vor allem in Regionen mit einer geringen Dichte an Primärvorkommen (z. B. Ballungszentren mit hoher Bauaktivität) sinnvoll (Spyra et al. 2010, S. 79). Die mineralischen Fraktionen (insbesondere Betonbruch) können durch mobile Aufbereitungsanlagen innerhalb des Stadtteils aufbereitet und gelagert werden.

Die Verwertungswege von Betonen (sowie anderer mineralischen Fraktionen) sind maßgeblich von der Sortenreinheit und dem Schadstoffgehalt abhängig. Die Rohmaterialien zur Herstellung rezyklierter Gesteinskörnung müssen den Vorgaben der ABuG (Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkung auf Boden und Gewässer) entsprechen. Dabei gilt es die jeweiligen Grenzwerte einzuhalten. Dies beinhaltet eine Prüfung der angefallenen Stoffe (DIN 4226-101:2017-08).

Zur Verwendung von RC-Splitt als Gesteinskörnung in Beton ist die Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) anzuwenden. Demnach ist bei der

Herstellung von RC-Beton nur ein Teilaustausch der herkömmlichen Gesteinskörnung durch zertifizierten RC-Splitt möglich. Dennoch kann der anfallende Betonsplitt, Sortenreinheit vorausgesetzt, gänzlich verwertet werden (DAfStb 2010).

Gesteinskörnung für RC-Beton in Deutschland kann nicht zu 100 % aus Betonbruch bestehen. Unter Einhaltung der besagten Norm und den Richtwerten ist die Beimischung von maximal 45 Vol.-% (Typ 1), bzw. 35 Vol.-% (Typ 2) Betonbruch in RC-Beton zulässig. Demnach müssen neben Zement und Wasser mindestens 55 Vol. % bzw. 65 Vol. % an Primärgestein zugemischt werden.

Sortenreiner Mauerwerksbruch kann laut Normung und unter Einhaltung der geltenden Grenzwerte bis zu maximal 10 % als RC-Gesteinskörnung (Mauerwerksplitt), RC-Beton (Typ 1) beigemischt werden. Bei Typ 2 können maximal 30 % der RC-Gesteinskörnung substituiert werden.

Des Weiteren fallen bei der Aufbereitung von Beton und Mauerwerk rund 40 % Brechsand (< 2mm) an. Dieser darf nach den oben genannten Regelwerken nicht als RC-Splitt für konstruktive Anwendungen verwendet werden (Heinz 2012, S. 4), (Müller 2016, S. 65). Durch weitere Aufbereitungsschritte kann diese Fraktion beispielsweise in die Zementproduktion einfließen.

Die potentiellen Stoffströme der anfallenden mineralischen Fraktionen, die zur Produktion von RC-Baustoffen geeignet sind, sind beispielhaft in Abbildung 119 und Abbildung 120 dargestellt.

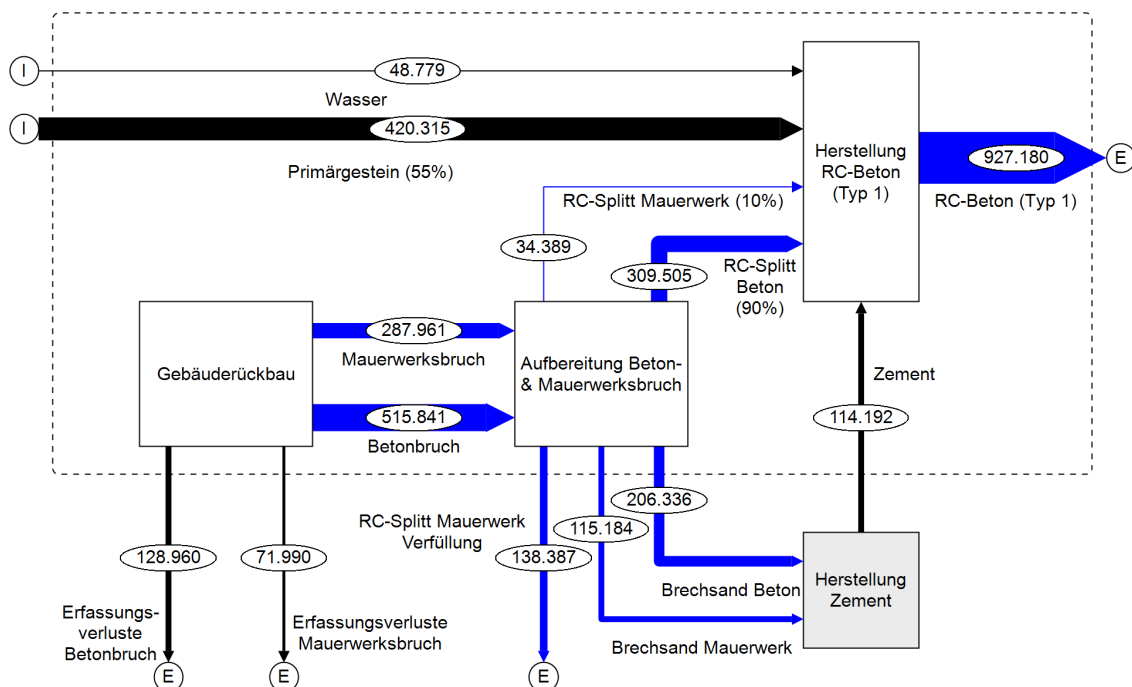


Abbildung 119: Potentiale der Produktion von RC-Beton (Typ 1)

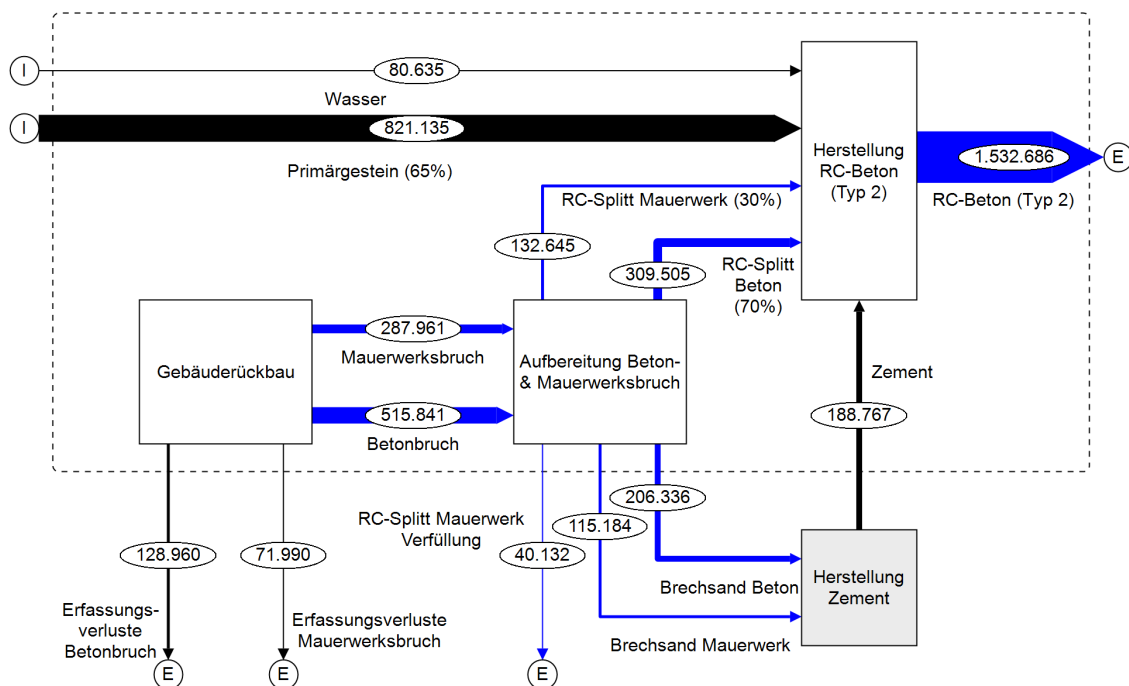


Abbildung 120: Potentiale der Produktion von RC-Beton (Typ 2)

Maximal können aus den anfallenden mineralischen Fraktionen rund 0,93 Mio. t RC-Beton (Typ 1) und 1,53 Mio. t (Typ 2) hergestellt werden. Bei einem geringeren Anteil von RC-Splitt in RC-Beton kann zwar mehr Beton produziert werden, allerdings steigt auch der Einsatz an Primärmaterial das hinzugefügt werden muss. Bei einem durchschnittlichen Betonbedarf von 87,4 t/WE in MFH (siehe Kapitel 5) deckt der produzierte RC-Beton den Bedarf für den Bau von 10.600 WE (Typ 1) bzw. 17.500 WE (Typ 2). Bei EFH (ca. 118 t/WE) können hingegen lediglich 7.900 WE (Typ 1) bzw. 13.000 WE (Typ 2) bereitgestellt werden.

6.3.2 Transportdistanzen

Das Untersuchungsgebiet grenzt unmittelbar an die Autobahn (A 99), sowie an zwei vielbefahrene Bahnstrecken. Ein Güterbahnhof ist weniger als 1 km entfernt. An diesem Standort können die jeweiligen Fraktionen auf die Bahn verladen werden (Abbildung 121). Der entscheidende Faktor der Verwertungswege ist nach wie vor die Wirtschaftlichkeit, die in Abhängigkeit zur Getrennthaltung der Fraktionen, Transportlogistik sowie des Aufbereitungsaufwands steht.

Die Auswertung der Transportdistanzen zu den Recycling- und Produktionswerken wird in Kapitel 4 beschrieben. Hierbei wurden die jeweiligen Straßendistanzen vom Standort Freiham zu den nächstgelegenen Werken ermittelt und Anhand von Karten dargestellt. Abbildung 122 zeigt die Transportdistanzen zu stationären Baustoff-Recyclinganlagen innerhalb eines 30 km Radius.

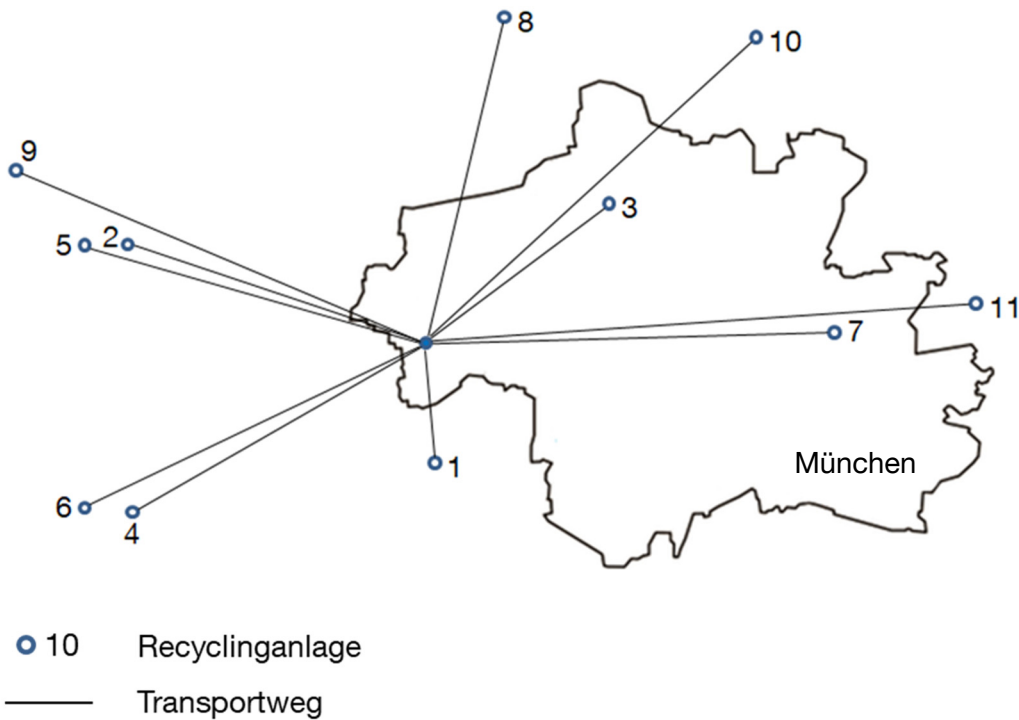


Abbildung 121: Verkehrstechnische Anbindung des Untersuchungsraums

Zum Abtransport der verwertbaren mineralischen Fraktionen sind bei einer Auslastung von 85 % fast 55.000 LKW Fahrten notwendig. Geht man von einer durchschnittlichen Transportdistanz (Hin- und Rückfahrt) von 20 km zur nächsten Baustoff-Recyclinganlage aus, summiert sich der Transport auf insgesamt 2,2 Mio. km (51-fache des Erdumfangs). Allein durch die LKW Transporte werden rund 1.800 t CO₂, 10 t NO_x und 145 kg Feinstaub freigesetzt.

Des Weiteren sind Transporte zu einem Betonwerk notwendig, da die betrachteten Baustoff-Recyclinganlagen nicht für die Herstellung von Beton ausgelegt sind (Abbildung 123). Durch die Aufbereitung vor Ort (z. B. mobile Anlagen) können diese Fraktionen für Baumaßnahmen innerhalb des Untersuchungsraums direkt eingesetzt und die Transporte reduziert werden. Die Transportdistanzen zu den Betonwerken sind in Abbildung 123 aufgezeigt. Hierbei wird von einem maximalen Transportradius von 35 km ausgegangen (Siehe Kapitel 4).

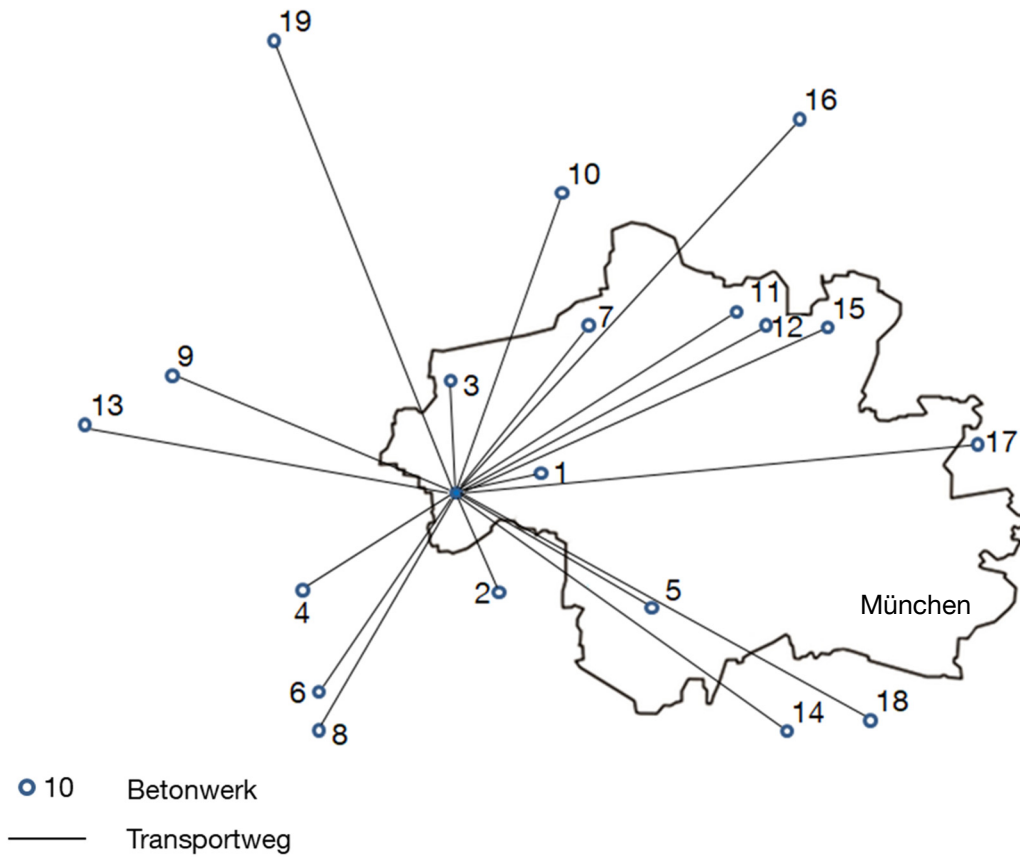
Die kürzeste Transportdistanz, um aus stationär aufbereitetem Bauschutt aus Freiham RC-Beton herzustellen und zurück nach Freiham zu liefern, beträgt 23,2 km. Um Zement aus dem nächstgelegenen Werk (Abbildung 125) bereitzustellen, sind weitere 77,3 km Transporte notwendig. Die Lieferung von Zement nach Freiham ist jedoch auch für eine vor Ort Produktion nötig. Die Logistikkette ist in Abbildung 124 dargestellt.



Nr.	Werk	Distanz (km)*
1	Trinkl GmbH & Co. KG	8,5
2	Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises Fürstentfeldbruck (AWB)	15,9
3	Breitsamer Entsorgung und Recycling GmbH	18
4	Kieswerk Unterbrunn	18,1
5	Heifra Recycling GmbH	19,3
6	Klarwein GmbH	19,3
7	BLUES Bay. Logistik Umwelt & Entsorgungs Systeme GmbH	22,5
8	Ettengruber GmbH	23,3
9	Fritsch - Recycling und Entsorgung	25
10	AR Recycling GmbH	26,5
11	Kieswerk Obermayr GmbH & Co. KG	28,3

* Straßendistanz (einfach) von München/Freiham zum Recyclingwerk

Abbildung 122: Transportdistanzen zu den nächstgelegenen Baustoff-Recyclinganlagen



Nr.	Werk	Distanz (km)*	Nr.	Werk	Distanz (km)*
1	Berger Beton GmbH	6	11	PS Beton Piederstorfer	20,8
2	BLG Transportbeton GmbH I	6,3	12	Berger Beton GmbH	22,4
3	PS-Beton Piederstorfer	7,3	13	BLG Transportbeton GmbH IV	23,6
4	CEMEX AG I	13,2	14	Franz Handschuh	29
5	BLG Transportbeton GmbH II	13,5	15	Xaver Riedel GmbH	29,9
6	Berger Beton GmbH	15,8	16	Schwenk GmbH I	29,9
7	Schwenk GmbH	16,8	17	CEMEX AG III	32,6
8	BLG Transportbeton GmbH III	18,6	18	Ganser Beton GmbH	33,3
9	Schwenk GmbH I	19	19	Glonntaler Transportbeton	35,5
10	CEMEX AG II	20,1			

* Straßendistanz (einfach) von München/Freiham zum Betonwerk

Abbildung 123: Transportdistanzen zu den nächstgelegenen Betonwerken

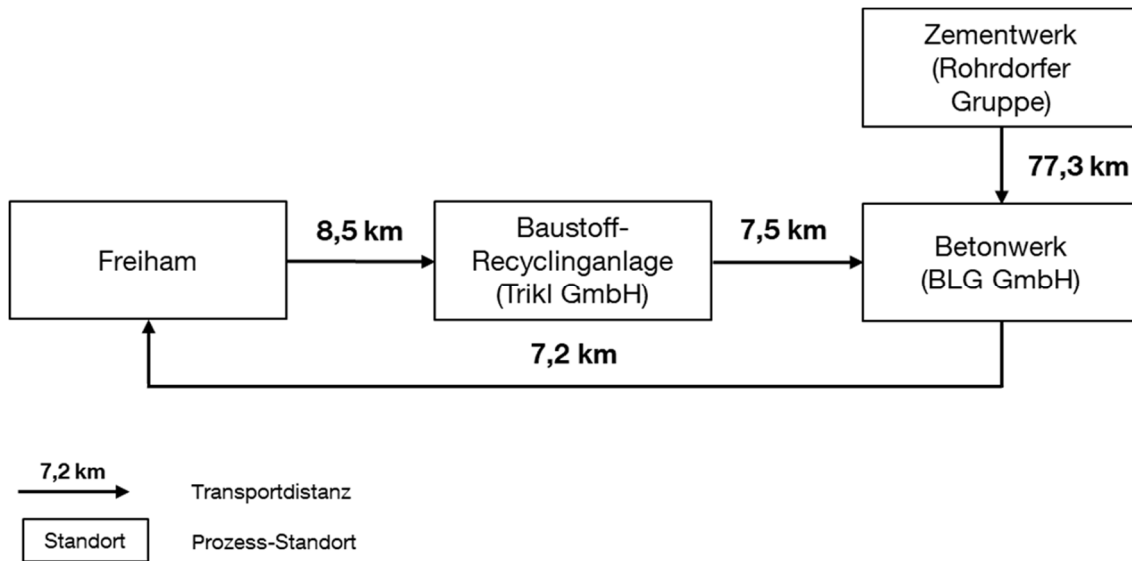


Abbildung 124: Transportdistanzen für die Logistikkette zur Herstellung von stationär aufbereitetem Beton aus RC-Material

Zement kann aus den Fraktionen (< 2 mm), die bei der Aufbereitung von Bauschutt anfallen, durch weitere Produktionsschritte (z. B. mahlen) hergestellt werden (siehe Abbildung 119 und Abbildung 120). Die betreffenden Fraktionen summieren sich auf insgesamt 322.000 t. Hierbei sind auch die Zusammensetzung und der potentielle Schadstoffanteil maßgebend, die derzeit nicht quantifiziert werden können. Es ist davon auszugehen, dass die tatsächlich verwertbaren Anteile geringer sind, da ein Ausschuss zu erwarten ist.

Die Errichtung einer Produktionsstätte in Proximität zum Untersuchungsraum ist nicht sinnvoll, da die Abnahme der anfallenden Stoffe und deren produktionsbedingte Qualität nicht gesichert sind. Daher werden weitere Transporte zum nächsten Zementwerk nötig (Abbildung 125).

Zementwerke sind vornehmlich in Abbaugebieten der benötigten Rohstoffe (z. B. Kalksteinvorkommen) zur Zementherstellung angesiedelt. Wie das Werk der Rohdorfer Gruppe, das auch Kies und Beton bereitstellt, kann deren Bedarf aus lokalen Lagerstätten gedeckt werden (VDZ 2016, S. 1), (Basten 2002, S. 13). Eine Nutzung des anfallenden Beton- und Mauerwerksbruchs als Sekundärmaterial sollte den Transportaufwand entscheidend minimieren.

Um die Emissionen durch LKW Transporte weitgehend zu reduzieren, können Bahntransporte genutzt werden. Wie bereits dargelegt, grenzt das Untersuchungsgebiet unmittelbar an zwei vielbefahrene Bahnstrecken, wobei sich in einer Entfernung von weniger als 1 km ein Güterbahnhof befindet. An diesem Standort können die jeweiligen Fraktionen auf die Bahn verladen werden (Abbildung 121).

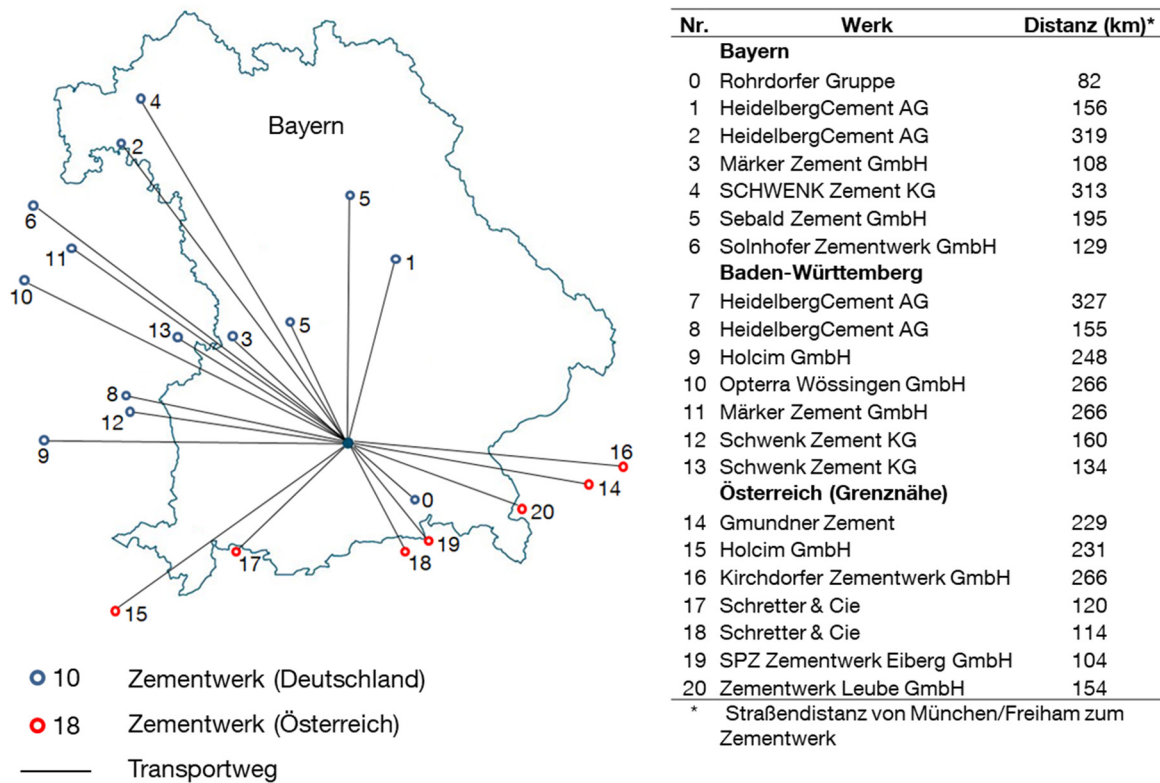


Abbildung 125: Transportdistanzen zu den nächstgelegenen Zementwerken

Durch die zeitlich verschobene Freisetzung der besagten Fraktionen sind temporäre Lagerstätten notwendig. Diese sind bei einer mobilen Aufbereitung derzeit nicht genehmigungsbedürftig (Müller 2016, S. 31). Dies setzt jedoch den benötigten Platz für Anlagen und Lagerung voraus, der nicht immer gegeben ist.

Zur temporären Lagerung eignen sich die derzeit brachliegenden Flächen, die unmittelbar im Westen an den Untersuchungsraum grenzen (Abbildung 121). Um die mineralischen Fraktionen, die für eine Zementproduktion in Frage kommen zu lagern, sind rund 1,1 ha Fläche nötig. Die Berechnung basiert auf einem kreisförmigen Kegel mit 45° Neigung. Der durchschnittliche Bodenpreis für landwirtschaftliche Flächen im Umland von München beträgt rund € 70.000 pro ha. Bei einer Zwischennutzung von Bauland (€ 1.200 pro m²) zur Lagerung liegt allein der Grundstückswert bei über € 13 Mio. Dies ist bei einer Wirtschaftlichkeitsberechnung zu berücksichtigen, da die Kosten (Pacht oder Kauf) durch den Erlös des Verkaufs des Sekundärmaterials gedeckt werden müssen. Nach einer weiteren Verwendung der Stoffe kann die Fläche allerdings wieder als Siedlungsfläche oder für andere Nutzungen zur Verfügung stehen. Durch die gegebenen Unsicherheiten (u.a. materielle Zusammensetzung, langfristige Lagerfähigkeiten) wird dieser Aspekt in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Zur weiteren Verwertung der Feinfraktionen aus der Aufbereitung ist nach Stand der Technik eine Deponierung auf einer Mineralstoffdeponie (DK 0) unausweichlich (Abbildung 126). Bei erhöhten Gipsanteilen kann die Annahme mitunter verweigert werden, was zu erhöhten Entsorgungskosten führen kann (Heinz 2017).

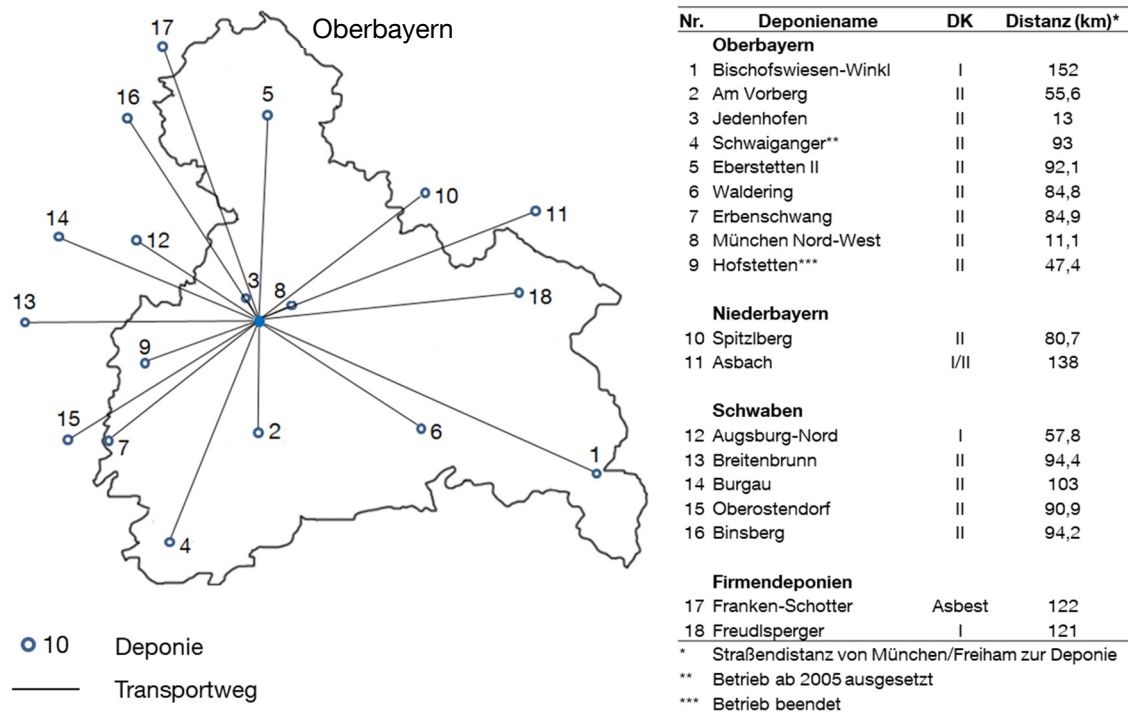


Abbildung 126: Transportdistanzen zu den nächstgelegenen Deponien (in Anlehnung an LfU 2016)

Dennoch ist es technisch möglich, Feinfraktionen des Betonbruchs als Zugabe zu den Korngemischen für Frostschutz- oder Schottertragschichten im Straßenbau zu verwenden (Müller 2016, S. 65). Die Erzeugung von sortenreiner Körnung aus Mauerwerksbruch stellt nach wie vor eine technologische Herausforderung dar, die bisher noch nicht gelöst ist (Müller 2016, S. 73).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Verwertung der mineralischen Fraktionen vor Ort die Transportdistanzen und damit die Transportkosten und den CO₂ Ausstoß verringern kann. Dies setzt eine dementsprechende Infrastruktur (u.a. Anlagen, Lagerflächen) und den vorhandenen Bedarf voraus, der in Kapitel 6.5 beschrieben wird.

6.3.3 Ausgewählte metallische Fraktionen

Der Anteil an freigesetzten Metallen ist ansteigend (Abbildung 127 und Tabelle 36). Ein Maximum ist ca. 2047 mit 7.300 t/a erreicht. Insgesamt fallen im Zeitraum von 2020 bis 2050 unter Berücksichtigung von Erfassungsverlusten rund 119.000 t Metalle an. Dadurch kann beispielsweise der Metallbedarf für die Herstellung von rund 14.500 WE in MFH (ca. 8,3 t Metalle/WE in MFH - siehe Kapitel 5) gedeckt werden.

Metalle werden nicht verbraucht, sondern gebraucht. Die Recyclingquoten liegen zwischen 80 und nahezu 100 % (Kurth et al. 2018, S. 459). Unter den Annahmen aus

Kapitel 6.2.3.1 haben die verwertbaren Massen einen derzeitigen Gesamtwert von fast € 22 Mio. (im Bezugsraum). Die Verteilung ist in Tabelle 36 aufgezeigt.

Tabelle 36: Gesamtmasse an verwertbaren Metallen von 2020 bis 2050 im Bezugsraum

Metalle	Anteil an Masse*	Masse (t)	Schrottpreis** (€/t)	Wert (€)	Anteil am Gesamtwert
Stahl	94,9%	113.304	140 €	15.862.560 €	78%
Gusseisen	3,0%	3.582	140 €	501.480 €	2%
Kupfer	0,8%	955	4.240 €	4.049.200 €	20%
Aluminium	0,7%	836	800 €	668.800 €	3%
Titanzink	0,5%	597	1.400 €	835.800 €	4%
Gesamt	100%	119.273		21.917.840 €	100%

* Ermittelte Werte aus Kapitel 4

** Entnommen aus www.metallankauf24.de (Stand 23.08.2017)

Eine Verwertung der Metalle innerhalb des Untersuchungsraums ist nicht zielführend. Durch die vergleichsweise hohen Schrottwerte ist davon auszugehen, dass der Großteil des Metallschrotts in die Sekundärproduktion einfließt. Durch die unterschiedliche Zusammensetzung von Metallschrotten, der Vielzahl an Produktionsverfahren (z. B. Guss, Walzen u.a.), die preisliche Fluktuation und den

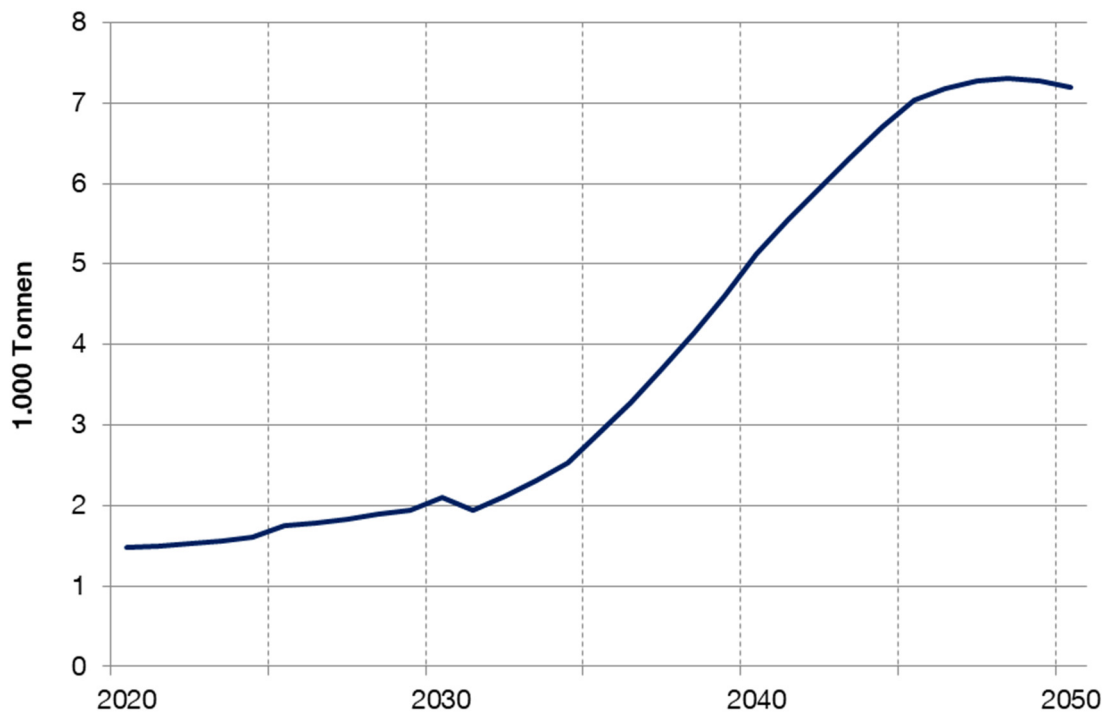


Abbildung 127: Jährlich verwertbarer Anteil an Metallen im Bezugsraum

internationalen Handel ist eine Aussage zu den Verwertungs- und Transportwegen nur bedingt aussagekräftig (siehe Kapitel 3). Daher wird in diesem Abschnitt lediglich auf die Menge der verwertbaren Fraktionen aus dem Bestand eingegangen.

6.4 Erschließung von Wohngebäuden durch Neubau

Der Bedarf an Rohstoffen wird ausgelöst durch Neubau, Ersatzneubau, Sanierung und Bereitstellung von Infrastruktur (siehe Kapitel 2). Anhand der Methodik aus (Kapitel 5.6) wird der Rohstoffbedarf des Neu- und Ersatzneubaus im Untersuchungsraum ermittelt.

6.4.1 Neubau

Durch die Erschließung von derzeit unbebauten Flächen entsteht bis 2030 Wohnraum für 20.000 Menschen in derzeit zwei geplanten Realisierungsabschnitten (RA) (Landeshauptstadt München 2013, S. 37). Dies entspricht umgerechnet fast 11.000 WE.

Derzeit beginnt die Planungs- und Ausschreibungsphase von RA 1. Erdarbeiten zur Erschließung von Infrastruktur haben bereits begonnen. Bis 2024 soll dieser Abschnitt mit rund 4.000 WE fertiggestellt werden. Darauf folgt RA 2 mit weiteren 6.500 WE für 12.000 Menschen, der laut aktuellen Planungen von 2025 bis 2030 umgesetzt werden soll (Tabelle 37) (Bald 2017).

Tabelle 37: Übersicht der Realisierungsabschnitte des Neubaugebiets bis 2030

Realisierungsabschnitt (RA)	Zeitraum*		Anzahl Personen	Anzahl Wohneinheiten**
	von	bis		
RA 1	2018	2024	8.000	4.400
RA 2	2025	2030	12.000	6.500
		Gesamt	20.000	10.900

* geplant

** Berechnung basiert auf \emptyset 1,84 Personen/WE

Der Baustoffbedarf für die beiden RA wird anhand der Anzahl an WE ermittelt, da die Gebäudevolumina in dieser Planungsphase derzeit nicht bekannt sind. Der genaue Zeitplan innerhalb der jeweiligen RA ist ebenfalls unbekannt. Daher wird der Bedarf anhand jährlicher Durchschnittswerte erstellt. Der Gesamtbedarf des RA wird durch den geplanten Realisierungszeitraum geteilt, um jährliche Werte zu ermitteln (Abbildung 128).

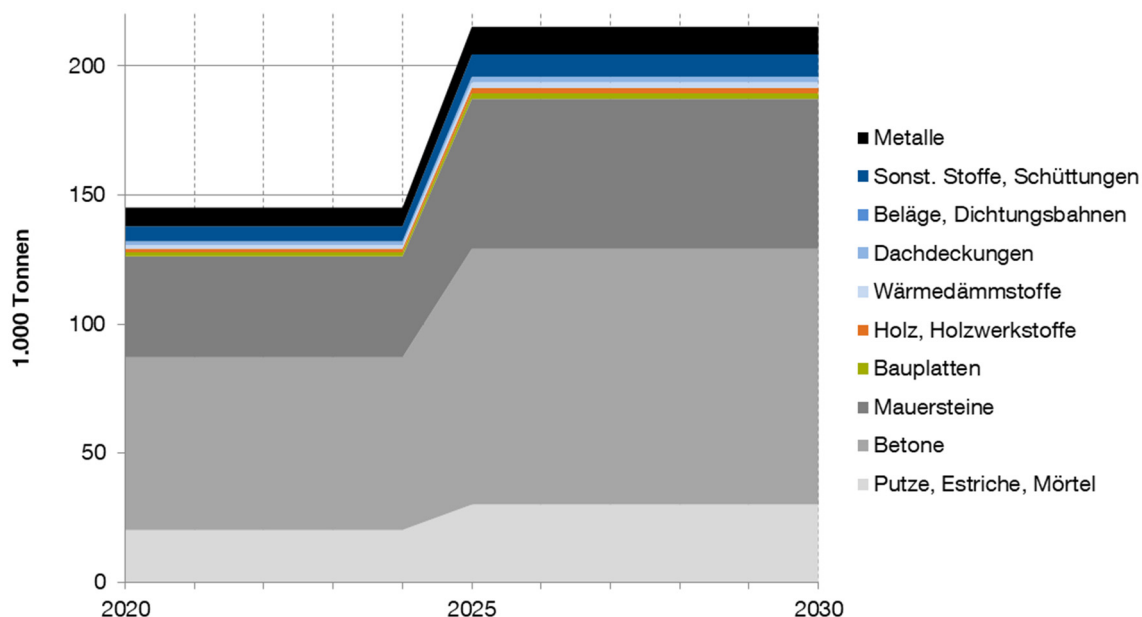


Abbildung 128: Jährlicher Baustoffbedarf für Wohngebäude in Realisierungsabschnitt 1 und 2

In der Berechnung wird davon ausgegangen, dass Neubauten in beiden RA eine identische stoffliche Zusammensetzung haben. Sollten detaillierte Planungsunterlagen zur Verfügung stehen, können durch die Modularität dieses Rechenmodells die entsprechenden Stoffintensitäten angepasst werden.

Der stoffliche Gesamtbedarf von RA 1 beträgt 726.000 t. Dies entspricht 145.000 t/a. Zur Realisierung von RA 2, werden rund 1,1 Mio. t (215.000 t/a) benötigt. Hierbei werden Baustellenabfälle nicht berücksichtigt. Es ist davon auszugehen, dass diese den Bedarf um zusätzliche 3 % erhöhen (siehe Kapitel 5.6.3).

Tabelle 38: Gesamtbedarf an Baustoffen für die jeweiligen Realisierungsabschnitte

Baustoffgruppe	RA 1		RA 2		RA 1 + RA 2
	Gesamt (t)	t/a	Gesamt (t)	t/a	Gesamt (t)
Putze, Estriche, Mörtel	101.640	20.328	150.652	30.130	252.292
Betone	333.960	66.792	495.000	99.000	828.960
Mauersteine	196.020	39.204	290.543	58.109	486.563
Bauplatten	7.260	1.452	10.761	2.152	18.021
Holz, Holzwerkstoffe	7.260	1.452	10.761	2.152	18.021
Wärmedämmstoffe	7.260	1.452	10.761	2.152	18.021
Dachdeckungen	7.260	1.452	10.761	2.152	18.021
Sonst. Stoffe, Schüttungen	29.040	5.808	43.043	8.609	72.083
Metalle	36.300	7.260	53.804	10.761	90.104
Gesamt	726.000	145.200	1.076.087	215.217	1.802.087

Allein für die Bereitstellung der rund 11.000 WE werden 1,8 Mio. t Baustoffe benötigt. Der größte Anteil (46 %) ist dabei auf Betone zurückzuführen, gefolgt von Mauersteinen (27 %), PEM (14 %) und Metalle (5 %).

Derzeit gibt es keine konkreten Planungen zu weiteren RA. Daher wird der Bedarf bis einschließlich 2030 ermittelt. Die Ergebnisse nach Baustoffgruppen und RA sind in Tabelle 38 zusammengefasst.

6.4.2 Ersatzneubau

Aus dem Stoffstrommodell kann durch die durchschnittliche Lebensdauer von Wohngebäuden der Abrisszeitpunkt ermittelt werden (Abbildung 129). Im Zeitraum von 2045 bis 2050 werden die höchsten Abrissraten prognostiziert (Durchschnittlich 150.000 m³/a). Dies betrifft insbesondere MFH, die in den 1960er Jahren entstanden sind. Zwischen 2020 und 2050 werden mehr als 2,2 Mio.m³_{BRI} zurückgebaut (EFH: 590.000 m³_{BRI}; MFH: 1,7 Mio m³_{BRI}). Im Vergleich zum derzeitigen Gesamtbestand von 4,5 Mio.m³_{BRI} wird voraussichtlich fast die Hälfte aller Gebäude in diesem Zeitraum zurückgebaut (Abbildung 129).

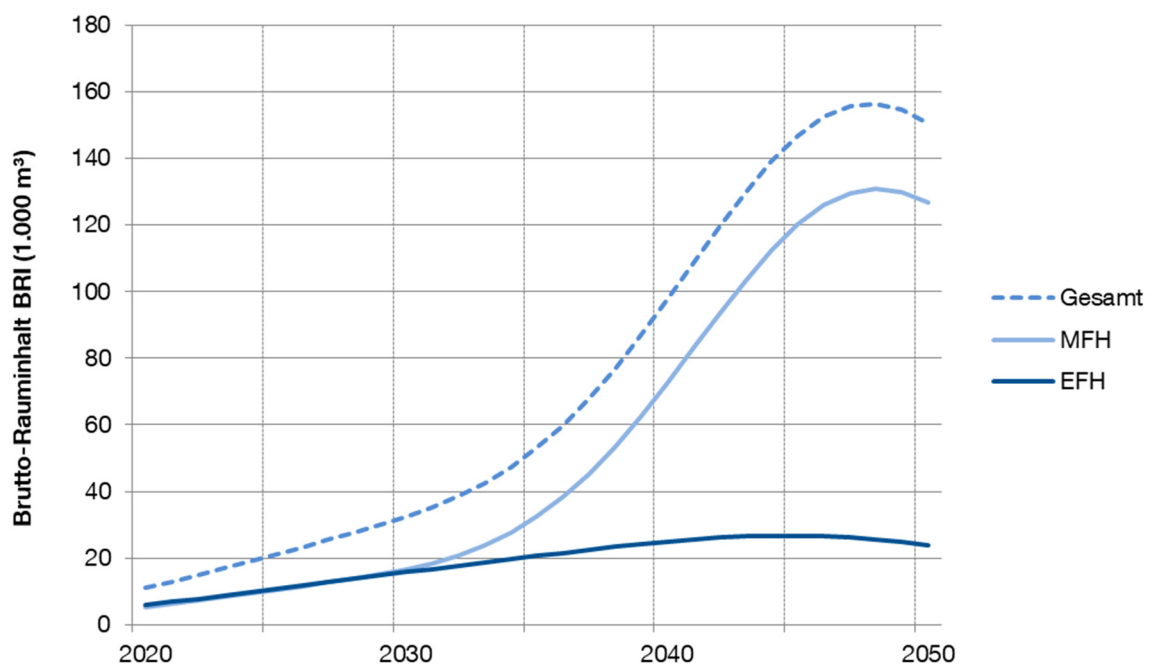


Abbildung 129: Zurückgebautes Gebäudevolumen pro Jahr im Bezugsraum (nach Volumen und Typ)

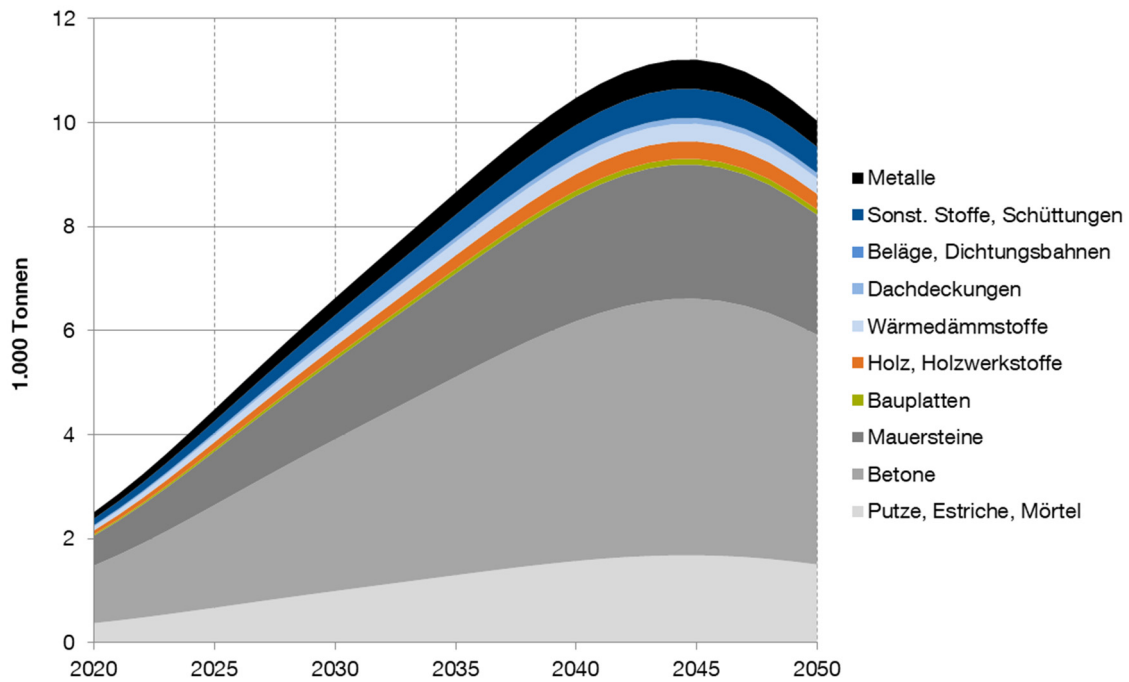


Abbildung 130: Jährlicher Rohstoffbedarf des Ersatzneubaus (EFH) im Bezugsraum

In diesem Fallbeispiel wird davon ausgegangen, dass in einer wachsenden Stadt wie München mit hohen Grundstückspreisen und Bedarf nach Bauland für jedes abgerissene Gebäude ein Ersatzneubau entsteht. Analog zur Methode aus Kapitel 5.6, wird der Rohstoffbedarf für Ersatzneubauten im Untersuchungsraum ermittelt. Der

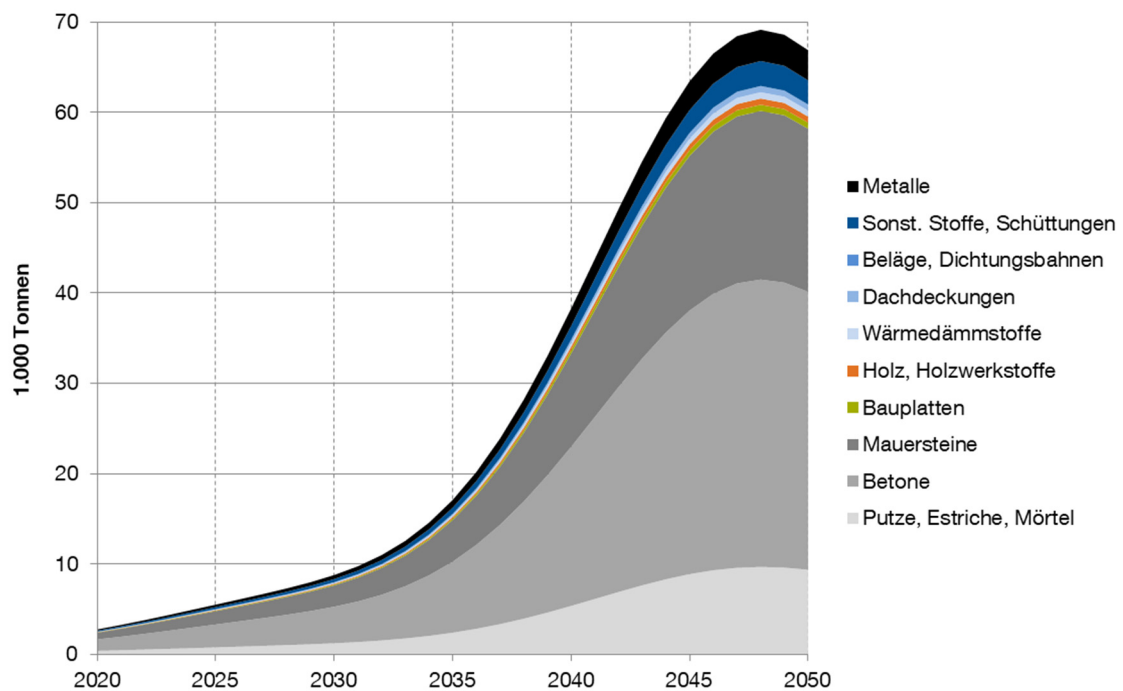


Abbildung 131: Jährlicher Rohstoffbedarf des Ersatzneubaus (MFH) im Bezugsraum

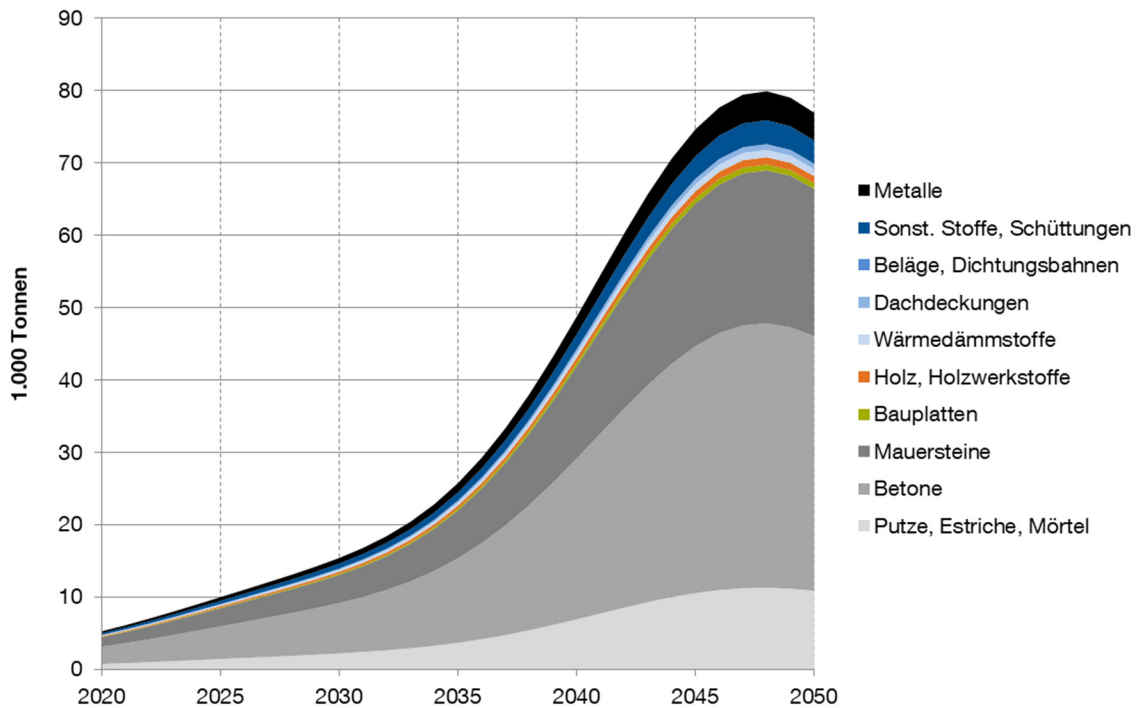


Abbildung 132: Jährlicher Rohstoffbedarf des Ersatzneubaus im Bezugsraum (Gesamt)

Anteil der Bauabfälle wurde bereits abgezogen und wird in 6.4.3 behandelt. Der jährlich ermittelte Rohstoffbedarf des Ersatzneubaus wird nach EFH und MFH unterschieden und in Abbildung 130 bis Abbildung 132 aufgezeigt.

6.4.3 Baustellenabfälle bei Neu- und Ersatzneubauten

Baustellenabfälle sind unvermeidbar und können als Durchfluss im System betrachtet werden. Die Mengen (z. B. Verschnitt) werden anhand der Methode aus Kapitel 5.6.3 ermittelt und sind in Abbildung 133 bis Abbildung 135 dargestellt. Bei einer zukünftigen Veränderung der Quoten (nach Baustoffgruppen) können diese im Modell angepasst werden. Der Anteil an Bauabfällen steigt analog zum steigenden Bedarf. Von 2020 bis 2050 fallen insgesamt 64.000 t Bauabfälle an, davon 3.200 t Metalle.

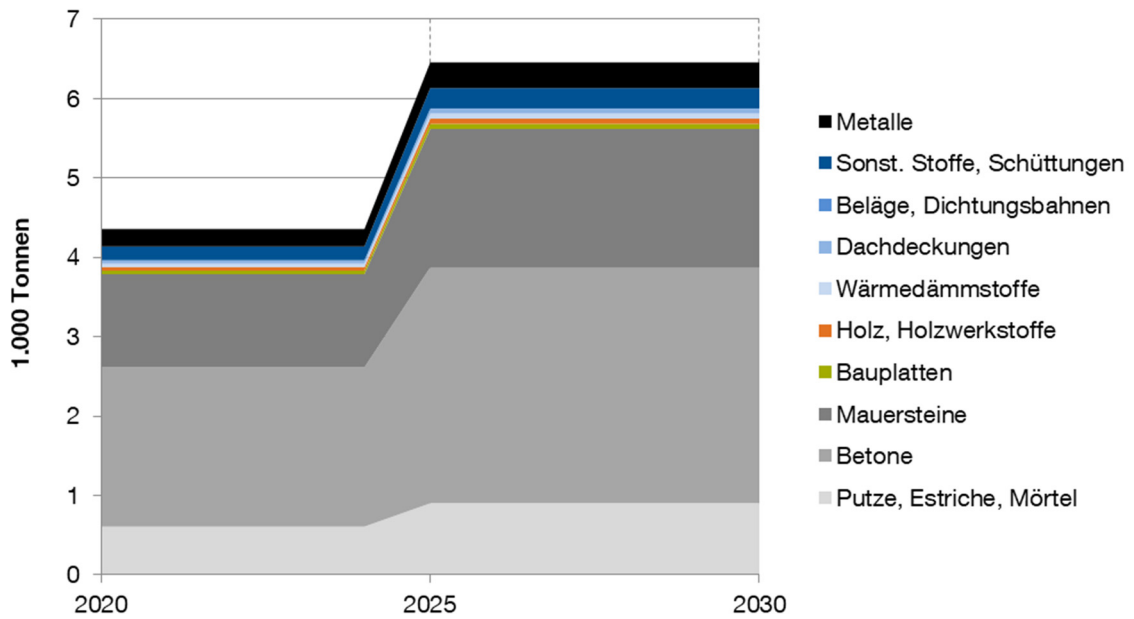


Abbildung 133: Jährliche Baustellenabfälle aus dem Neubau im Bezugsraum

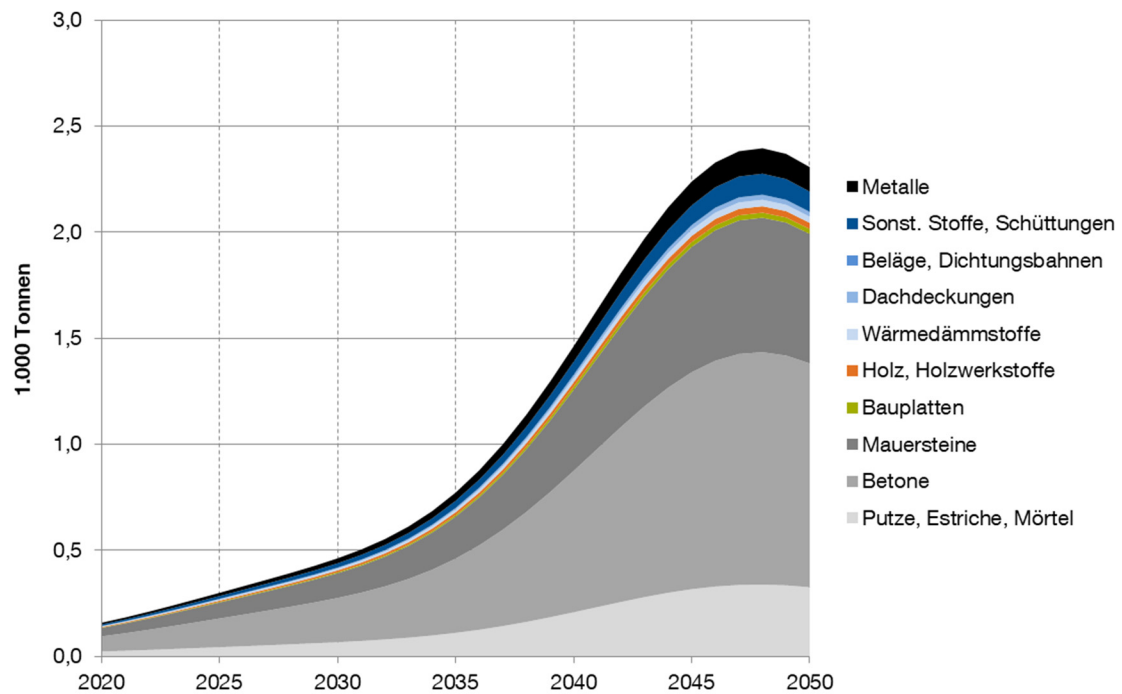


Abbildung 134: Jährliche Baustellenabfälle durch Erstellung von Ersatzneubauten im Bezugsraum

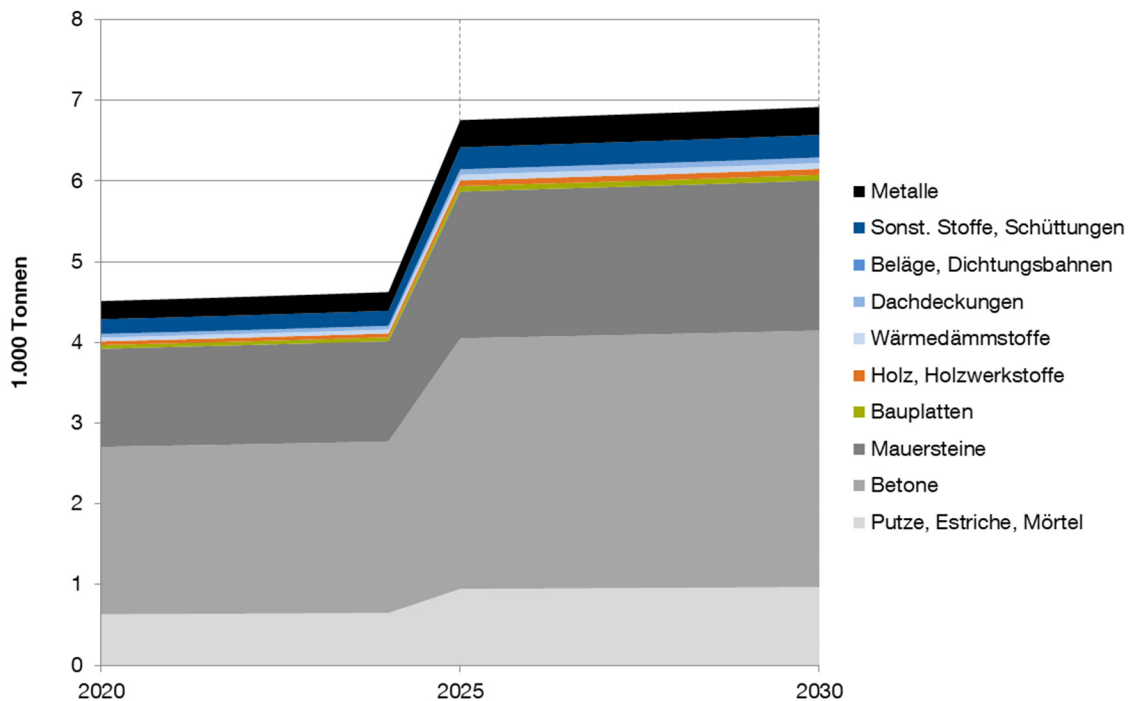


Abbildung 135: Jährliche Baustellenabfälle durch Erstellung von Neu- und Ersatzneubauten im Bezugsraum

6.4.4 Sanierung

Die durch Sanierungsmaßnahmen eingebrachten Stoffe werden in diesem Abschnitt beschrieben. Diese werden Anhand der Methodik aus Kapitel 5.4 ermittelt. Der Gesamtinput durch Sanierung setzt sich aus folgenden Positionen zusammen:

- Sanierung Bestand
- Sanierung Ersatzneubauten
- Sanierung Neubauten

Der Gesamtinput der Sanierung wird in Abbildung 136 dargestellt. Im Zeitraum von 2020 bis 2050 werden rund 342.000 t Baustoffe für diesen Zweck benötigt, davon 107.000 t PEM und 56.000 t Metalle.

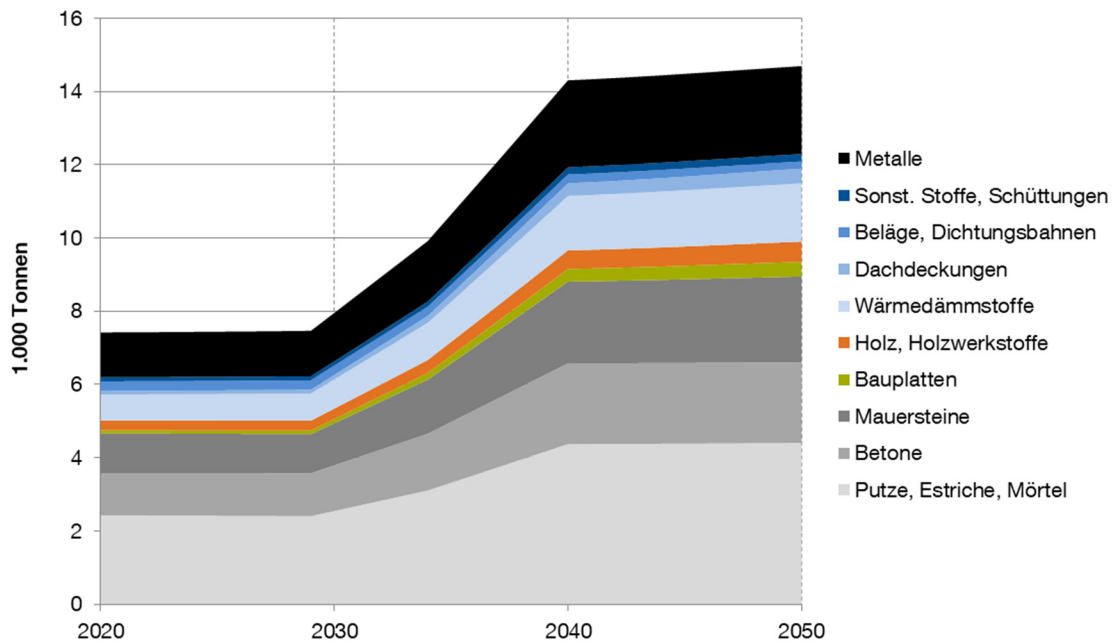


Abbildung 136: Jährlicher Input für Sanierung im Bezugsraum (Gesamt)

Der prozentual größte Anstieg von 2020 bis 2050 ist bei den Bauplatten und der Dachbedeckung zu verzeichnen. Beläge und Dichtungsbahnen sind leicht rückläufig. Tabelle 39 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 39: Zusammenfassung der für die Sanierung benötigten Stoffe im Bezugsraum von 2020 bis 2050

Baustoffgruppe	Bedarf		Verteilung		Anstieg 2020 bis 2050
	2020	2050	2020	2050	
Putze, Estriche, Mörtel	2.433	4.536	33%	30%	86%
Betone	1.153	2.284	16%	15%	98%
Mauersteine	1.086	2.429	15%	16%	124%
Bauplatten	88	404	1%	3%	360%
Holz, Holzwerkstoffe	270	549	4%	4%	103%
Wärmedämmstoffe	705	1.589	9%	11%	125%
Dachdeckungen	100	404	1%	3%	304%
Beläge, Dichtungsbahnen	260	196	3%	1%	-24%
Sonst. Stoffe, Schüttungen	114	203	2%	1%	78%
Metalle	1.220	2.398	16%	16%	97%
Gesamt	7.430	14.993	100%	100%	102%

6.4.5 Gesamtrohstoffbedarf von Wohngebäuden

Der Gesamtrohstoffbedarf von Wohngebäuden (Abbildung 137) im Untersuchungsraum Freiam setzt sich aus folgenden Positionen zusammen:

- Neubau
- Ersatzneubau
- Sanierung
- Bauabfälle

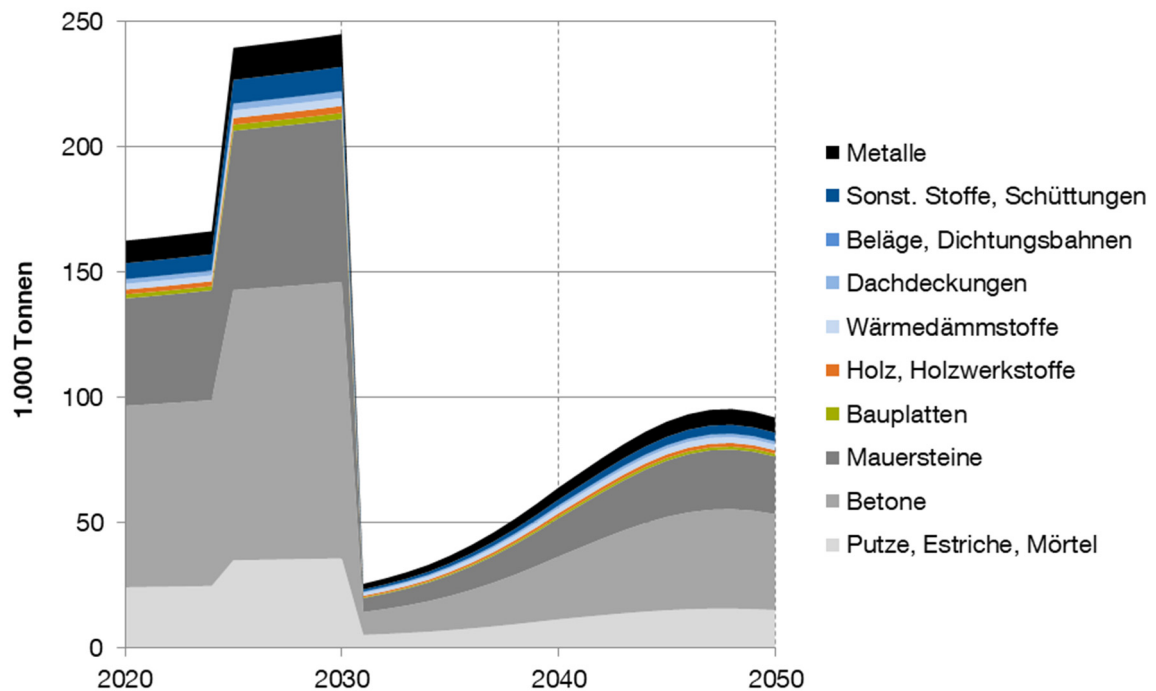


Abbildung 137: Jährlicher Rohstoffbedarf von Wohngebäuden im Bezugsraum (Gesamt)

Wie in Abbildung 137 dargestellt, ist der Gesamtbedarf durch die Neubaumaßnahmen der beiden Realisierungsabschnitte von 2020 bis 2030 geprägt. Nach dessen Fertigstellung ist ein deutlicher Rückgang zu verzeichnen. Insbesondere durch Ersatzneubauten und Bestandssanierung ist der Bedarf ab 2030 weiter ansteigend.

Von 2020 bis 2050 werden rund 3,56 Mio. t Baustoffe benötigt, darunter 250.000 t Metalle. Tabelle 40 zeigt eine Übersicht des Gesamtrohstoffbedarfs für ausgewählte Jahre. Hierbei zeigt sich, dass insbesondere der Anteil an benötigten Metallen und Wärmedämmstoffen ansteigend ist. Der Anteil an Betonen ist hingegen rückläufig.

Tabelle 40: Rohstoffbedarf und Verteilung im Bezugsraum (ausgewählte Jahre)

Baustoffgruppe	Bedarf (t)			Verteilung		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
Putze, Estriche, Mörtel	24.165	35.722	15.114	15%	15%	16%
Betone	72.391	110.276	38.213	45%	45%	42%
Mauersteine	42.834	64.931	22.996	26%	27%	25%
Bauplatten	1.636	2.462	1.094	1,0%	1,0%	1,2%
Holz, Holzwerkstoffe	1.873	2.775	1.419	1,2%	1,1%	1,5%
Wärmedämmstoffe	2.298	3.205	2.225	1,4%	1,3%	2,4%
Beläge, Dichtungsbahnen	1.650	2.473	1.093	1,0%	1,0%	1,2%
Dachdeckungen	260	259	229	0,2%	0,1%	0,2%
Sonst. Stoffe, Schüttungen	6.341	9.682	3.445	3,9%	4,0%	3,7%
Metalle	8.965	13.085	6.048	5,5%	5,3%	6,6%
Gesamt	162.412	244.870	91.877	100%	100%	100%

6.4.6 Infrastruktur - Erschließung durch Gemeindestraßen

Im Untersuchungsgebiet beträgt die Straßenlänge 36,53 km. Dieser Wert wurde anhand von Satellitenbildern ermittelt. Bei einer durchschnittlichen Straßenbreite von 6 m ergibt dies eine Straßenfläche von insgesamt 0,219 km². Durch die Verknüpfung mit spezifischen Stoffkoeffizienten in Straßenbau (Steger et al. 2011, S. 12) kann das Materiallager ermittelt werden (Tabelle 41).

Tabelle 41: Rohstoffbedarf für die Erschließung durch Gemeindestraßen im Bezugsraum

Baustoff	Stoffintensität Bk 1,8* (kg/m ²)	Gebundene Massen GS (t)	Zukünftige Erschließung GS (t)
Gesteinsmehl (Füller)	23,30	5.106	1.258
Edelbrechsand	48,90	10.716	2.641
Edelsplitt	193,70	42.449	10.460
Bituminöse Bindemittel	13,50	2.959	729
Hydraulische Bindemittel	2,30	504	124
Sand	530,30	116.215	28.636
Kies	511,30	112.051	27.610
Schotter	219,20	48.038	11.837
Gesamt	1.542,50	338.039	83.295
Geometrie GS			
Länge (m)		36.525	9.000
Breite (m)		6	6
Fläche (m²)		219.195	54.000

* Bk = Bauklasse (Werte aus Steger et al. 2011)

GS = Gemeindestraßen

Durch die zukünftige Erschließung werden rund 9 km (54.000 m²) zusätzliche Gemeindestrassen benötigt. Dieser Wert wurde durch Abstraktion der Fläche des bestehenden Stadtteils ermittelt. Demnach werden für diesen Zweck rund 83.000 t mineralische Baustoffe benötigt (Tabelle 41).

Demnach können die für die Erschließung der Straßeninfrastruktur benötigten mineralischen Stoffe (Kapitel 6.3) gänzlich aus Stoffen aus Gebäudeabbrüchen innerhalb des Untersuchungsraums gedeckt werden. Das anfallende mineralische Sekundärmaterial übertrifft dabei den benötigten Bedarf um den Faktor 10.

6.5 Ermittlung des Selbstversorgungsgrades (SVG)

Zur Ermittlung des Selbstversorgungsgrades (SVG) wird der jährliche Bedarf (Kapitel 6.4.5) dem jährlichen Angebot (Kapitel 6.3) an potenziell verwertbaren Sekundärrohstoffen anhand ausgewählter Beispiel (Betone und Metalle) gegenübergestellt. Hierbei werden die Systemverluste der Bereitstellung und Aufbereitung berücksichtigt.

6.5.1 Selbstversorgungsgrad (SVG) von RC-Splitt zur Betonproduktion

Durch die Siedlungserweiterung der beiden Realisierungsabschnitte (RA) ist von 2020 bis 2030 ein SVG von RC-Splitt zur Herstellung für Beton von maximal 8 - 10 % möglich (Abbildung 138). Ab 2031 steigt der SVG auf maximal 98 %. Dies setzt voraus, dass die beiden RA fertiggestellt sind und sämtlicher Beton gänzlich aus RC-Splitt hergestellt wird.

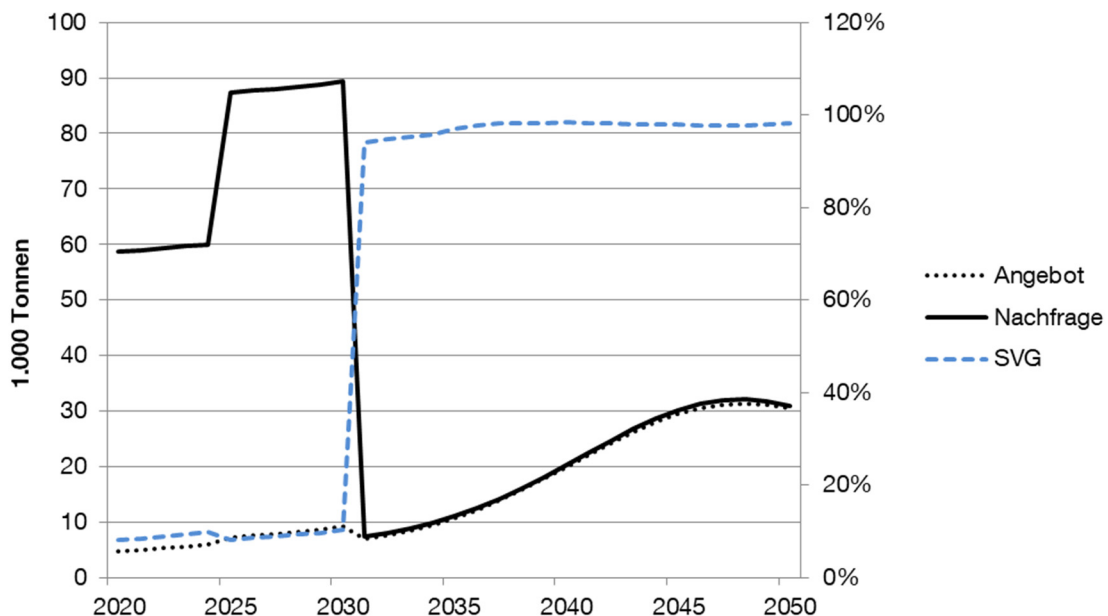


Abbildung 138: Potentieller SVG mit RC-Splitt zur Produktion von RC-Beton im Bezugsraum (Gesamt)

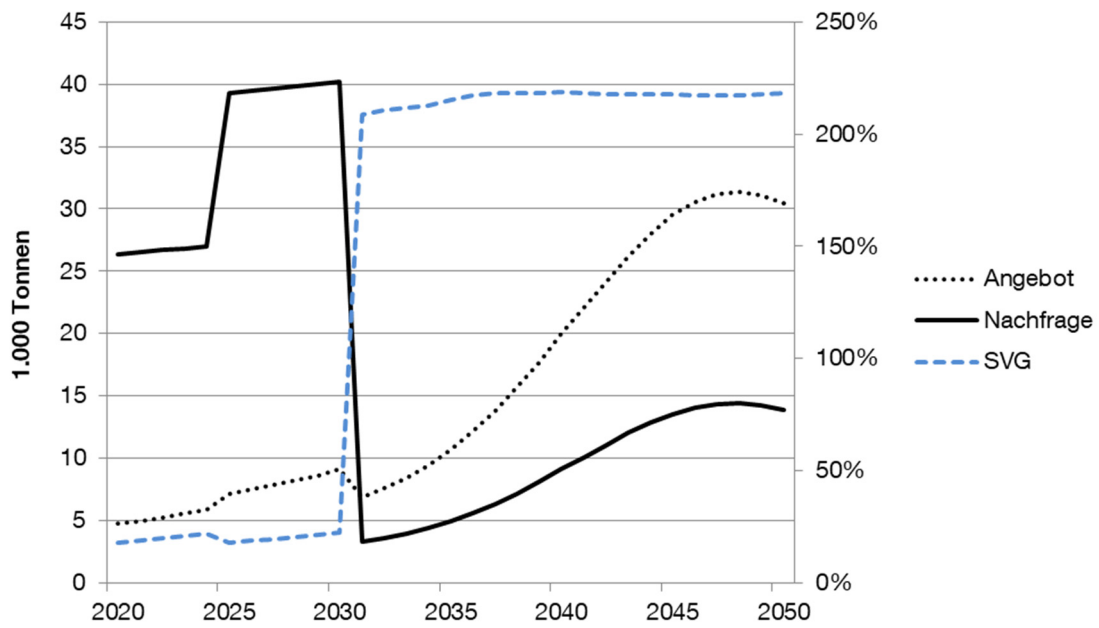


Abbildung 139: Potentieller SVG mit RC-Splitt zur Produktion von RC-Beton (Typ 1) im Bezugsraum

Unter den derzeit zulässigen Mengen an RC-Splitt zur Herstellung von RC-Beton können größere Mengen RC-Beton bereitgestellt werden, da zusätzliches Primärgestein hinzugefügt werden muss (Kapitel 6.3.1). Bei der Produktion von RC-Beton (Typ 1) können zwischen 2020 und 2030 maximal 18 - 23 % Gestein durch RC-Splitt substituiert werden. Ab 2031 steigt der SVG auf 209 % und erreicht ab 2036 ein gleichbleibendes Niveau von rund 218 %. Demnach kann ab 2031 ein Überschuss an

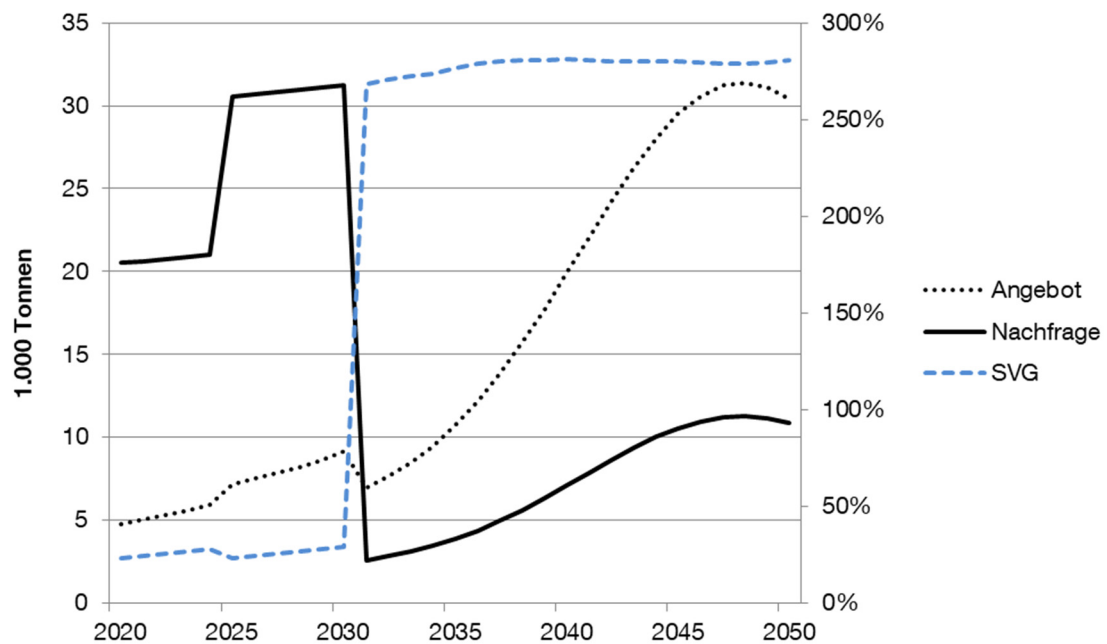


Abbildung 140: Potentieller SVG mit RC-Splitt zur Produktion von RC-Beton (Typ 2) im Bezugsraum

RC-Beton (Typ 1) produziert werden und der Bedarf gänzlich gedeckt werden (Abbildung 139).

Durch die zulässige Zusammensetzung von RC-Beton (Typ 2) kann ein höherer SVG an RC-Splitt erreicht werden. Zwischen 2020 und 2030 erreicht der SVG 23 - 28 %. Ab 2031 steigt der SVG auf über 270 % (Abbildung 140).

Eine stoffliche Autarkie von RC-Splitt für zulässige RC-Betone für den Hochbau ist demnach ab 2030 möglich. Dennoch werden weiterhin Stoffe (z. B. Zement, Primärgestein) von außerhalb der Systemgrenzen benötigt. Die Voraussetzung ist, dass mobile Aufbereitungs- und Produktionsanlagen zur Verfügung stehen. Ebenso werden temporäre Lagerflächen benötigt, um zeitliche Verschiebungen zwischen Rückbau und Neubau auszugleichen.

6.5.2 Selbstversorgungsgrad (SVG) von Metallen

Bei Metallen beträgt der potentielle SVG von 2020 bis 2030 maximal 14 - 17 % (Abbildung 141). Ab 2031 können ca. 87 % des Bedarfs gedeckt werden. Ab 2037 übersteigt das Angebot an Sekundärmetall erstmals die Nachfrage. Ab 2050 beträgt der Überschuss 19 % (SVG = 119 %).

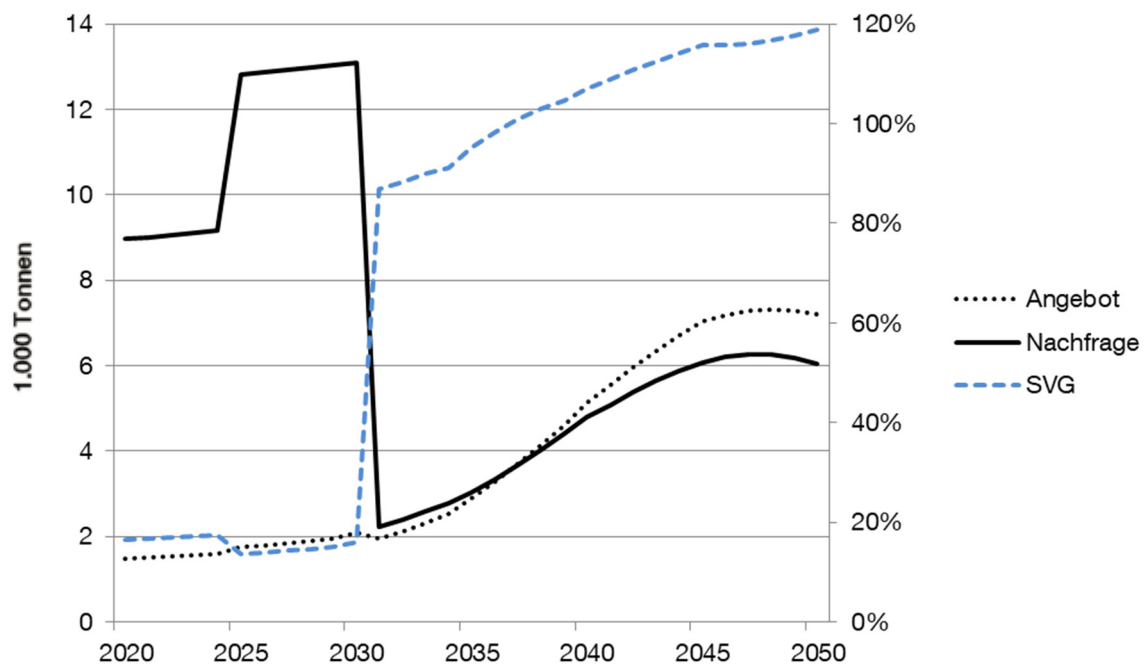


Abbildung 141: Potentieller SVG mit Metallen im Bezugsraum

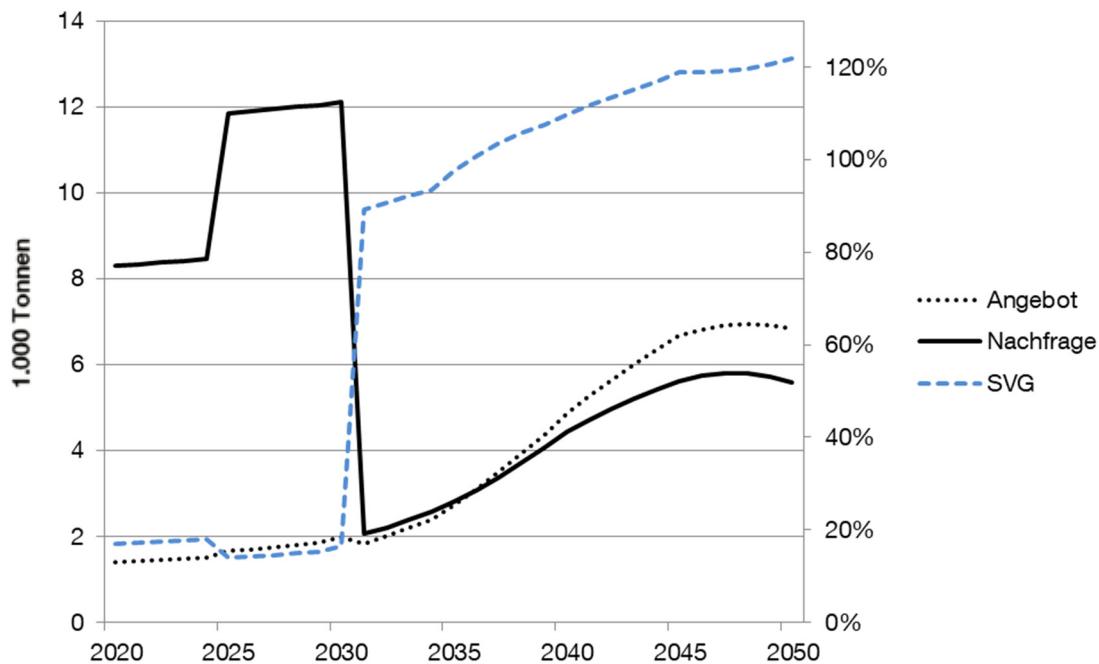


Abbildung 142: Potentieller SVG mit Stahl im Bezugsraum

Bei einer isolierten Betrachtung von Stahl ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der Gruppe der Metalle (Abbildung 142). Hier kann bereits ab 2036 eine autarke Versorgung des Untersuchungsraums sichergestellt werden. Ab 2050 beträgt der Überschuss 22 % (SVG = 122 %).

6.6 Fazit

In Bezug auf die Forschungsfrage kann festgestellt werden, dass nach Fertigstellung der beiden Realisierungsabschnitte eine vollständige Autarkie bei der Bereitstellung von RC-Splitt für die Herstellung von RC-Beton im Untersuchungsraum erreicht werden kann. Durch die derzeit geltenden Standards müssen weiterhin Primärgestein und Zement von außerhalb der Systemgrenzen bereitgestellt werden.

Durch zukünftige Änderung der normativen Anforderungen die eine hundertprozentige Zulassung von RC-Splitt in RC-Beton für den Hochbau erlauben, kann ebenfalls genug RC-Splitt für eine autarke Versorgung bereitgestellt werden. Dies setzt voraus, dass das Wachstum des Stadtteils auf den Bau von Ersatzneubauten beschränkt wird und keine weiteren Realisierungsabschnitte verwirklicht werden.

Bei Stahl kann ab 2036 ebenfalls eine ausgeglichene Massenbilanz erreicht werden. Nach 2036 kann bereits ein Überschuss (Exportpotential) erzielt werden. Dies ist insbesondere mit der steigenden Anzahl an MFH die zurückgebaut werden zu begründen. Da die Produktionsstätten für Metalle außerhalb des Untersuchungsraums liegen, sind jedoch weiterhin Transporte über die Systemgrenzen nötig.

7 Akteure und ihre Handlungsmöglichkeiten unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen

Während des Lebenszyklus eines Bauwerks und der Bewirtschaftung urbaner Räume tritt eine Vielzahl unterschiedlicher Akteure in den jeweiligen Phasen in Erscheinung. Bei der Schließung von Stoffkreisläufen und Erhöhung der Ressourceneffizienz beeinflusst die gesamte Wertschöpfungskette das Endergebnis (z. B. schwaches Glied). Für ein Gelingen sind daher eine interdisziplinäre Herangehensweise und eine Beteiligung aller relevanten Akteure von entscheidender Bedeutung.

Dieses Kapitel behandelt die Einflussmöglichkeiten ausgewählter Akteure unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, um Handlungsempfehlungen im Hinblick auf ein nachhaltiges Stoffstrommanagement und der Schließung von Stoffkreisläufen im urbanen Wohnungsbau abzuleiten. Des Weiteren werden Vorschläge zum benötigten Informationsaustausch zwischen den Beteiligten gemacht.

Die Einordnung der Akteure in einzelne Lebenszyklusphasen stellt sich als schwierig dar. Einzelne Akteure können zu unterschiedlichen Phasen in Erscheinung treten (Busse 2012, S. 58). Durch integrale Planungsprozesse können Abbruchunternehmer beispielsweise auch in der Herstellungsphase von Bauwerken oder Produkten präsent sein, um rückbau- und recyclingfähige Gebäude zu konzipieren. Ebenso kann das rohstoffproduzierende Gewerbe durch ein gesteigertes Interesse an Sekundärrohstoffen in der Rückbau- und Entsorgungsphase auftreten (z. B. Urban Mining). Zukünftig können neue Akteure auftreten (z. B. *Urban Miner*, *Digital Profiler*) oder wegfallen (Lützkendorf und Barthel 2008, S. 18). Eine Übersicht ausgewählter Akteure ist in Abbildung 143 dargestellt.

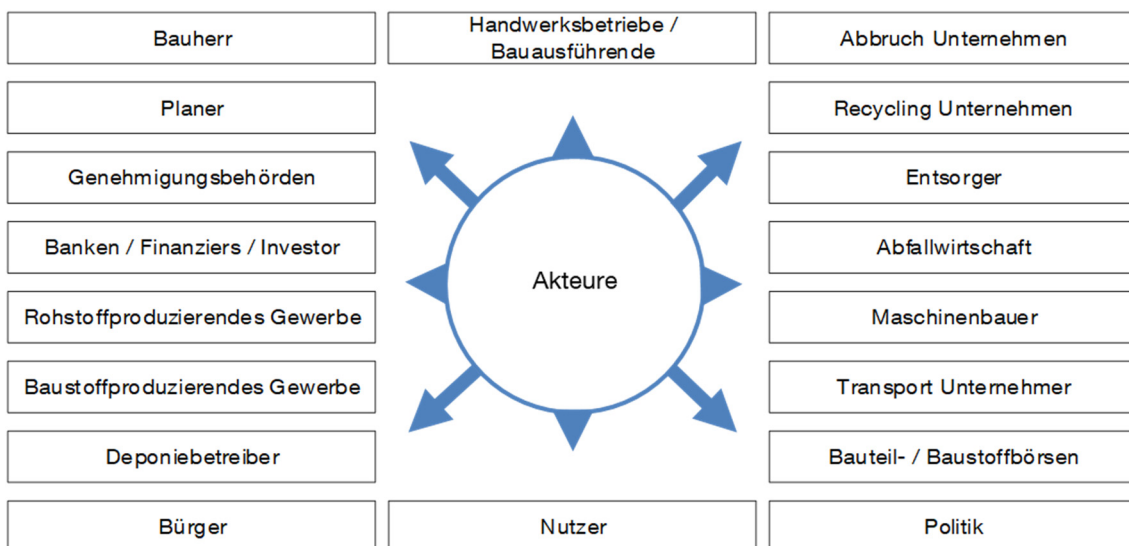


Abbildung 143: Ausgewählte Akteure im Lebenszyklus von Gebäuden und der Bewirtschaftung urbaner Räume

Für akteursübergreifende Strategien für ein langzeitiges Ressourcenmanagement werden im Modell zum Kupferhaushalt der Schweiz drei Steuerungsmöglichkeiten durch die Autoren genannt (Lichtensteiger 2006, S. 49):

1. Erhöhung der Verweildauern
2. Erhöhung der Recyclingraten
3. Verringerung des Ressourcenverbrauchs

Kohler ergänzt diese Strategien mit der Erhöhung der Stoffqualität (z. B. Steigerung der Sortenreinheit) und einer Maximierung von geschlossenen Stoffkreisläufen (Kohler 2015, S. 51). Diese Strategien sind auf das Bauwesen übertragbar und werden Anhand des Einflusses der einzelnen Akteure beschrieben.

7.1 Bauherr

Eine zentrale Figur im Bauprozess ist der Bauherr (z. B. Privatpersonen, Genossenschaften, Baugemeinschaften, Wohnungsbauunternehmen, Institutionen u. a.). Seine Handlungen initiieren den Bauprozess. Da er die Kosten trägt, kann entscheidender Einfluss auf zukünftige Stoffströme genommen werden. Der Bauherr kann entscheiden, welche Baustoffe (z. B. erneuerbar, recycelt, problematisch in der Entsorgung) oder welche Bauweisen (z. B. Holzbau, Massivbau, Modular) zum Einsatz kommen (Generieren von Nachfrage).

Der Bauherr entscheidet über die Funktionalität des Bauwerks sowie über eine spätere Anpassungsfähigkeit und Rückbaubarkeit. Ist ein Bauwerk bereits so konzipiert, dass es sich zu einem späteren Zeitpunkt umnutzen lässt, können neben Kosten auch Baustoffe und Abfälle eingespart werden. Ebenfalls kann durch seinen Einfluss die Trennbarkeit von Bauteilschichten (z. B. Wahl der Verbindungsmöglichkeiten) beeinflusst werden, die maßgebliche Auswirkungen auf eine möglichst sortenreine Sortierung der einzelnen Stoffe (Erhöhung der Qualität) bei einem späteren Rückbau hat.

Durch eine suffiziente Bauweise können beispielsweise geringere Wohnflächen pro Person veranschlagt werden, was den Rohstoffeinsatz weiter reduziert. Dies kann unter anderem durch flexible Grundrisse (z. B. verschiebbare Innenwände und Räume) oder „intelligente Einbauten“ (z. B. verstaubare Betten) umgesetzt werden. Das Ziel muss sein: Maximierung der nutzbaren Flächen mit minimalen Ressourceneinsatz.

Bei der Umnutzung von Gebäuden sind neben den Raumhöhen und -tiefen auch eine nachrüstbare Gebäudetechnik, zusätzliche Erschließungskerne oder präventive Maßnahmen für eine spätere Aufstockung relevant. Im Gebäudezertifizierungssystem der DGNB wird diese Thematik in Steckbrief *TEC 1.4 - Anpassungsfähigkeit der technischen Systeme* und *TEC 1.6 - Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit* berücksichtigt.

Durch seine Position kann der Bauherr die Weichen für zukünftige Stoffströme stellen. Dennoch ist insbesondere für fachfremde Bauherren eine Beratung durch die jeweiligen Planer (z. B. Architekten, Ingenieure u.a.) unabdingbar.

7.2 Planungsbeteiligte

Die Gruppe der Planungsbeteiligten (Architekten, Ingenieure, Fachplaner, Stadtplaner u. a.) muss ein Bauwerk nicht nur Planen und Bauen, sondern hat auch die Verantwortung und Pflicht, den Bauherrn zu beraten. Durch seine Planungsaktivität und Beratung kann bereits in frühen Planungsphasen gezieltes Stoffstrommanagement betrieben werden (z. B. *Design for Recycling*, *Design for Disassembly*, *Design for Adaptability* [nach ISO 20887] u. a.). Mit zunehmendem Fortschritt in den einzelnen Leistungsphasen nimmt der Einfluss ab und die Kosten für nachträgliche Änderungen steigen.

Neben der Wahl der Konstruktionsweise, Vermeidung von schadstoffhaltigen Stoffen und Stoffverbunden, Einsatz von Materialien (z. B. RC-Baustoffe u. Ä.) kann der Planer Einfluss auf zukünftige Instandhaltungs- oder Sanierungsmaßnahmen (z. B. durch Materialwahl) nehmen. Durch seine Entscheidungen kann er direkten Einfluss auf die Lebens- und Nutzungsdauer (z. B. Vermeidung und Minimierung von Baumängeln, konstruktiven Schutz gegen Witterung) und die spätere Recyclingfähigkeit von Bauteilen und Baustoffen nehmen (Siehe Kapitel 5).

Eine Möglichkeit stellt die Verwendung von langlebigen Materialien dar, die im Laufe des Lebenszyklus wenig oder gar nicht ersetzt oder gewartet werden müssen. Die Ökobilanzierung bietet in diesem Fall ein mögliches Entscheidungsinstrument.

Weitere Einflussmöglichkeiten der Planer stellen folgende Maßnahmen dar:

- Reduzierung von Massivbau und Erhöhung von Leichtbauweisen
- Verwendung von kreislauffähigen Materialien und Produkten (z. B. nachwachsende-, schadstoffarme Stoffe)
- Anpassung der Deckenhöhen (optimales Raumvolumen)
- Verwendung von Konstruktionen, die einfach instand zu setzen sind
- Bewahrung von Altbeständen (z. B. Konstruktion, Fassaden)
- Erstellen und Berücksichtigung von Rückbauszenarien (Rückbaukonzept) bereits in der Planungsphase, die einen kontrollierten Rückbau ermöglichen

Neben der Bereitstellung von Bauwerken muss bei der Stadtplanung darauf geachtet werden, dass die entsprechende Infrastruktur (z. B. Recyclinganlagen, Kiesgruben, Deponien u. A.) berücksichtigt und strategisch positioniert wird. Hierbei gilt es, die benötigten Flächen in der Raumplanung auszuweisen.

Eine weitere Maßnahme ist eine ressourceneffiziente Planung von Versorgungsinfrastruktur (z. B. Wasser, Energie, Telekommunikation u. a.). Durch eine vorrausschauende und zukunftsfähige Planung können beispielsweise ausreichend dimensionierte Leerrohre bei Straßenarbeiten verlegt werden, um erneute Eingriffe zu vermeiden.

7.3 Finanziere und Investoren

Ein Großteil der Bauvorhaben benötigt eine Finanzierung von Investoren (z. B. Banken u. A.). Das Hauptinteresse von Investoren ist ökonomischer Natur und liegt innerhalb der Kreditlaufzeit (Busse 2012, S. 117). In den meisten Fällen ist die Kreditlaufzeit kürzer als die Nutzungs- und Lebensdauer eines Bauwerks. Daher hat der Investor

beispielsweise ein begrenztes Interesse an einem späteren Rückbau oder der Wiedergewinnung von Baustoffen.

Im Akteursmodell der Immobilienwirtschaft, das im Rahmen einer Dissertation am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entstanden ist, werden dem Investor die größten Einflussmöglichkeiten bei Entscheidungen eingeräumt. Er hat die Möglichkeiten die Entscheidungen anderer Akteure zu dominieren (Busse 2012, S. 121).

Das Interesse des Investors sollte auf einem langfristigen Werterhalt der Immobilie liegen. Hierbei ist neben den oben genannten Faktoren (z. B. Flexibilität, Umnutzung, Recyclingfähigkeit u. a.) eine möglichst lange Nutzungsdauer (Verweildauer) entscheidend, die einen positiven Einfluss auf ein ressourceneffizientes Stoffstrommanagement hat.

Durch die Bewilligung von Krediten und Bereitstellen von Investitionen besteht die Möglichkeit, Nachhaltigkeitsaspekte (z. B. Einsatz von RC-Baustoffen) bereits bei der Kreditvergabe zu berücksichtigen und vertraglich festzulegen. Dazu können beispielsweise zugeschnittene Kriterienkataloge für die Finanzwirtschaft erstellt oder auf existierende Bewertungssysteme (z. B. DGNB, BNB u. a.) zurückgegriffen werden, die eine ressourceneffiziente Bauweise über den gesamten Gebäudelebenszyklus forcieren.

7.4 Bauausführende Betriebe

Bauausführende Betriebe (z. B. Handwerker, Bauunternehmen u. a.) handeln nach den Vorgaben anderer Akteure (z. B. Bauherr, Planer). Ihnen werden dabei die geringsten Einflussmöglichkeiten bei Entscheidungen eingeräumt (Busse 2012, S. 121).

Wie in Kapitel 5 beschrieben, haben Baumängel an Gebäuden zugenommen (DEKRA 2008, S. 24f). Durch fachmännische Ausführung der Bauleistung können diese weit möglichst reduziert werden, was einen positiven Effekt auf zukünftige Stoffströme hat (Dematerialisierung). Abfälle und der zusätzliche Baustoffbedarf (durch Mängelbeseitigung) können dadurch verringert und die Lebensdauer von Bauteilen und Bauwerken erhöht werden.

Ein weiterer Einfluss liegt in der Generierung von Bauabfällen. Allein aus ökonomischen Gründen sind vermeidbarer Verschnitt und Abfälle zu reduzieren. Hierbei sind auch die Planer gefragt, die beispielsweise durch standardisierte Abstände oder serielle Fertigung Bauabfälle bereits in der Planungsphase reduzieren können.

Des Weiteren ist eine sortenreine Sortierung (nach KrWG und GewAbfV) von Bauabfällen auf der Baustelle für ein effizientes Recycling wesentlich. Neben erhöhten Deponiekosten für unsortierte Fraktionen kann durch Einsparen von Aufbereitungsschritten durch eine vorherige Sortierung (Steigerung der Qualität) die Wirtschaftlichkeit von Sekundärmaterial gesteigert werden.

7.5 Öffentliche Verwaltung

Die Öffentliche Verwaltung (z. B. Planungs- und Genehmigungsbehörden, Ministerien, Kommunen u. a.), hierbei Behörden genannt, sind ausgeübte Tätigkeiten, die weder Gesetzgebung noch Rechtsprechung sind (Krumme 2018, S. 1). Die Behörden sind demnach an bestehende Gesetze und Verordnungen gebunden.

Behörden haben entscheidenden Einfluss auf urbane und regionale Planungswerkzeuge, wie beispielsweise den Flächennutzungsplan, Regionalplan, Bebauungspläne, Stellplatzverordnung, u. a.

Eine Möglichkeit zusätzlichen Wohn- und Arbeitsraum in urbanen Räumen zu schaffen, besteht in der Aufstockung bzw. Verdichtung bestehender Gebäude und Strukturen (z. B. Dachgeschossausbau). Wie in Kapitel 5 dargestellt, ist eine Aufstockung (z. B. Leichtbauweise) rohstoffeffizienter (mehr Raumvolumen [m³] pro Materialeinheit) als beispielsweise ein Neubau. Eine Nachverdichtung kann an behördlichen Auflagen wie z. B. Abstandsflächen oder Höhenbegrenzungen scheitern. Insbesondere in urbanen Räumen, wo freie Flächen oft Mangelware sind, bietet diese Maßnahme ein hohes Potential um Rohstoffe einzusparen. Dabei muss auch auf die Verhältnismäßigkeit geachtet werden, um die Lebensqualität der Bewohner nicht einzuschränken (Fink und Fischer 2012, S. 48).

Ein weiteres Beispiel ist die Garagen- und Stellplatzverordnung (GaStellV). Diese regelt wie viele Parkplätze bei Baumaßnahmen bereitgestellt werden müssen. Parkplätze benötigen neben der Fläche Rohstoffe für die Erstellung (z. B. Tiefgarage, Straßenbau). Abgesehen davon, verursachen die autogerechte Stadt und der Individualverkehr, der auch weiterhin gefördert wird, zusätzliche Herausforderungen (z. B. Emissionen, Lärm, zusätzlicher Erhaltungsbedarf der Infrastruktur) für den urbanen Raum.

Als Beispiel für negative Rückkopplungsschleifen: Kraftfahrzeuge werden immer breiter und länger. Daher fordert der Landesverband öffentlich bestellter und vereidigter sowie qualifizierter Sachverständiger (BVS) und der ADAC, die Mindeststellbreiten von Parkplätzen weiter zu erhöhen (BVS 2011, S. 2f), (Lutz 2012, S. 1). Diese Forderung steht in Gegensatz zur Ressourceneffizienz, da mehr Flächen und Rohstoffe benötigt werden, um die gleiche Anzahl an Fahrzeugen unterzubringen. In diesem Fall ist die Politik gefragt, um diese negativen Rückkopplungsschleifen zu unterbinden.

Des Weiteren wird bei der Ausweisung von Bauflächen durch die LHS München seit 1995 der *Ökologische Kriterien Katalog* genutzt, der Vorschläge und Vorgaben zum nachhaltigen Bauen beim Verkauf von städtischen Flächen macht. Eines seiner Ziele ist ein sparsamer Umgang mit Rohstoffen (Kriterium 2). Es wird beispielsweise empfohlen, nur Materialien mit geringem Energieaufwand und Schadstoffemission einzusetzen, die umweltschonend unterhalten, wiederverwendet oder beseitigt werden können (LHM 2017, S. 2). RC-Baustoffe aus lokalen Vorkommen können diese Vorgaben erfüllen und es wird daher vorgeschlagen, eine Recyclingquote (z. B. Beton) in den Kriterienkatalog mitaufzunehmen, um eine zusätzliche Nachfrage zu generieren.

Zusätzlich sollten die Kriterien in Bezug auf den Erhalt von bestehender Bausubstanz, trennbaren Konstruktionen und zukünftige Umnutzung (analog zu den Kriterien des DGNB Systems oder gleichwertigen Bewertungssystemen [z. B. BNK]) erweitert

werden, um eine möglichst hohe Verwertungsrate und Verweildauer von Bauteilen und -stoffen zu gewährleisten.

Laut § 45 des KrWG ist die öffentliche Verwaltung durch ihr Handeln verpflichtet, die Schonung natürlicher Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen (§ 1 KrWG). Dabei gilt es beispielsweise bei der öffentlichen Beschaffung bei Bauvorhaben zu prüfen, ob und in welchem Umfang Erzeugnisse eingesetzt werden können die,

- langlebig, reparaturfreundlich, wiederverwendbar/verwertbar/recyclebar,
- schadstoffarm oder
- durch Aufbereitung aus Abfällen hergestellt sind.

Das Ziel sollte sein, bereits bei der Erteilung von Baugenehmigungen (private und öffentliche Vorhaben) auf Kriterien für kreislauffähige Gebäude zu achten und diese vertraglich zu verankern.

7.6 Gesetzgeber

Um gezieltes Stoffstrommanagement zu betreiben, gilt es eine Reihe an Rechtsnormen zu beachten, die auf lokaler-, nationaler- und EU-Ebene bestehen. Der rechtliche Rahmen wird dabei durch folgende Verordnungen und Gesetze bestimmt:

- Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)
- Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV)
- Mantelverordnung (MantelV)
- Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV)
- Deponieverordnung (DepV)
- Bayerische Bauordnung (BayBO)
- Produktverantwortung
- Circular Economy Package
- EU Waste Directive
- u. a. m.

Subventionen und Besteuerung sind für diesen Rahmen zusätzliche Steuerungsmöglichkeiten der Politik. Eine Untersuchung aller relevanten Faktoren würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen, weshalb lediglich eine Beschreibung ausgewählter Beispiele erfolgt.

Im Rahmen des BAMB Projekts wurden ausgewählte Gesetze und Verordnungen, die eine zirkuläre Ökonomie im Bauwesen beeinflussen in unterschiedlichen EU-Ländern untersucht. Hierbei zeigte sich, dass eine Umsetzung der zirkulären Ökonomie durch Inkompatibilität von Verordnungen auf unterschiedlichen Ebenen (z. B. Länder, Marktsegmente u. a.) und uneinheitlichen Definitionen scheitern könnte. Hierbei wird empfohlen, den Einfluss und die Abhängigkeiten von derzeitigen und zukünftigen Verordnungen anhand von Akteursanalysen und Folgenabschätzungen zu untersuchen (Henrotay et al. 2017, S. 230).

7.6.1 Beispiel 1 – Mantelverordnung

In Deutschland wird der Versuch unternommen, mit der seit 2004 viel diskutierten Mantelverordnung (MantelV) eine bundesweite und rechtsverbindliche Grundlage für die Verwertung von mineralischen Abfällen zu schaffen, da die derzeitigen Regelwerke nicht mehr dem gegenwärtigen Stand der Technik gerecht werden (BMUB 2017, S. 1).

In einem Planspiel wurden 2017 die Auswirkungen der Verordnung hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit (z. B. Veränderung von Stoffströmen und Kosten) überprüft (Bleher et al. 2017). Hierbei wurden insbesondere die zu hohen Grenzwerte, Vernachlässigung des Ressourcenschutzes, der bürokratische Aufwand und die Praxisferne bemängelt. Folgende ausgewählte Auswirkungen können laut unabhängigen Untersuchungen (Görisch 2016, S. 3) durch die Einführung der Mantelverordnung auftreten:

- Absenkung der Recyclingquoten (durch Erhöhung der Grenzwerte)
- Zunahme von Deponierung
- Zunahme des Rohstoffabbaus
- Steigerung der Entsorgungs- und Baukosten
- Zunahme der Transporte (Reduzierung von ortsnaher Verwertung)
- Zunahme von illegaler Entsorgung

Durch diese und andere Kontroversen wird eine gesetzliche Umsetzung noch andauern. Dennoch ist eine bundesweit einheitliche und rechtsichere Regelung nötig, um eine Planungssicherheit für alle beteiligten Akteure zu liefern.

7.6.2 Beispiel 2 – Gewerbeabfallverordnung

In der neuen Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) von 2017 wurde die Getrennthaltungspflicht von gewerblichen Abfallstoffen (nach 10 Abfallarten) weiter verschärft (BDE, S. 6). Stofffraktionen sind bereits beim Abfallerzeuger (z. B. Baustelle), soweit technisch und wirtschaftlich zumutbar, getrennt zu sammeln (§ 3, § 8 GewAbfV). Des Weiteren ist es verpflichtend, gemischte Abfälle einer Vorbehandlung zu unterziehen (§ 4 GewAbfV) und zu dokumentieren (§ 5, § 8).

Durch die Verschärfung der Getrennthaltungspflicht können die Recyclingquoten weiter gesteigert (z. B. Erhöhung der Qualität) und Systemverluste weiter reduziert werden.

7.6.3 Beispiel 3 – Besteuerung

Laut Kai Schlegelmilch, Ökonom am Wuppertal Institut, entfaltet die Einführung einer Primärbaustoffsteuer (PBS) für nicht-erneuerbare Rohstoffe insbesondere im Bauwesen eine große Wirkung. Durch einen langsamen und kontinuierlichen Anstieg der Steuer kann das Kosten-Nutzen Kalkül in die richtige Richtung gelenkt werden (Schlegelmilch 2017, S. 8f). Durch eine Besteuerung kann demnach die Nachfrage nach Sekundärrohstoffen gesteigert werden, was gleichzeitig zu einer Erhöhung der Recyclingraten führen würde.

In einer Untersuchung des Wuppertal Instituts wurde für die Einführung einer Baustoffbesteuerung plädiert und Umsetzungsstrategien wurden aufgezeigt, um die Ressourceneffizienz weiter zu erhöhen. Dabei wurden die Strategien einer

Rechtsförmlichkeitsprüfung und Folgenabschätzung unterzogen. Hierbei zeigte sich, dass eine Primärbaustoffsteuer machbar und vorteilhaft ist. Dies wäre ein wichtiger Schritt in Richtung Verlagerung von arbeitsbezogenen Steuern (Steuerabgaben auf Arbeit) auf Rohstoffe (Bahn-Walkowiak et al. 2010, S. 43, 47).

Neben einer neu eingeführten Steuer könnte beispielsweise der Mehrwertsteuersatz (MwSt) für Sekundärrohstoffe reduziert werden (z. B. 7 %). Hierbei müssten die Auswirkungen hinsichtlich der Praxistauglichkeit (z. B. Nachweisführung) und juristischer Hürden überprüft werden. In China wurde dies bereits umgesetzt indem die MwSt für Produkte aus Sekundärrohstoffen um 50-100 % gesenkt wurden, um die Nachfrage zu stimulieren (Ellen MacArthur Foundation 2015, S. 33).

7.6.4 Beispiel 4 – Subventionen

In 2017 stellte der Bund rund € 25 Mrd. Subventionsvolumen (z. B. Finanzhilfen, Steuervergünstigungen) bereit. Zweitgrößter Finanzmittelpfänger ist die Steinkohle- und die Stahlindustrie (€ 1 Mrd.) (BMF 2017, S. 14, 18).

Durch gezielte Subventionen oder Steuervergünstigungen kann der Einsatz von Sekundärrohstoffen weiter gesteigert werden. Dadurch können beispielsweise Recyclingunternehmen (siehe 7.11) in neue Technologien investieren, was auch den Maschinenherstellern zugutekommen würde (z. B. Förderung innovativer Recyclingtechnologien). Des Weiteren würde eine gezielte Förderung von Bauteilbörsen (siehe 7.14) dazu führen, dass diese wirtschaftlicher arbeiten können und der Anteil an wiederverwendbaren Bauteilen steigt.

7.6.5 Beispiel 5 – Einführung Gebäudestoffpass

Analog zum verpflichtenden Energieausweis stellt die Einführung eines materiellen Gebäudepasses eine weitere Möglichkeit zur Förderung der zirkulären Ökonomie dar (Kohler et al. 1999, S. 241). Dadurch ist die materielle Zusammensetzung der Gebäude dokumentiert und Verwertungsstrategien (z. B. Rückbaukonzept) und Stoffströme können bereits vor einem Rückbau ermittelt werden.

Bei Neubauten ergibt sich dabei bei der Erhebung durch standardisierte Verfahren nur geringer Aufwand. Bei Bestandsgebäuden hingegen wären zusätzliche Erhebungsschritte notwendig. Hierbei kann auf bestehende Arbeiten der TU Wien (Markova und Rechberger 2011), der TU München (Ott und Hausmann 2015), oder auf EU-Ebene im Rahmen des BAMB Projekts (Mulhall et al. 2017) zurückgegriffen werden.

7.6.6 Weitere Beispiele

- Um in Seattle (USA) eine Abbruchgenehmigung zu bekommen, muss im Vorfeld nachgewiesen werden, dass mindestens 20 % der Materialien wiederverwendet und 100 % des Betons und Mauerwerks recycelt werden (City of Seattle 2018, S. 1). Ähnliche Vorgaben gelten in der Stadt Vancouver (Canada) für Gebäude vor 1940 (City of Vancouver 2018, S. 1).
- In einem bundesweit angelegten Programm in den Niederlanden wird das Ziel verfolgt, bis 2050 eine zirkuläre Ökonomie zu entwickeln. Bis 2050 sollen nur noch

Primärrohstoffe verwendet werden, die schadstofffrei abgebaut werden können (Government of the Netherlands 2016, S. 5)

7.7 Primärrohstoffproduzierendes Gewerbe

Während die Genehmigungsverfahren für Minen (z. B. Kiesgruben) zunehmend langwierige Prozesse darstellen ist beobachtbar, dass die in Mienen vorhandenen Stoffkonzentrationen geringer werden. Dies hat einen erhöhten Rohstoffabbau bei geringer werdender Ausbeute zur Folge. Die zunehmende Flächenkonkurrenz zwischen Natur, bebautem Raum und Rohstoffabbau stellt eine weitere Herausforderung dar (siehe Kapitel 2.2.1).

Neben den wirtschaftlichen Interessen des rohstoffproduzierenden Gewerbes sollte das Interesse nicht auf kurzfristiger Gewinnmaximierung liegen, sondern im möglichst langen Erhalt der Rohstoffquelle. Eine langfristig sichere Rohstoffversorgung muss gewährleistet sein (Heitzer 2012, S. 41).

Darüber hinaus werden geringer aggregierte Informationen (z. B. abgebaute Massen, vorhandene Reserven) zur Rohstoffproduktion auf Landkreis- bzw. Gemeindeebene benötigt. Im Idealfall würden diese Daten auf Ebene des Produktionsstandorts erhoben und ausgewiesen (siehe auch 4.1). Dies würde helfen, Angebot und Nachfrage an Rohstoffen im urbanen Raum besser zu koordinieren und kumulierte Transportdistanzen zu ermitteln.

7.8 Baustoff- und Produkthersteller

Die Hauptinteressen der Industrie basieren auf Wirtschaftlichkeit, Einhaltung der Gewährleistung und Absicherung vor Regressansprüchen. Ein weiteres Ziel sollte sein, den Einsatz qualitativ hochwertiger, schadstoffarmer, kreislauffähiger und langlebiger Stoffe zu erhöhen (z. B. Produktverantwortung, Herstellerverantwortung).

Die Herstellung von ressourceneffizienten Stoffen sollte im der Unternehmenskultur verankert sein (z. B. Corporate Social Responsibility [CSR]) und als selbstverständlich angesehen werden. Die Optimierung von Produktionsprozessen ist mittlerweile Stand der Technik, da ein wirtschaftliches Interesse vorhanden ist (z. B. Ausschussreduzierung, maximale Ressourcenausbeute).

Durch die Einführung von Leasingmodellen, Rücknahme- oder Pfandsystemen (Produkt als Serviceleistung), Recyclinglogistiksystemen, etc. kann die Qualität der verwendeten Stoffe gesteigert werden, da der Produzent als Eigentümer ein bestehendes Interesse an einer langen Haltbarkeit und einer reduzierten Instandhaltung hat.

Durch das Eigentumsverhältnis hat der Hersteller nach Ablauf des Leasingzeitraums einen Anreiz, das Produkt möglichst hochwertig zu verwerten (z. B. stoffliches Recycling, Remanufacturing, Aufbereitung, erneute Verwendung im Produktionsprozess u. a. m.). Hierbei stellt sich die Frage, ob ein Unternehmen, das auf Dauer minderwertige und kurzlebige Produkte liefert, am Markt zukünftig Bestand hat.

Beispiele für die oben beschriebenen Modelle sind:

- Rewindo (Fenster und Profile)
- Armstrong Ceiling Solutions (Deckenpaneele)
- DESSO (Teppich)
- Deceuninck Belgium (PVC Profile)
- Philips (Leasing Beleuchtung)
- Gyproc Saint-Gobain (Gipskarton)
- Interface USA (Modulare Teppich Fliesen)

Im Rahmen des BAMB Projekts werden Geschäftsmodelle für kreislauffähige Materialien, Produkte und Gebäude analysiert und entwickelt (Peters et al. 2017, S. 13). Des Weiteren wird im Forschungsfeld der *Industrial Ecology* auf diese Thematik eingegangen (z. B. Etablierung von *Closed-Loop Supply Chains* durch Ferguson und Souza 2010).

Darüber hinaus herrscht derzeit ein Informationsdefizit (z. B. niedrige Transparenz, Verfügbarkeit von Daten) für kreislauffähige Produkte von Seiten der Hersteller (Peters et al. 2017, S. 46). Im BAMB Projekt werden daher Materialausweise von Baustoffen- und Produkten entwickelt, um dieses Defizit zu umgehen und eine einheitliche Datenbasis zu schaffen (siehe 7.15) (Mulhall et al. 2017).

Ein positiver Beitrag zur Ressourceneffizienz ist, dass Hersteller die Kreislauffähigkeit ihrer Produkte optimieren, neue Geschäftsmodelle entwickeln und bereits erprobte anwenden, sowie relevante Informationen für die am baubeteiligten Akteure zur Verfügung stellen.

7.9 Transportunternehmer

Transporte sind für die Wertschöpfungskette unumgänglich. Unternehmen können durch Erhöhung der Nachfrage, Transporte auf die Bahn verlagern (z. B. strategische Positionierung von Ladepunkten, direkte Verladung von Mulden auf Güterwaggons etc.).

Durch ihre Monopolstellung kann die Deutsche Bahn (DB) dafür sorgen, dass im Einklang mit der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung ein erhöhter Anteil der Transportleistung auf die Schiene verlagert wird. Dem wirkt entgegen, dass die Bahn in den letzten Jahren einen Teil der bisher genutzten Ladepunkte geschlossen hat. Beispielsweise liefert ein Unternehmen für Gleisschotter, das der Rationalisierung von Ladepunkten zum Opfer fiel, den Schotter nun per LKW aus (Abmayr 2016).

7.10 Abbruchunternehmen

Mit der Art der Abbruchweise kann gezieltes Stoffstrommanagement betrieben werden. Durch einen selektiven Rückbau, der derzeit nicht Stand der Technik ist, werden Materialien bereits vor einem Abbruch hochgradig sortenrein (gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz [KrWG] und Gewerbeabfallverordnung [GewAbfV]) ausgebaut und erfasst. Diese Methode erfordert einen entsprechend hohen Zeit- und Kostenaufwand (Schröder 2015, S. 243). Durch die verhältnismäßig sortenreinen Fraktionen können beispielsweise im Vergleich zu gemischten Fraktionen Kosten bei

der Entsorgung eingespart und die Qualität der ausgebauten Stoffe erhöht werden (siehe 2.2.4.1). Durch diese Qualitätssteigerung können Recyclingraten weiter gesteigert und Verlustraten weiter reduziert werden.

Für einen selektiven Rückbau müssen Abbruchunternehmen die benötigte Technologie (z. B. Werkzeuge) bereitstellen und das Personal dementsprechend geschult werden. Neben einer Schadstoffbegehung müssen die verbauten Materialien ermittelt und ein Rückbaukonzept erstellt werden. Durch Instrumente, wie einen stofflichen Gebäudepass, können diese oft aufwendigen und kostenintensiven Schritte entfallen, bzw. der Aufwand reduziert werden.

Des Weiteren wird eine systematische Auswertung von Entsorgungsnachweisen (inklusive Lieferscheinen, Wiegeprotokollen u. a.) für Abbruchmaßnahmen auf Gebäudeebene empfohlen. Dies ist beispielsweise notwendig, um die Datenbasis bezüglich Schadstoffanteilen, Entsorgungswegen und erfassbaren Massen (z. B. $\text{kg}/\text{m}^3_{\text{BRI}}$) zu ermitteln. Die Gewerbeabfallverordnung verpflichtet bereits heute zur Dokumentation (§ 8 Abs. 3 GewAbfV) - eine gezielte Auswertung der Daten findet jedoch nicht statt.

Darüber hinaus gilt es neue Rückbauprozesse zu entwickeln (z. B. Verbundbaustoffe). Insbesondere sind wirtschaftliche Demontagetechniken für Estriche und Putze derzeit nicht vorhanden (IRR 2017, S. 3).

7.11 Recyclingunternehmen

Für eine Erhöhung der Recyclingraten muss ein Markt für RC-Baustoffe etabliert werden. Baustoffrecycling ist nur dann zukunftssträftig, wenn ein Markt dafür besteht (Lichtensteiger 2006, S. 57).

Eine Investition in Baustoffrecyclinganlagen ist oft langfristig ausgelegt. Die Unternehmen sind dabei angewiesen, ihre Anlagen möglichst auszulasten und benötigen daher die entsprechenden zu recycelnden Massen. Die Erhöhung der Nachfrage nach RC-Stoffen liegt außerhalb des Einflusses der Unternehmen. Eine Steigerung wird jedoch dazu führen, dass Anlagenbetreiber in neue Aufbereitungstechnologien investieren (Amortisationszeiten).

Ein Großteil der derzeit in Betrieb befindlichen stationären Recyclinganlagen wurde in den 1980er Jahren errichtet. Durch eine gezielte Förderung (z. B. Subventionen) kann die Einführung neuer Technologien (z. B. sensorgestützte Verfahren) beschleunigt werden, um sortenreinere Recyclingfraktionen herzustellen und Verlustraten weiter zu reduzieren (IRR 2017, S. 5).

Eine einheitliche Güteüberwachung und Qualitätssicherung von RC-Stoffen (z. B. unabhängige Zertifizierung durch Baustoff Recycling Bayern e.V. [RC-Leitfaden], CE-Kennzeichnung) ist durch die Unternehmen zu forcieren. Durch das Zertifikat wird die Einhaltung aller relevanten bau- und umweltechnischen Regelungen bescheinigt, um eine qualitativ hochwertige Materialqualität sicherzustellen und Rechtssicherheit für die beteiligten Akteure zu schaffen (Baustoff Recycling Bayern 2013, S. 1).

Bei der Verwendung von Recyclingbaustoffen herrschen oft starke Vorbehalte (z. B. minderwertige Qualität), die ein Hindernis in der Erhöhung der Nachfrage stellen. Eine

qualitätsgeprüfte Güteüberwachung kann dem entgegenwirken, dennoch scheuen viele Bauschuttzubereiter den zusätzlichen Aufwand (EU-Recycling 2014, S. 6ff).

Laut Stefan Schmidmeyer (Geschäftsführer Baustoff Recycling Bayern e.V.) ist in der Güteüberwachung eine Schulung des Personals unabdingbar, da die bau- und umwelttechnischen Anforderungen an RC-Produkte zukünftig weiter zunehmen werden (EU-Recycling 2014, S. 9).

Des Weiteren werden geringer aggregierte Informationen (z. B. aufbereitete Massen, vorhandene Produktionskapazitäten) zum Recycling auf Landkreis- bzw. Gemeindeebene benötigt, idealerweise auf Ebene des einzelnen Produktionsstandorts (siehe auch 4.4.1). Dies würde helfen, Angebot und Nachfrage an Rohstoffen im urbanen Raum besser zu koordinieren und kumulierte Transportdistanzen zu ermitteln.

In der Statistik müssen Recyclingquoten ausgewiesen werden, die der Realität entsprechen. Die Erfassung der derzeitigen Recyclingquoten bezieht sich auf Abfälle, die in eine Aufbereitungsanlage gebracht werden, nicht auf das Ausgangsmaterial (Output der Anlage) (Buddemeier und Rheinbay 2017, S. 2). Demnach findet eine statistische Verzerrung statt, da Systemverluste nicht berücksichtigt werden.

Darüber hinaus ist eine strategische Ausrichtung und Positionierung von Recyclinganlagen (z. B. Netzwerken, Verbund) anzustoßen, um Transportdistanzen möglichst gering zu halten.

7.12 Entsorger, Deponien und Abfallwirtschaft

Da noch eine unbekannt Menge an schadstoffhaltigen Stoffen in unseren Gebäuden verbaut ist, werden Deponien auch weiterhin benötigt. Die Annahmehöhen und Deponiekosten haben dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Verwertungswege. Bei einem zu niedrigen Preis steigt die Wahrscheinlichkeit, dass mehr Stoffe deponiert werden. Im Gegenzug führen hohe Deponiekosten zu mehr Recycling und alternativer Verwertung. Auch regionale Preisunterschiede können dazu führen, dass – so ein wirtschaftlicher Vorteil gegeben ist – Stoffe über weitere Distanzen transportiert werden.

Analog zu den Primärrohstoffherstellern und Recyclingunternehmen sind die Erfassung von standortspezifischen Daten (z. B. deponierte Massen nach Stoffgruppen, vorhandene Kapazitäten) voranzutreiben. Durch die Verschärfung der Gewerbeabfallverordnung sind Entsorgungsnachweise bereits heute verpflichtend. Dennoch werden diese aus unterschiedlichen Gründen (z. B. Datenschutz) lediglich in aggregierter Form (z. B. Oberbayern) ausgewiesen (siehe auch 4.4.2).

7.13 Maschinenbauer

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Sortier- und Aufbereitungsanlagen, sowie Technologien, die ein ressourceneffizientes Stoffstrommanagement beeinflussen können (z. B. Einfluss auf Produktqualität, Verlustraten). Laufend kommen neue Entwicklungen und Methoden auf den Markt. Die im Zwei-Jahres Rhythmus stattfindende IFAT Messe für Recyclingtechnologien in München zeigt Lösungen für unzählige Anwendungen.

„Sag mir was ich sortieren soll und wir finden eine Lösung“ ist eine oft gehörte Aussage von Herstellern. Laut Günter Lohmann ehemaliger *Geschäftsführer der Deutschen Gesellschaft für Abfallwirtschaft (DGAW)* regelt der Markt die Entwicklung von Aufbereitungstechnologien (Gespräch von 02.06.2016 - IFAT München). Sollte ein Stoff oder Stoffgemisch in ausreichenden Mengen anfallen, werden Lösungen zur Aufbereitung entwickelt. Dies rechtfertigt jedoch nicht, weiterhin schwer- oder untrennbare Konstruktionen im Bauwesen einzusetzen.

Auch die Technologie stößt an ihre Grenzen. Durch zusätzliche Aufbereitungsschritte steigen der Aufwand einer sortenreinen Rückgewinnung und damit auch die Kosten, was die Wettbewerbsfähigkeit des produzierten RC-Baustoffs beeinträchtigt. Des Weiteren ist das gezielte Aussortieren von Schadstoffen aus Bauschuttfraktionen derzeit nicht möglich. Hierfür müssen entsprechende Technologien entwickelt werden.

Zudem muss zukünftig auch die Zerkleinerungstechnik (z. B. Brecher) an das Ausgangsmaterial (z. B. Mauerwerk, Beton) angepasst und der Feinkornanteil (< 2 mm) weiter reduziert werden (Müller 2016, S. 42).

7.14 Bauteilbörsen

Eine gezielte Entnahme von Bauteilen vor einem Gebäudeabbruch findet in der Regel nicht statt. In der Recyclingwirtschaft steht nach wie vor die stoffliche Verwertung im Vordergrund. Die Möglichkeiten von hochwertigeren Verwertungswegen werden hingegen noch nicht ausgeschöpft (Dechantsreiter 2016, S. 13), (Dechantsreiter et al. 2015, S. 5).

Neben stofflichen Recyclingmethoden stellt die Weiterentwicklung und Förderung von Bauteilbörsen ein mögliches Instrument zur Förderung der Kreislaufwirtschaft dar. Bauteile, die aus Bauwerken ausgebaut und nochmals verwendet werden können, werden zu Bauteilbörsen transportiert, aufbereitet und zwischengelagert bis ein Käufer gefunden wird.

Zusätzlich zu einer oft aufwendigen händischen Aufbereitung erfordert dies ein etabliertes Netzwerk und entsprechende Lagerflächen, die auch überdacht sein sollten, um Bauteile und -stoffe vor der Witterung zu schützen. Dies ist mit zusätzlichen Kosten verbunden, was Bauteilbörsen oft unwirtschaftlich macht. Flächen zur langwierigen Zwischenlagerung sind kostenintensiv und nicht immer vorhanden. Durch Zwischenlagerungsprozesse werden zusätzliche Bearbeitungsschritte benötigt (z. B. erneutes Auf- und Abladen, Transporte), die weitere Kosten verursachen.

Des Weiteren müssen Bauteilbörsen in Vorleistung gehen (z. B. Ausbau, Eignungsprüfung, Lagerung, Aufbereitung, Transporte etc.), um wiederverwendbare Bauteile bereitzustellen. Dies erhöht die Unsicherheiten (Risiko) bei einem späteren Verkauf, da ein Absatzmarkt nicht sichergestellt werden kann. Die Zwischenlagerung von Bauteilen kann durchaus mehrere Jahre andauern.

Laut *RotorDC* - ein Belgisches Urban Mining Unternehmen - setzt sich die Wiederverwendbarkeit von Stoffen nach ihrem Geschäftsmodell anhand folgender Gleichung dar (Gielen 2018, S. 12):

$$(\text{Rückbaukosten} + \text{Aufbereitung} - \text{Ausbauggebühr}) \times \text{Risikofaktor} < \text{Marktwert}$$

Allein durch die Ausbaubarkeit eines Produkts ist nicht gewährleistet, dass dieses auch wiederverwendet werden kann. Dies ist beispielsweise der Fall wenn kein Markt dafür vorhanden ist (Gielen 2018, S. 15).

Die Praktikabilität von Bauteilbörsen wurde im von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt *Bauteilnetz Deutschland* anhand von zwölf Rückbauobjekten dokumentiert. Türen stellen die am stärksten nachgefragte Bauteilgruppe dar, gefolgt von Fenstern, Sanitärobjekten und Heizkörpern. Laut der Autoren können beispielsweise Gebäude um 1900 vom First bis zum Sockel abgetragen und dabei bis zu 80 % schadensfrei ausgebaut werden (Dechantsreiter 1992, 53), (Dechantsreiter 2016, S. 20).

Bei einem flächendeckenden Angebot an Bauteilen könnten in Deutschland laut Schätzungen pro Jahr 35.000 t an Bauteilen des Innenausbau und der Gebäudehülle wiederverwendet werden (Dechantsreiter et al. 2015, S. 70). Im Vergleich zum Gesamtbedarf stellt dies einen geringen Anteil dar. Bei einer Einbindung von Bauteilbörsen in das Rückbausystem der Bauwirtschaft wird von einem weit höheren Potential ausgegangen (Dechantsreiter et al. 2015, S. 70).

Durch die weiträumige Verteilung der zum Erhebungszeitpunkt bestehenden Börsen (Abbildung 144) können hohe Transportkosten anfallen, die eine Wiederverwendung unwirtschaftlich machen können. Hier ist es sinnvoll ein flächendeckendes Netz aus Bauteilbörsen zu etablieren, die untereinander vernetzt sind.

Die Bauteilgewinnung steht vor organisatorischen Herausforderungen. Dechantsreiter identifiziert drei wesentliche Arbeitsfelder, die logistisch miteinander verknüpft werden müssen (Dechantsreiter 2016, S. 22).

- Informationssystem
- Ausbau
- Transport

Ein weiteres Arbeitsfeld stellt die Lagerung der Bauteile dar.

Bei der Wiederverwendung von Bauteilen und -stoffen ist eine umfangreiche Dokumentation unabdingbar. Hierbei sind insbesondere die Abmessungen und Eigenschaften (z. B. Stahlgüte, Statik) von Bedeutung. Die Einführung eines Gebäudestoffpasses würde Abhilfe leisten. Hierbei stellt sich auch die Frage, inwiefern beispielsweise die Verwendung von alten Fenstern sinnvoll ist, die den aktuellen energetischen Anforderungen nicht mehr genügen? Dabei gilt es, die Wirtschaftlichkeit und den Aufwand einer Zerlegung des Bauteils (Fenster) in Glas- und Rahmenbestandteile je nach Fall abzuwägen.

Des Weiteren ist auf eine potentielle Schadstoffbelastung (z. B. Holzschutzmittel) zu achten. Die Baubeteiligten und Baustoffbörsen müssen demnach auch geschultes Personal bereitstellen, was sich nachteilig auf die Kosten auswirkt. In der Vergangenheit mussten einige Bauteilbörsen mangels Wirtschaftlichkeit wieder schließen (Bauteilnetz 2017, S. 1). Durch Subventionen (staatlich oder durch die Bau- und Kreislaufwirtschaft) könnte dieser Problematik entgegengewirkt werden.

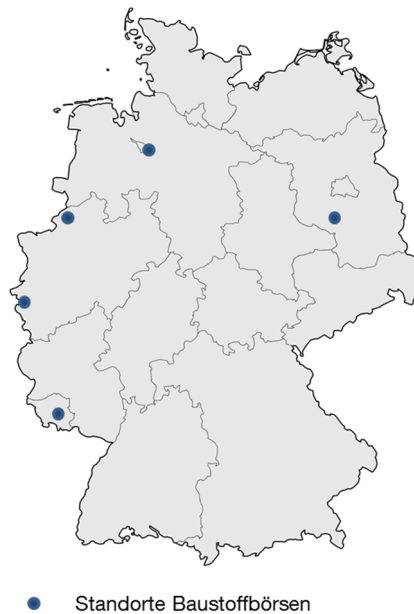


Abbildung 144: Standortkarten von Bauteilbörsen in Deutschland

Eine weitere Möglichkeit ist die Etablierung von *Real-time Baustoffbörsen*, wie beispielsweise:

- www.bauteilklick.com (Schweiz)
- <https://austinmaterialsmarketplace.org/> (USA)
- <http://materialnomaden.at/harvestmap> (Österreich)
- <https://www.harvestmap.org/> (Niederlande)
- <https://restado.de/> (Deutschland)
- <http://www.bauteilnetz.de/> (Deutschland)
- <http://www.bodenboerse.la/> (Deutschland)
- www.recipro-uk.com (Großbritannien)
- Opalis Project (Belgien)

Auf diesem Weg werden Baustoffe und -teile direkt nach dem Ausbau online ausgeschrieben und auf einer interaktiven Standortkarte vermerkt. Auf diese Weise können die ausgebauten Stoffe direkt auf eine neue Baustelle geliefert werden und eine Zwischenlagerung kann entfallen. In diesem Fall müssen Angebot und Nachfrage aufeinander abgestimmt werden, was in der Praxis oft schwer durchzusetzen ist. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Stoffstrommodell kann Abhilfe leisten.

Ein weiteres Handlungsfeld sind die Entwicklung von Standards und technischen Spezifikationen für wiedergewonnene Bauteile und -stoffe, sowie Standards für einen geordneten Rückbau (Debacker et al. 2016, S. 94).

7.15 Fazit

Zur Organisation der Informationsflüsse aller beteiligten Akteure wird ein gemeinsamer Datenraum (bzw. Plattform) benötigt, um Stoffe entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu verfolgen. Durch die verhältnismäßig lange Lebensdauer von

Bauwerken muss dieser über Jahrzehnte gepflegt und aktualisiert werden. Eine notwendige Langzeitarchivierung von digitalen Daten kann nur dann zuverlässig realisiert werden, wenn diese in einem offenen und gut dokumentierten Format vorliegen, um herstellereinspezifische Abhängigkeiten zu reduzieren (Borrmann et al. 2015, S. 126). *Building Information Modeling* (BIM) bietet ein mögliches Werkzeug, um Informationen auf Gebäudeebene über den gesamten Lebenszyklus bereitzustellen.

Derzeit existieren keine etablierten Systeme für diese Art von kooperativer Datenverwaltung. Borrmann et al. beschreiben Konzepte eines gemeinsamen Datenraums sowie dessen Koordination (Borrmann et al. 2015, S. 208). Eine eingehende Beschäftigung mit dieser Thematik würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen.

Auf Ebene des urbanen Raums ist die Nutzung von Geoinformationssystemen (GIS) ein weiteres mögliches Werkzeug zur Speicherung und Verknüpfung von semantischen Daten. Durch Integration von BIM Modellen in GIS, (siehe 2.2.3.3) können die stoffliche Gebäudeebene mit der räumlichen Ebene verknüpft werden, um ein fortschreibbares Kataster zu erstellen. Hierbei ist ein stufenweiser Aufbau flächendeckender Modelle notwendig. Durch eine gesetzlich vorgeschriebene Planung mit BIM und Integration eines Gebäudepasses (z. B. BAMB) könnte eine Umsetzung beschleunigt werden.

Eine Herausforderung stellt nach wie vor die ständige Aktualisierung der Modelle dar. Gebäudeabbrüche, größere Umbauten und Neubauten müssen in das Modell eingebaut werden. Hierbei ist die Kooperation unterschiedlicher Akteure und Referate notwendig. Als Beispiel: Auf Ebene der LHS München könnten die einzelnen Referate und Verwaltungen (Baureferat, Referat für Stadtplanung und Bauordnung, Referat für Geoinformation, Referat für Umwelt u. a.) die unterschiedlichen Datensätze (bzw. Datenbanken) anhand eines digitalen Stadtmodells miteinander verknüpfen. Hierbei ist unter anderem zu prüfen, inwieweit eine zusätzliche Stelle (z. B. Koordinator) geschaffen werden muss und welche Datenstandards (Normung) benötigt werden, um diese interdisziplinäre Aufgabe auszuführen.

Des Weiteren müssen standortspezifische Informationen (auf Ebene des einzelnen Produktionsstandorts) zur Rohstoffproduktion (Sekundär und Primär), Recycling und Deponierung bereitgestellt werden. Hierbei ist es nötig, produzierte Massen, Reserven, vorhandene Anlagenkapazitäten und mögliche Verlustraten zu erfassen (siehe Kapitel 4). Diese Erfassung ist erforderlich, um Transportdistanzen zu optimieren und benötigte Anlagen strategisch zu positionieren. Das Ziel ist, Logistiknetzwerke zu etablieren, die über einzelne Teildisziplinen und Unternehmensgrenzen hinausgehen.

Die Logistikdaten müssen wiederum, wie in Kapitel 4 beschrieben, mit dem flächendeckenden Gebäudemodell verknüpft werden. Für eine erfolgreiche Umsetzung dieser komplexen Aufgabe ist die Beteiligung und Kooperation aller Akteure notwendig und unausweichlich.

Durch das Wissen, wann welcher Stoff an welchem Ort auftritt oder benötigt wird, können Planungsabläufe (z. B. Baustellenlogistik) besser aufeinander abgestimmt werden, um Angebot und Nachfrage besser zu harmonisieren und Stoffkreisläufe weiter zu schließen.

8 Fazit und Ausblick

8.1 Fazit

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell ermöglicht die Erfassung und Quantifizierung der Stoffströme und -lager des urbanen Wohnungsbaus entlang dessen gesamten Lebenszyklus. Dadurch können Aussagen zum zeitlichen und geographischen Verbleib von Stoffen und den Einflüssen der dynamischen Prozesse (z. B. Sanierung, Anfall von Sekundärrohstoffen, Veränderungen des Stofflagers etc.) gemacht werden. Des Weiteren kann das Modell dazu beitragen, den Selbstversorgungsgrad urbaner Räume (ausgeglichene Massenbilanz) zu ermitteln und Steuerungsmechanismen von Stoffströmen aufzuzeigen.

Erfassung von nationalen Stoffströmen

Für alle betrachteten Stoffe wurde ein Wachstum des durch unseren Gebäudebestand repräsentierten Stofflagers verzeichnet. In Deutschland werden mehr Stoffe für Bauwerke verwendet, als durch Abgänge anfallen ($\text{Input} > \text{Output}$). Dies ist insbesondere bei mineralischen Baustoffen ausgeprägter als bei Metallen. Dies liegt unter anderem an den höheren Verwertungsraten und geringeren Sammelverlusten im Vergleich zu mineralischen Stoffen. Es ist daher unter momentanem Wirtschaften nicht möglich, auf nationaler Ebene eine ausgeglichene Massenbilanz ($\text{Input} = \text{Output}$) für das Bauwesen anzustreben, geschweige denn von einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft zu sprechen. Die Verwendung von Primärrohstoffen lässt sich daher weiterhin nicht vermeiden, sie lässt sich aber reduzieren.

Rund 98 % der verwendeten Stoffe im Bauwesen in Deutschland sind mineralischen Ursprungs (2 % Metalle). Der Anteil am nationalen Gesamtverbrauch liegt bei ca. 80 %. Bei den untersuchten Metallen werden rund 11 - 31 % im Bauwesen eingesetzt, mit Ausnahme von Zink dessen Anteil 78 % beträgt. Bei den mineralischen Stoffen weisen Ziegel und Ziegeltonen (45 %) vor Beton (33 %) den höchsten potentiellen Selbstversorgungsgrad auf. Bei den Metallen (Ausnahme Zink) kann durchschnittlich maximal 50 % des Bedarfs aus anfallenden Bauabfällen gedeckt werden, bei Aluminium maximal 60 %.

Bei nationaler Betrachtung kann keine Aussage getroffen werden, an welchem Standort (geographisch) ein Stoff gebraucht bzw. aus dem Bestand freigesetzt wird und welche Logistik (z. B. Transporte, Aufbereitungsanlagen, Deponien), die einer ortsgebundenen Betrachtung unterliegt, benötigt wird. Demnach wurden die auf nationaler Ebene erhobenen Daten, als Basis für teilraumspezifische Analysen (z. B. urbaner Raum) verwendet.

Erfassung von teilraumspezifischen Stoffströmen

Unterschiedliche Stoffe bewegen sich innerhalb unterschiedlich großer Bezugsräume (z. B. international, national, regional etc.). Daher wurden die regionalen und urbanen Einflüsse, der durch Bauleistungen ausgelösten Stoffströme untersucht. Es wurde festgestellt, dass alleine die Kosten für Rohstoffbereitstellung, Transporte, Aufbereitung und Deponierung - selbst innerhalb des gleichen Bezugsraums - eine große Spanne aufweisen.

Des Weiteren wurde aufgezeigt, dass ab einer Transportdistanz von ca. 25-30 km der Transport von Kies unwirtschaftlich wird (ca. 40 km bei Sand). Hier zeigt sich nochmals die Notwendigkeit Stoffkreisläufe auf regionaler und lokaler Maßstabsebene zu betrachten, um gezielt Standortentscheidungen für Unternehmen und Aussagen zu Anlagenkapazitäten (z. B. Deponien etc.) zu machen.

Erfassung von gebäudespezifischen Stoffströmen

Die stoffliche Zusammensetzung von Wohngebäuden dient als Basis (Abbildung des Ist-Zustands) für die Ermittlung von Stoffströmen und die damit verbundenen dynamischen Prozesse. Stoffliche Gebäude- und Bauteilkennwerte (z. B. Materialintensität [z. B. $\text{kg}/\text{m}^3_{\text{BRI}}$ oder $\text{kg}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$]) wurden ausgewertet und mit geometrischen Gebäudedaten aus 3D-Stadtmodellen verknüpft.

Im Vergleich zu mineralischen Baustoffen, die überwiegend in der Konstruktion gebunden sind und den größten Anteil (nach Masse) ausmachen, wurden bei den untersuchten Wohngebäuden Metallanteile zwischen 0,1 % bis 25 % ermittelt. Mit durchschnittlich 92 % ist Stahl (z. B. Bewehrung) das meistverwendete Metall im Wohnungsbau. Es ist daher zukünftig nötig insbesondere die materielle Zusammensetzung der Anlagentechnik genauer zu untersuchen, da insbesondere eine Vielzahl an Nichteisen-Metallen dort gebunden ist. Hierbei ist es nötig, weitere stoffliche Kennwerte auf Gebäudeebene zu bilden.

Es hat sich beispielsweise gezeigt, dass bei einem der betrachteten Mehrfamilienhäuser rund $280 \text{ g}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ Kupfer im elektrischen Leitungsnetz verbaut ist (ca. $230 \text{ g}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ bei untersuchten Einfamilienhäusern). Bezogen auf den Untersuchungsraum München Freiham ergibt dies rund 419 t Kupfer, mit einem derzeitigen Materialwert von € 1,8 Mio. Durch die gehobenen Nutzeransprüche und Zunahme an elektrischen Geräten wird heute 15-mal mehr Kupfer für diesen Zweck benötigt, als dies noch vor 50 Jahren der Fall war.

Validierung anhand des Fallbeispiels München/Freiham

Für das Untersuchungsgebiet München/Freiham beträgt die stoffliche Zusammensetzung des Wohngebäudebestands rund 2,2 Mio. t. Der Anteil der derzeit gebundenen Metalle beträgt ca. 110.000 t, mit einem monetären Gegenwert von ca. € 20,4 Mio.

Rund 50 % der Gesamtmasse sind in Mehrfamilienhäusern der Baualtersklassen 1958 -1968 (31 %) und 1969 - 1978 (19 %) gebunden. Mit 48 % haben Betone den größten Anteil (Metalle ca. 5 %). Diese Gebäude stehen in den nächsten Dekaden zur Sanierung, bzw. zum Rückbau an und bieten ein hohes Potenzial an Sekundärrohstoffen (sowie Substitutionspotenzial von Primärressourcen), die für zukünftige Bauvorhaben genutzt werden können.

In Bezug auf die aus der Fragestellung heraus gebildete Hypothese:

- **Gezieltes Stoffstrommanagement in urbanen Räumen kann dazu beitragen, den Einsatz primärer Ressourcen und Transporte zu verringern**

wurden im Fallbeispiel die Voraussetzungen für ausgeglichene Massenbilanzen (Selbstversorgungsgrad) am Beispiel Beton und Stahl aufgezeigt. Unter den gewählten Voraussetzungen der Bestandsdynamik kann beispielsweise eine autarke Versorgung mit RC-Splitt für die Produktion von RC-Beton und Stahlschrott für die

Stahlproduktion im Untersuchungsraum sichergestellt werden. Ab ca. 2036 kann ein Überschuss bereitgestellt werden und der Stadtteil wird zum Nettostoffexporteur.

Anhand der Auswertung wurde festgestellt, dass durch das Wissen zum Verbleib (geographisches und zeitliches Auftreten und Bedarf) von Stoffen ein gezielter Einsatz von Sekundärrohstoffen und eine strategische Anlagenpositionierung forciert werden kann. Des Weiteren ist es nötig, Angebot und Nachfrage (bezüglich Stoffströmen im lokalen Bezug) abzustimmen. Durch eine lokale Aufbereitung und Verwertung innerhalb des gewählten Bezugsraums reduzieren sich analog die Transportwege, da die Primärrohstoffstätten außerhalb der Stadtgrenzen liegen. Ein gezieltes Stoffstrommanagement (z. B. hochwertige Verwertung vor Ort) in urbanen Räumen kann daher dazu beitragen, den Anteil sekundärer Ressourcen zu erhöhen und den Einsatz primärer Ressourcen und Transporte zu verringern.

Handlungsempfehlungen an die Akteure der Wertschöpfungskette des Bauwesens

Im Rahmen der Analyse und daraus abzuleitenden Handlungsempfehlungen wurden unter den gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen die Einflussmöglichkeiten ausgewählter Akteure auf die Stoffströme des Bauwesens untersucht. Für die Schaffung einer zirkulären Ökonomie und eines gezielten Stoffstrommanagements wird ein gemeinsamer Datenraum benötigt, um Stoffströme, -lager und deren Entwicklung fortlaufend zu dokumentieren. Dadurch können diese Ströme gezielt gesteuert und bewirtschaftet werden (z. B. abgleichen von Angebot und Nachfrage nach Baustoffen). Für ein Gelingen sind alle Akteure angehalten relevante Informationen (z. B. Zusammensetzung von Gebäuden) an andere Akteure der Wertschöpfungskette weiterzugeben und den Informationsaustausch untereinander zu forcieren. Des Weiteren werden akteursübergreifende Geschäftsmodelle benötigt, um einen wirtschaftlichen Anreiz zur Ressourcenschonung zu liefern und damit eine Umsetzung der zirkulären Ökonomie in der Praxis zu gewährleisten.

8.2 Ausblick

Durch die Heterogenität des Bestands gilt es, zukünftig eine umfangreichere Datenbasis bezüglich der stofflichen Zusammensetzung von Wohngebäuden unter Berücksichtigung von regionalen Unterschieden zu schaffen. Vor allem in Bezug auf die Zusammensetzung der Anlagentechnik (KG 400) ist weiterer Forschungsbedarf gegeben, da diese im Verhältnis zur Konstruktion einen hohen Anteil wichtiger Metalle enthält, die für die Volkswirtschaft strategisch bedeutsam sind.

Des Weiteren sind Untersuchungen zur Ermittlung von potentiellen Schadstoffanteilen (z. B. Asbest etc.) nötig, die eine Kreislaufführung von Stoffen stark beeinträchtigen. Diese können derzeit nicht ausreichend quantifiziert werden. Hierfür bietet sich an, die gesetzlich festgeschriebenen Entsorgungsnachweise (z. B. von Abbruchprojekten) auszuwerten und statistisch zentral zu erfassen (z. B. nach Baujahr und Gebäudetyp). Durch das Wissen zum zeitlichen und geografischen Auftreten dieser Stoffe können Deponiekapazitäten (z. B. Sondermülldeponien) rechtzeitig bereitgestellt werden.

Eine weitere Möglichkeit ist eine auf Wahrscheinlichkeit basierende Bewertung (z. B. anhand Gebäudebaujahr und Verwendungszeitraum von potentiellen Schadstoffen). Diese Werte gilt es in weiterführenden Arbeiten zu ermitteln. Die Relevanz dieser Problematik ist eine Aufgabe der nächsten Dekaden, da insbesondere Gebäude aus

der Nachkriegszeit, die in ihrer Substanz mit hoher Wahrscheinlichkeit potentiell schädliche Stoffe beinhalten, zur Sanierung oder zum Rückbau anstehen. Derzeit kann keine Aussage getroffen werden, wieviel davon derzeit im Bestand gebunden ist. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass Sanierungsmaßnahmen nicht statistisch erfasst werden.

Dennoch steht fest, dass noch unzählige problematische Stoffe in unseren Gebäuden verbaut sind. Während einige verboten wurden, werden sich noch Jahre danach Problemstoffe finden, die entsorgt werden müssen und eine Kreislaufführung beeinträchtigen. Nichtsdestotrotz verbauen wir derzeit immer noch Stoffe, die vielleicht erst in Jahren verboten werden, oder deren Wirkung auf Mensch und Umwelt noch nicht nachgewiesen ist (z. B. Nanomaterial). Daher ist es bereits in der Gebäudeplanungsphase von hoher Relevanz Materialinventare zu erstellen und potentiell gefährliche Stoffe bereits im Vorfeld auszuschließen.

Ein fortschreibbares Gebäudekataster (siehe Kapitel 7), das den aktuellen Zustand einzelner Gebäude aufzeigt, ist ein wichtiger Schritt, um der Dokumentationsproblematik zu begegnen. Durch die Vielzahl der Gebäude ist eine Implementierung mit einem hohen Aufwand verbunden (z. B. Schadstoffbegehung der einzelnen Gebäude). Darüber hinaus kann der Wert einer Immobilie stark beeinträchtigt werden und für einen Weiterverkauf hinderlich sein, sollten schadstoffhaltige Stoffe verbaut und dokumentiert sein. Eine schrittweise Einführung über mehrere Dekaden stellt eine realistischere Lösung dar. Die Einführung eines Gebäudestoffpasses (und zentrale Erfassung), der bereits seit 20 Jahren gefordert wird (Kohler et al. 1999), wäre hier ein Anfang. Insbesondere für Neubauten, die einen verhältnismäßig geringen Erfassungsaufwand bezüglich der verbauten Stoffe aufweisen, sollte ein Stoffpass (Gebäudepass) verpflichtend werden, um bereits in der Erstellungsphase zukünftig benötigte Informationen zu generieren.

Unter der Voraussetzung, dass die relevanten Daten erhoben werden, ist die Verwendung von hochauflösenden und flächendeckenden Stadtmodellen (z. B. LoD 2 oder höher) anzustreben. Im Idealfall ist ein flächendeckendes BIM Modell, das in einem Stadtmodell (z. B. CityGML) integriert ist (*Unified Building Model* [UBM]) voranzutreiben. Durch diese Entwicklung könnten bauteilbasierte Aussagen (z. B. Lebensdauer und Austauschzyklen, stoffliche Kennwerte, Verbindung der Bauteilschichten) gemacht werden, die derzeit auf Grund der Datenlage nur mit Durchschnittswerten auf Bauwerksebene belegt sind. Des Weiteren können Anpassungen der geometrischen Gebäudeeingangsdaten (z. B. Dach- und Fensterflächen) im Gebäudemodell weiter reduziert werden. Es gilt, die Gebäudemodelle periodisch zu aktualisieren, um beispielsweise Abriss, Neubau, Umbauten und Sanierungsmaßnahmen (z. B. WDVS) zu erfassen. Durch den derzeitigen Erhebungsaufwand ist eine automatisierte Datenerfassung weiter voranzutreiben.

Die stofflichen Systemverluste (z. B. Aufbereitungs- und Sammelverluste) entlang der Wertschöpfungskette sind entscheidend, um Verwertungswege der einzelnen Fraktionen zu bestimmen - es existiert eine hohe Bandbreite an Werten. Zukünftige Forschung muss sich dieser Thematik annehmen, um beispielsweise neuartige Materialien und Sortiertechnologien zu berücksichtigen. Bei systematischen Untersuchungen von Abbruchmaßnahmen (z. B. aufstellen von Massenbilanzen,

Erfassung des IST-Zustands) können diese Daten erhoben werden, um eine ausreichende Datenbasis zu schaffen.

Durch die Übertragbarkeit und Skalierbarkeit dieses Modells auf andere Bezugsräume wird empfohlen, größere Räume (z. B. Stadtgebiet München, Metropolregion München, Stadt-Umland Beziehung) zu betrachten, die mit den maximalen Transportradien der jeweiligen Stoffe übereinstimmen. Dadurch können beispielsweise benötigte Anlagenkapazitäten besser bestimmt und das Angebot an Sekundärrohstoffen aus dem Bestand mit der Nachfrage praxisrelevanter abgestimmt werden. Des Weiteren können die Abhängigkeiten des urbanen Raums und des Hinterlandes weiter untersucht werden. Durch die räumliche Größe des Fallbeispiels sind beispielsweise innerstädtische Flächen für eine Zwischenlagerung von Stoffen notwendig, da nicht gegeben ist, dass ein Stoff einen sofortigen Abnehmer findet (Bedarf).

Neben wachsenden Räumen (z. B. München) ist eine Untersuchung von schrumpfenden Regionen von weiterem Interesse. Durch die Gegebenheiten können eine autarke Stoffversorgung und ein Stoffexport des jeweiligen Bezugsraums unproblematischer sichergestellt werden als in wachsenden Räumen, da situationsbedingt das Angebot die Nachfrage übersteigen kann (z. B. Abbruchraten > Neubauraten).

Zur Bestimmung der Aufnahme- und Anlagenkapazitäten (z. B. Produktion, Deponieraum u. a. m.) müssen zukünftig Daten auf Ebene der einzelnen Produktionsstandorte (Unternehmensübergreifend) erhoben werden und mit einer Standortkarte der Betriebe verknüpft werden. Dadurch können die Logistik- und Wertschöpfungsketten besser aufeinander abgestimmt werden und beispielsweise Gesamttransportdistanzen ermittelt werden. Durch die derzeitigen Erhebungsmethoden ist nicht gegeben, dass der Verbleib eines Stoffes zu jedem Zeitpunkt bekannt ist und entlang der Wertschöpfungskette zurückverfolgt werden kann.

Des Weiteren gilt es, das Modell zukünftig um Nichtwohngebäude und Infrastrukturbauwerke zu ergänzen, um weitere Möglichkeiten von Angebot und Nachfrage an Stoffen bereitzustellen. Durch den modulhaften Charakter des Modells ist eine Erweiterung möglich. Dies bedingt, dass die entsprechenden Objekte (z. B. Abwasserleitungen) in den dafür benötigten Stadtmodellen hinterlegt werden. Diese Option wurde bereits im Fallbeispiel diskutiert, da insbesondere der Straßenbau ein wichtiger Abnehmer von Stoffen aus dem Hochbau ist. Hier muss je nach Einzelfall abgewogen werden, ob es nicht beispielsweise sinnvoller ist, bei einem herrschenden Bedarf im Gegensatz zu Primärrohstoffen Sekundärrohstoffe aus dem Hochbau im Straßenbau zu verwenden, wenn diese zeitlich und lokal verfügbar sind. Mit einer Erweiterung dieses Modells können diese Fragestellungen zukünftig im räumlichen Bezug untersucht werden.

Eine Umsetzung von „Angebot und Nachfragemodellen“ in die Praxis unterliegt nach wie vor weiteren Herausforderungen (z. B. Logistik, Eigentumsverhältnisse etc.). Ein Gebäude wird nicht aus dem alleinigen Grund abgerissen, um Rohstoffe bereitzustellen. Des Weiteren ist nicht sichergestellt, dass ein Bedarf für einen freigesetzten Stoff auch besteht. Aus diesen und anderen Gründen sind alle beteiligten Akteure angehalten, eine möglichst hochwertige Verwertung von Stoffen unter wirtschaftlichen und ökologischen Rahmenbedingungen zu gewährleisten. Hierbei

werden neue Geschäftsmodelle benötigt, die auch einen Anreiz bieten, einen positiven Beitrag zur Ressourcenschonung zu leisten.

Durch die Anpassungsfähigkeit des Modells können zukünftig weitere Module ergänzt werden. Hier bietet sich eine erweiterte Betrachtungsweise um die Themenfelder Energie, Flächen, Transporte, Kosten und Ökobilanzierung an. Dadurch kann ein ganzheitliches Ressourcenmodell für urbane Räume geschaffen werden, das die Wechselwirkungen und Rückkopplungsschleifen der einzelnen Teildisziplinen berücksichtigt. Das Wissen zum Verbleib und Dynamik von Stoffen und -lagern ist nicht nur im Bestreben nach der Schließung von Stoffkreisläufen und der Etablierung einer zirkulären Ökonomie fundamental, sondern auch maßgebend für eine zukünftig erweiterte und ganzheitliche Betrachtung. Das in dieser Arbeit beschriebene Modell bietet für diesen Zweck eine solide Basis.

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
ALKIS	Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem
AltholzV	Altholzverordnung
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung (Abfallschlüsselnummer)
AW	Außenwandfläche (m ²)
BAMB	Buildings as Material Banks
BauPVO	Bauprodukte-Verordnung
BayBO	Bayerische Bauordnung
BF	Bebaute Fläche (m ²)
BGF	Brutto-Grundfläche (m ²)
BIM	Building Information Modeling
Bk	Belastungsklassen
BKI	Baukosteninformationszentrum Deutscher Architekten
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BNK	Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnhausbau
BRI	Brutto-Rauminhalt (m ³)
BTB	Bundesverband für Transportbeton
CEN	Europäische Komitee für Normung
CityGML	City Geography Markup Language
deca-BDE	Decabromdiphenylether (Flammschutzmittel)
DF	Dachfläche (m ²)
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DK	Deponieklasse
EAK	Europäische Abfallartenkatalog
EAV	Europäische Abfallverzeichnis
EFH	Einfamilienhaus
EHZ	Elektrohydraulische Zerkleinerung
ErsatzbaustoffV	Ersatzbaustoffverordnung
ESEB	Erze, Steine und Erden, Bergbauerzeugnisse
EW	Einwohner
FF	Fensterfläche (m ²)
GaStellV	Garagen- und Stellplatzverordnung
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung

GFZ	Geschossflächenanzahl
GIS	Geoinformationssystem
GMH	Wohngebäude mit 13 oder mehr Wohnungen
HDF	High density fibreboard (Holzfaserplatte)
HPPD	Holzwaren, Papier, Pappe, Druckerzeugnisse
IÖR	Institut für ökologische Raumentwicklung
IW	Innenwandfläche (m ²)
IWU	Institut für Wohnen und Umwelt
KG	Kostengruppe nach DIN EN 276
KGF	Konstruktions-Grundfläche (m ²)
KMF	Künstliche Mineralfasern
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LDF	Low density fibreboard (Holzfaserplatte)
LHS	Landeshauptstadt
LoD	Level of Detail
MantelV	Mantelverordnung
MaRess	Materialeffizienz und Ressourcenschonung
MDF	Medium density fibreboard (Holzfaserplatte)
MFH	Mehrfamilienhaus
NachwV	Nachweisverordnung (NachwV)
NE	Nichteisen
NF	Nutzfläche (m ²)
OSB	Oriented strand board (Holzfaserplatte)
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCP	Pentachlorphenol
PEM	Putze, Estriche, Mörtel
ProgRess	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
RA	Realisierungsabschnitt
RC	Recycling
REACH	Europäische Chemikalienverordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe
RH	Reihenhaus

RSL	Referenz-Nutzungsdauer
RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
SEE	Seltenerdmetalle
SVG	Selbstversorgungsgrad
tkm	Tonnenkilometer
TL	Technische Lebensdauer
UBM	Unified Building Model
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WE	Wohneinheiten
WFL	Wohnfläche (m ²)
WL	Wirtschaftliche Lebensdauer

Literaturverzeichnis

Zusammenfassung

- BBS (2016): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine und Erden Industrie bis 2035 in Deutschland. Hg. v. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V. Berlin.
- Becqué, R.; Mackres, E.; Layke, J.; Adam, N.; Liu, S.; Managan, K. et al. (2016): Accelerating Building Efficiency. Eight Actions for Urban Leaders. Hg. v. World Resources Institut (WRI). Washington, DC.
- Brunn, M. (2017): Lebensraum als Rohstoffquelle. In: *Recycling Magazin* 2017 (18), S. 25–27.
- Europäische Kommission (2015): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. Hg. v. Europäische Kommission.
- Müller, F.; Lehmann, C.; Kosmol, J.; Keßler, H.; Bolland, T. (2017): Urban Mining. Ressourcenschonung im Anthropozän. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA).
- Schiller, G.; Ortlepp, R.; Krauß, N.; Steger, S.; Schütz, H.; Acosta Fernández, J. et al. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Kapitel 1

- Baccini, P.; Brunner, P. H. (1991): *Metabolism of the Anthroposphere*. Berlin, New York: Springer-Verlag.
- BBS (2016): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine und Erden Industrie bis 2035 in Deutschland. Hg. v. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V. Berlin.
- Becqué, R.; Mackres, E.; Layke, J.; Adam, N.; Liu, S.; Managan, K. et al. (2016): Accelerating Building Efficiency. Eight Actions for Urban Leaders. Hg. v. World Resources Institut (WRI). Washington, DC.
- BMUB (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin.
- Bringezu, S. (2000): Ressourcennutzung in Wirtschaftsräumen. Stoffstromanalysen für eine nachhaltige Raumentwicklung. Berlin: Springer.
- Brunn, M. (2017): Lebensraum als Rohstoffquelle. In: *Recycling Magazin* 2017 (18), S. 25–27.
- Bundesregierung (2012): Nationale Nachhaltigkeitsstrategie · Fortschrittsbericht 2012. Berlin.
- Destatis (2014): Nachhaltige Entwicklung in Deutschland - Indikatorenbericht 2014. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

- DIHK (2017): Rohstoffe: Zugang sichern, Ressourcen schonen. Hg. v. Der Deutsche Industrie- und Handelskammertag (DIHK). Berlin.
- Ellen MacArthur Foundation (2017): Cities in the Circular Economy: an Initial Exploration. Hg. v. Ellen MacArthur Foundation.
- Europäische Kommission (2015): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. Hg. v. Europäische Kommission.
- Europäisches Parlament (2011): EU-Bauproduktenverordnung (Verordnung Nr. 305/2011). EU-BauPVO.
- Müller, F.; Lehmann, C.; Kosmol, J.; Keßler, H.; Bolland, T. (2017): Urban Mining. Ressourcenschonung im Anthropozän. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA).
- Schiller, G.; Ortlepp, R.; Krauß, N.; Steger, S.; Schütz, H.; Acosta Fernández, J. et al. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Schuster, M. (1998): Translating MFA into Environmental Policy in Austria. In: Bringezu, S. et al. Proceedings of the ConAccount Conference 11 -12 September, 1997, Wuppertal, Germany. Wuppertal: Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, S. 73-81.
- UNEP (2016): Resource Efficiency as a key Issue in the new Urban Agenda. Advancing Sustainable Consumption and Productions in Cities. Hg. v. United Nations Environment Programme.
- VDI (2015): Handlungsfelder. VDI-Initiative Stadt: Denken - Bausteine für die Stadt der Zukunft. Hg. v. Verein Deutscher Ingenieure e.V. Düsseldorf.
- World Bank (2018): Urban Development. Overview. Online verfügbar unter <http://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview>.

Kapitel 2

- Abmayr, H. (2016): Falsches Signal: Wie die Bahn beim Gütertransport versagt. Weitere Beteiligte: SWR / ARD. Hermann Abmayr (Regie).
- Baccini, P.; Brunner, P. H. (1991): Metabolism of the Anthroposphere. Berlin, New York: Springer-Verlag.
- Bardi, U.; Leipprand, E. (2013): Der geplünderte Planet. Die Zukunft des Menschen im Zeitalter schwindender Ressourcen. München: Oekom-Verl.
- BAST (2016): Brückenstatistik. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Online verfügbar unter <http://www.bast.de/DE/Statistik/Bruecken/Brueckenstatistik.pdf>, zuletzt geprüft am 21.11.2016.
- Bätzing, W. (2001): Zum Begriff und zur Konzeption von Region aus der Sicht der Geographie. Arbeitspapier Nr. 4 des Zentralinstituts für Regionalforschung, Nr. 4. In: Roland Sturm (Hg.): Die Region in Europa verstehen - Konzepte und Ideen in der wissenschaftlichen Debatte. Erlangen-Nürnberg: Friedrich-Alexander Universität, S. 33–38.

- Baustoff-Recycling Bayern (2014): Zunahme der Bauabfälle in Bayern. Hg. v. Baustoff-Recycling Bayern e.V. Online verfügbar unter <http://www.baustoffrecycling-bayern.de/node/537>, zuletzt geprüft am 06.02.2018.
- BDE (2015): Bauindustrie und Entsorgungswirtschaft: 90% Baustoff-Recycling nicht zu halten. Hg. v. Bundesverband des Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. Online verfügbar unter <http://www.recyclingportal.eu/Archive/13683>, zuletzt geprüft am 06.02.2018.
- Becker-Platen, J. (1993): Renaturierung von Sand- und Kiesgruben. Lagerstätten, Abbau, Renaturierung. In: *E&G Quaternary Science* 1993 (43), S. 101–109. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.3285/eg.43.1.08>.
- Bigalke, U.; Zhang, Y.; Kunde, J.; Schmitt, M.; Zeng, Y.; Discher, H.; Bensmann, K.; Stolte, C. (2014): Der dena-Gebäudereport 2015. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur (dena). Berlin.
- BMUB (2016a): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II (ProgRess II). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin.
- BMUB (2016b): Ökobaudat. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Online verfügbar unter <http://www.oekobaudat.de/>, zuletzt geprüft am 30.11.2016.
- BMVI (2016a): Aus- und Neubau von Straßen. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Strasse/Aus-Neubau-Strassen/aus-neubau-strassen.html>, zuletzt geprüft am 10.12.2017.
- BMVI (2016b): Investitionen von Bundesfernstraßen. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Online verfügbar unter http://www.bmvi.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrstraeger/Strasse/NeubauVonAutobahnen/neubau-von-autobahnen_node.html, zuletzt geprüft am 19.11.2016.
- Bokelmann, K.; Hartfeil, T.; Kunkel, K.; Binnewies, M.; Gellermann, C.; Stauber, R. (2016): Neue Methoden zur Wertstoffgewinnung aus primären und sekundären Rohstoffquellen. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): *Recycling und Rohstoffe*, Bd. 10. Neuruppin: TK-Verl, S. 472-437.
- Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (2015): *Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden: Springer-Verlag (VDI-Buch).
- Bringezu, S. (2000): *Ressourcennutzung in Wirtschaftsräumen. Stoffstromanalysen für eine nachhaltige Raumentwicklung*. Berlin: Springer.
- Brunner, P.; Rechberger, H. (2004): *Practical handbook of material flow analysis*. Boca Raton, FL: CRC/Lewis (Advanced methods in resource and waste management, 1).
- Bundesregierung (2012): *Nationale Nachhaltigkeitsstrategie - Fortschrittsbericht 2012*.

- Bunge, R. (2016): Recycling ist gut, mehr Recycling ist besser - oder nicht? In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin: TK-Verl, S. 79–91.
- BVV (2016): 3D-Gebäudemodell LoD 2. Hg. v. Bayerische Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung. Online verfügbar unter http://www.ldbv.bayern.de/geobasis_lvg/3DGebaeude/lod2.html, zuletzt geprüft am 14.01.2016.
- DAfStb (2010): Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620. Hg. v. Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb). Berlin.
- Destatis (2014): Nachhaltige Entwicklung in Deutschland - Indikatorenbericht 2014. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Destatis (2015): Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff - Lange Reihen ab 1980. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Destatis (2016a): Abfallbilanz (Abfallaufkommen /-verbleib, Abfallkennzahlen, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen) - 2014. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Destatis (2016b): Bauen und Wohnen. Baugenehmigungen / Baufertigstellungen von Nichtwohngebäuden (Neubau) Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Destatis (2016c): Baufertigstellungen: Errichtung neuer Nichtwohngebäude - Jahressumme - Regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte. Hg. v. Statistische Ämter des Bundes und der Länder. Düsseldorf.
- Destatis (2016d): Bautätigkeiten und Wohnungen. Bestand an Wohnungen. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Destatis (2017): Verkehr Aktuell - Fachserie 8 Reihe 1.1. 11/2017. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Diefenbach, N. (2013): Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU: Neufassung Oktober 2013. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt GmbH.
- Dörflinger, A.; Hietz, P.; Maier, R.; Puntz, W.; Fussenegger, K. (1995): Ökosystem Großstadt Wien. Quantifizierung ökologischer Parameter unter besonderer Berücksichtigung der Vegetation. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Forschung und Stadt Wien - MA 22.
- Dornauer, R.; Pramer, J.; Huber, R. (2016): Möglichkeiten und Anwendungen neuester VIS/NRI-Sortierer in der Aufbereitung von Sekundärrohstoffen. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin: TK-Verl, S. 611–619.
- Dudenredaktion (o. J.): "Kreislaufwirtschaft, die" auf Duden online. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/node/675817/revisions/1638330/view>.
- Duvigneaud, P.; Denaeyer-De Smet, S. (1977): L'écosystème Urbain Bruxelloise. In: Productivité biologique en Belgique, S. 581–597.
- Ellen MacArthur Foundation (2015): Growth Within: a circular economy vision for a competitive Europe. Hg. v. Ellen MacArthur Foundation.

- Elsner, H. (2018): Sand - auch in Deutschland bald knapp? Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover (Commodity TopNews 56).
- Erdmann, L.; Behrendt, S.; Feil, M. (2011): Kritische Rohstoffe für Deutschland. Hg. v. KfW Bankengruppe.
- EU (2007): Establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). Directive 2007/2/EC. Hg. v. European Parliament and the Council of the European Union.
- European Commission (2014): Report on Critical Raw Materials for the EU. Critical Raw Materials Profiles. Hg. v. European Commission.
- European Commission (2017): Länge der betriebenen Schienennetze in Ländern Europas im Jahr 2015. Hg. v. Statista und Eurostat. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13302/umfrage/laenge-der-eisenbahnnetze-in-europa/>, zuletzt geprüft am 20.05.2016.
- Euroquarz (2010): Genehmigungsverfahren für die Kies- und Sandgewinnung. Online verfügbar unter <https://www.euroquarz.de/wissen-ueber-quarzsand-quarzkies/genehmigungsweg-zum-abbau/themen-genehmigungsverfahren/>, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- Gabler Wirtschaftslexikon (2016): Region. Hg. v. Springer Gabler Verlag. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/104/region-v8.html>, zuletzt geprüft am 16.05.2016.
- Gerwens, S. (2015): Stellungnahme zum Gesetzesentwurf der Bundesregierung zum "Entwurf eines Dritten Gesetzes zur Änderung des Bundesfernstraßenmautgesetzes". Drucksache 18/3923. Hg. v. Pro Mobilität - Initiative für Verkehrsinfrastruktur e.V.
- Goeller, H. E.; Weinberg, A. M. (1976): The Age of Sustainability. In: The American Economic Review 68 (6): Seite 1-11.
- Heinrich, M. (2005): Entwicklung von Anlagenkonzeptionen zur Anreicherung von Hartgesteinfractionen mit Hilfe Optoelektronischer Sortiermaschinen. Rolf Strohmaier GmbH. München.
- Heinrich, M. (2015): Development of an Integrated Raw Material Model for Urban Systems. In: Jakob Lederer (Hg.): International Workshop Mining the Technosphere. Drivers and barriers, challenges and opportunities : October 1-2, 2015, Vienna University of Technology. Vienna: Christian Doppler Laboratory "Anthropogenic Resources", TU Wien, Institute for Water Quality, Resource and Waste Management, S. 175–177.
- Heinz, D. (2016): Baustoffe - Basis nachhaltigen Bauens. Zement I & II. Baustoffe - Basis nachhaltigen Bauens. Technische Universität München. München, 03.05.2016.
- Heinz, D. (2012): Altbeton-Recycling. Hg. v. cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung. Technische Universität München. München.
- IMDS (2017): IMDS Benutzerhandbuch 11.0. Hg. v. EntServ Deutschland GmbH. Bad Homburg. Online verfügbar unter https://public.mdssystem.com/documents/10906/16811/imds_usermanual_11.0_de.pdf.

- Kleemann, F.; Lederer, J.; Fellner, J. (2015): Buildings as an Urban Mine - The Case Study of Vienna. In: Jakob Lederer (Hg.): International Workshop Mining the Technosphere. Drivers and barriers, challenges and opportunities : October 1-2, 2015, Vienna University of Technology. Vienna: Christian Doppler Laboratory "Anthropogenic Resources", TU Wien, Institute for Water Quality, Resource and Waste Management, S. 105–108.
- Knappe, F.; Dehoust, G.; Petschow, U.; Jakubowski, G. (2012): Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung schutzgutbezogener und anwendungsbezogener Anforderungen, des potenziellen, volkswirtschaftlichen Nutzens sowie branchenbezogener, ökonomischer Anreizinstrumente. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (28/2012).
- Knappe, F. (2011): Urban Mining - Es sind neue Wege notwendig. In: *Müll und Abfall* (11), S. 460–465. Online verfügbar unter <https://www.muellundabfall.de/MA.10.2011.460>.
- Kohler, G. (1998): Kreisläufe schließen. In: *Beratende Ingenieure*, S. 41–48.
- Kreislaufwirtschaft Bau (2015): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2012. Hg. v. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. Berlin.
- Kring, F. (2016): Elektrosicherheit bei Aluminiumleitungen. Hg. v. WEKA MEDIA GmbH. Augsburg. Online verfügbar unter <https://www.weka.de/elektrosicherheit/aluminiumleitungen-wichtige-aspekte-zur-elektrosicherheit/>, zuletzt geprüft am 28.11.2016.
- Krüger, M.; Becker, B.; Fricke, K.; Münnich, K.; Spengler, T.; Kieckhäfer, K. et al. (2016): Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- Kummer, K. (Hg.) (2014): Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen 2015. Themenschwerpunkte: gesellschaftliche Verankerung und institutionelles Gefüge, Aufgabenfelder und Wirkungsbereiche, technische Netzwerke und Transfer, Forschung und Lehre. Berlin: Wichmann.
- Lichtensteiger, T. (Hg.) (2006): Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender in der langfristigen Entwicklung urbaner Systeme ; ein Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten; [Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt ARK 04 - Gebäude im Umbau urbaner Kulturlandschaften der ETH Zürich und der Eawag]. Zürich: vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH.
- Lippold, C. (Hg.) (2014): Der Elsner 2014. Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen (Planung, Bau, Erhaltung, Verkehr, Betrieb). 68., Aufl. Dieburg: Elsner, Otto.
- Meadows, D. H.; Randers, J.; Meadows, D. L. (2004): The limits to growth. The 30-year update. White River Junction, Vt: Chelsea Green Pub. Co.
- Meadows, D. H.; Wright, D. (2009): Thinking in systems. A primer. London: EarthScan.
- Mötzl, H.; Pladerer, C. (2009): Assessment of Buildings and Constructions (ABC) – Disposal. Maßzahlen für die Entsorgungseigenschaften von Gebäuden und Konstruktionen für die Lebenszyklusbewertung. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Österreich. Wien.

- Müller, A. (2016): Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau. Hg. v. Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (10.08.17.7-14.27).
- Müller, F.; Lehmann, C.; Kosmol, J.; Keßler, H.; Bolland, T. (2017): Urban Mining. Ressourcenschonung im Anthropozän. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA).
- Odum, E. P. (1991): Prinzipien der Ökologie. Lebensräume, Stoffkreisläufe, Wachstumsgrenzen. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft.
- Schebek, L.; Schnitzer, B.; Blesinger, D.; Köhn, A.; Miekley, B.; Linke, H. J. et al. (2016): Material stocks of the non-residential building sector: the case of the Rhine-Main area. In: Resources, Conservation and Recycling. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.06.001.
- Schiller, G.; Deilmann, C.; Gruhler, K.; Röhm, P. (2010): Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (56/2010).
- Schiller, G.; Ortlepp, R.; Krauß, N.; Steger, S.; Schütz, H.; Acosta Fernández, J. et al. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Schröder, M. (2015): Abbrucharbeiten. Grundlagen, Planung, Durchführung ; mit 134 Tabellen. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Köln: Müller.
- Seifert, S.; Thome, V.; Karlstetter, C. (2014): Elektrodynamische Fragmentierung. Eine Technologie zur effektiven Aufbereitung von Abfallströmen. In: K. J. Thomé-Kozmiensky (Hg.): Recycling und Rohstoffe, Bd. 7. Neuruppin: TK, S. 431–438.
- SIG3D (2013): Handbuch für die Modellierung von 3D Objekten - Teil 2: Modellierung Gebäude (LOD1, LOD2 und LOD3) – SIG3D Quality Wiki DE. Hg. v. Special Interest Group 3D. Online verfügbar unter <http://wiki.quality.sig3d.org/>, zuletzt geprüft am 10.12.2016.
- Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt (2017): Anteil der Verkehrsfläche an der gesamten Bodenfläche in Deutschland von 2000 bis 2015. Online verfügbar unter Statista - Das Statistik-Portal. Zugriff am 10. Dezember 2017, von <https://de-statista-com.eaccess.ub.tum.de/statistik/daten/studie/440635/umfrage/anteil-der-verkehrsflaeche-in-deutschland/>.
- Steger, S.; Fekkak, M.; Bringezu, S. (2011): Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.
- StMWVT (2002): Rohstoffe in Bayern. Hg. v. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie - Referat „Bergwesen, mineralische Rohstoffe und Bergaufsicht“.
- Thierstein, A.; Walser, M. (2000): Die nachhaltige Region. Ein Handlungsmodell. Bern: Verlag Paul Haupt (Schriftenreihe des Instituts für Öffentliche Dienstleistungen und Tourismus Beiträge zur Regionalwirtschaft, 1).
- Umweltbundesamt (2015): Daten zur Umwelt 2015. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/daten-zur-umwelt-2015>, zuletzt geprüft am 05.08.2015.

- VDI 4800, 2016: VDI 4800 Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien.
- VDZ (2017): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Hg. v. Verein Deutscher Zementwerke e.V. Düsseldorf.
- Weikert, R.; Heinritz, H. (2017): Abfälle am Bau. Der umfassende Ratgeber zur Verwertung und Entsorgung von Bauabfällen. Hg. v. Abfallwirtschaft Landratsamt Kitzingen. Kitzingen.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (2017): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2016. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Stahl. Düsseldorf.
- Wolman, A. (1965): The Metabolism of Cities. In: Scientific American 1965 (213), S. 156–174.
- Wrap (o.J.): Procurement requirements for reducing waste and using resources efficiently. Hg. v. Waste and Resources Action Programme. Banbury.

Kapitel 3

- Andrleit, H.; Elsner, H.; Homberg-Heumann, D.; Huy, D.; Meßner, J.; Pein, M. et al. (2017): Deutschland – Rohstoffsituation 2016. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover.
- Aschoff, H. (2006): Die Investmentstrategien der Profis. 1. Aufl. München: FinanzBuch Verlag.
- Baccini, P.; Bader, H. P. (1996): Regionaler Stoffhaushalt. Erfassung, Bewertung und Steuerung. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Bardi, U.; Leipprand, E. (2013): Der geplünderte Planet. Die Zukunft des Menschen im Zeitalter schwindender Ressourcen. München: Oekom-Verl.
- Baulinks (2018): Produktion von Fliesen in Deutschland in den Jahren 2006 bis 2014 (in Millionen Quadratmetern). In Statista - Das Statistik-Portal. <https://de-statista-com.eaccess.ub.tum.de/statistik/daten/studie/452442/umfrage/produktion-von-fliesen-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 22.03.2018.
- BauNetz (2016): Recycling von Glas - Fenster und Türen - Bauschäden/Sanierung - baunetzwissen.de. Hg. v. Baunetz Media GmbH. Online verfügbar unter http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Fenster-und-Tueren_Recycling-von-Glas_155383.html, zuletzt geprüft am 04.10.2016.
- BBS (2007): Steine und Erden - mehr als ein Baustoff. Hg. v. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V. Berlin.
- BBS (2016): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Hg. v. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V. Berlin.
- Bertram, M.; Martchek, K. J.; Rombach, G. (2009): Material Flow Analysis in the Aluminum Industry. In: *Journal of Industrial Ecology* 13 (5), S. 650–654. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2009.00158.x.
- Bialucha, R.; Merkel, T.; Motz, H. (2011): Technische und ökologische Rahmenbedingungen bei der Verwendung von Stahlwerkschlacke. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Andrea

- Versteyl (Hg.): Schlacken aus der Metallurgie. Rohstoffpotential und Recycling. Neuruppin: TK, S. 133–149.
- BINE (2010): Recycling von Photovoltaik-Modulen. Projektinfo 02/10. Hg. v. FIZ. Karlsruhe. Online verfügbar unter http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2010/Projektinfo_02-2010/projekt_0210_internetx.pdf, zuletzt geprüft am 08.12.2016.
- BMUB (2017): Verwertungsquote von Verpackungen aus Glas in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2015. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB).
- BTB (2015): Jahresbericht 2014/2015. In Bewegung. Hg. v. Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB). Berlin.
- BV Glas (2016a): BV Glas - Jahresbericht 2015. Hg. v. Bundesverband Glasindustrie e.V. Düsseldorf. Online verfügbar unter http://www.bvglas.de/media/user_upload/Jahresbericht_2015.pdf, zuletzt geprüft am 02.10.2016.
- BV Glas (2016b): Glasbestandteile. Hg. v. Bundesverband Glasindustrie e.V. Online verfügbar unter <http://www.bvglas.de/der-werkstoff/glasbestandteile/>, zuletzt geprüft am 05.10.2016.
- Cremers, J. (2015): Atlas Gebäudeöffnungen. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation DETAIL.
- Destatis (2016a): Abfallbilanz (Abfallaufkommen /-verbleib, Abfallkennzahlen, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen) - 2014. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Destatis (2016b): Abfallentsorgung - Fachserie 19 Reihe 1 - 2014. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Wiesbaden.
- Erdmann, L.; Handke, V.; Klinski, S., Behrendt, S., Scharp, M. (2004): Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen. Handlungsoptionen und Steuerungsinstrumente am Beispiel von Kupfer und Blei. Berlin: IZT (Werkstattberichte / IZT, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Nr. 68).
- European Commission (2014): Report on Critical Raw Materials for the EU. Critical Raw Materials Profiles. Hg. v. European Commission.
- FEhS - Institut für Baustoff-Forschung (2016): Verwendung von Hochofenschlacke in Deutschland nach Einsatzgebieten im Jahr 2014. Hg. v. Statista - Das Statistik-Portal. Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/242117/umfrage/verwendung-von-hochofenschlacke-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 25.07.2016.
- Freestone, I. (2015): The Recycling and Reuse of Roman Glass: Analytical Approaches. In: Karol Wight (Hg.): Journal of Glass Studies. Corning: The Corning Museum Of Glass (Vol. 57), S. 29–40.
- Gärtner, S.; Hienz, G.; Keller, H.; Müller-Lindenlauf, M. (2013): Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz. Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich. Hg. v. IFEU Heidelberg.

- Geological Survey (2016): Mineral commodity summaries 2016. [S.I.]: US Government Printing Office.
- Glocker, W. (2012): Deutsches Museum Ausstellungsführer Glastechnik. Überarb. und erw. Neuaufl. des Kap. "Werkstoff Glas" im Ausstellungsführer "Glastechnik", 1992. Hg. v. Helmut A. Schaeffer. München: Deutsches Museum Verlag.
- Grüne-Henze, R. (2013): Marktspiegel 2012 - Dachziegel. Marktanteil und Dachziegelproduktion in Deutschland. Hg. v. Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V.
- Hegger, M.; Auch-Schwelk, V.; Fuchs, M.; Rosenkranz, T. (2005): Baustoff Atlas. 1. Aufl. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG.
- Helmus, M.; Randel, A. (2014): Stahlrecycling im Bauwesen. Hg. v. Bauforumstahl. Bergische Universität Wuppertal.
- Höglmeier, K. (2015): Holznutzung in Kaskaden: Ansätze zur Potentialanalyse und zur Weiterentwicklung der ökobilanziellen Bewertung. Dissertation. Technische Universität München. Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung.
- Höglmeier, K.; Weber-Blaschke, G.; Richter, K. (2017): Potentials for Cascading of Recovered Wood from Building Deconstruction. A Case Study for South-East Germany. Hg. v. Conservation and Recycling Resources (Volume 117, Part B, S. 304-314). Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.07.004>, zuletzt geprüft am 28.03.2018.
- Hülensberg, D. (2014): Keramik. Wie ein alter Werkstoff hochmodern wird. Berlin: Springer Vieweg (Technik im Fokus).
- IBU (2013): EPD Beton C25-30 2013. Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30. Hg. v. Institut Bauen und Umwelt e.V. (EPD-IZB-2013421-D), zuletzt geprüft am 12.08.2015.
- ILZSG (2017): Weltweite Produktion von Blei in den Jahren 2011 bis 2017. Hg. v. International Lead and Zinc Study Group, Lead and Zinc Statistics. Online verfügbar unter <http://www.ilzsg.org/static/statistics.aspx?from=1>, zuletzt geprüft am 28.03.2018.
- Initiative Zink (2016): Geschichte des Zinks. Die Bedeutung von Zink in der Geschichte. Hg. v. Initiative Zink. Düsseldorf. Online verfügbar unter <http://www.initiative-zink.de/basiswissen/das-metall-zink/geschichte-des-zinks/>, zuletzt geprüft am 12.08.2016.
- Initiative Zink (2018): Korrosionsschutz mit Zink. Hg. v. Initiative Zink. Düsseldorf. Online verfügbar unter <https://www.initiative-zink.de/basiswissen/das-metall-zink/korrosionsschutz-mit-zink/>, zuletzt geprüft am 26.03.2018.
- IWCC (2017): Copper & Copper Alloy Semis Demand. Hg. v. International Wrought Copper Council (IWCC). London. Online verfügbar unter <http://coppercouncil.org/genstat1.aspx>, zuletzt geprüft am 28.03.2018.
- Jopp, K. (2015): Eine unendliche Geschichte. In: Kultur & Technik 2015 (3/2015), S. 21–23.

- Kaiser, C.; Mantau, U. (2013): Regionale Schwerpunkte der Holzverwendung. In: H. Weimar und D. Jochem (Hg.): Holzverwendung im Bauwesen. Eine Marktstudie im Rahmen der „Charta für Holz“. Thünen Report 9. Hamburg, S. 71–92.
- Kohler, G. (1998): Kreisläufe schließen. In: Beratende Ingenieure, S. 41–48.
- Kohler, N.; Hassler, U.; Paschen, H. (1999): Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Krauß, O.; Werner, T. (2014): Potentiale eines hochwertigen Recyclings im Bauereich. Hg. v. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH. Berlin (Kurzanalyse, 8).
- Krone, K. (2000): Aluminiumrecycling. Vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung. Düsseldorf: Aluminium-Verlag.
- Kündig, R. (2012): Nichtmetallische Rohstoffe - Steine und Erden, Industrieminerale. Hg. v. Schweizerische Geotechnische Kommission - ETH-Zürich.
- Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (2018): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Lichtensteiger, T. (Hg.) (2006): Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender in der langfristigen Entwicklung urbaner Systeme ; ein Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten ; Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt ARK 04 - Gebäude im Umbau urbaner Kulturlandschaften der ETH Zürich und der Eawag. Zürich: vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH.
- Mantau, U.; Przemko, D.; Hiller, D. (2013): Holzeinsatz im Bauwesen – Verwendungsstrukturen nach Gebäuden und Gewerken. In: H. Weimar und D. Jochem (Hg.): Holzverwendung im Bauwesen. Eine Marktstudie im Rahmen der „Charta für Holz“. Thünen Report 9. Hamburg, S. 1–67.
- Mantau, U.; Weimar, H.; Kloock, T. (2011): Standorte der Holzwirtschaft Holzrohstoffmonitoring. Altholz im Entsorgungsmarkt – Aufkommens- und Vertriebsstruktur 2010. Hg. v. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft. Hamburg.
- Merkel, T. (2011): Nutzung von Eisenhüttenschlacken. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe - Band 4. Neuruppin: TK Verlag, S. 355–368.
- Müller, A. (2016): Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau. Hg. v. Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (10.08.17.7-14.27).
- Otzen, K. (2015): Kupfermarkt unter Strom. In: VDI Nachrichten 2015, 27.02.2015 (Nr.9), S. 14.
- Piehl, T.; Süselbeck, G. (2011): Abfall-Entsorgungs-Trainer. Grundlagen für die Schulung. 9. Auflage. Hamburg: Storck, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm (Ihr Weg zur Sachkunde).
- Rasch, H. (2016): Zurück in den Kreislauf. In: Recycling Magazin 2016 (19), S. 20–21.
- Rauch, J. N.; Pacyna, J. M. (2009): Earth's global Ag, Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, and Zn cycles. In: *Global Biogeochem. Cycles* 23 (2), n/a. DOI: 10.1029/2008GB003376.

- Schauwinhold, D. (1985): Aus der Geschichte des Werkstoffes Stahl. In: *Stahl und Eisen 105* 1985 (22), S. 1275–1282.
- Scholz, W.; Hiese, W.; Möhring, R. (2011): Baustoffkenntnis. 17., neu bearb. u. erw. Aufl. Köln: Werner Verlag.
- Seidler, C. (2012): Deutschlands verborgene Rohstoffe. Kupfer, Gold und Seltene Erden. München: Hanser.
- Stark, J.; Wicht, B. (1995): Geschichte der Baustoffe. Weimar: HAB Verlag.
- Steinacker, S.; Rumpold, R.; Antrekowitsch, J. (2016): Recyclingmethoden für Reststoffe aus der Kupfermetallurgie. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: TK-Verl, S. 497–512.
- Sverdrup, H.; Koca, D.; Ragnarsdóttir, K. V. (2013): Peak Metals, Minerals, Energy, Wealth, Food and Population: Urgent Policy Considerations for a Sustainable Society. In: *Journal of Environmental Science and Engineering* 2013/5, S. 499–533. Online verfügbar unter <http://lup.lub.lu.se/record/4812244>.
- Sverdrup, H.; Ragnarsdóttir, K. V. (2014): Natural Resources in a Planetary Perspective. In: *Geochemical Perspectives* 2014 (Volume 3, Number 2), S. 129–341. DOI: 10.7185/geochempersp.3.2.
- Umweltbundesamt (2016): Glas und Altglas. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehlter-abfallarten/glas-altglas>, zuletzt geprüft am 08.12.2016.
- VdL (2016): Marktinformationen. Kennzahlen zur mittelständischen Lack- und Druckfarbenindustrie in Deutschland. Hg. v. Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie e.V. Online verfügbar unter <http://www.lackindustrie.de/Themen/Marktinformationen/Seiten/Uebersichtsseite.aspx>, zuletzt geprüft am 21.10.2016.
- VDZ (2014): Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe. Zement-Merkblatt Betontechnik. B3 2.2014. Hg. v. Verein Deutscher Zementwerke e.V. Düsseldorf.
- VDZ (2016): Statistische Daten zum Zementmarkt in Deutschland auf einen Blick Zahlen und Daten. Hg. v. Verein Deutscher Zementwerke. Düsseldorf. Online verfügbar unter <https://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/a-wichtige-daten-auf-einen-blick/>, zuletzt geprüft am 01.08.2016.
- WECOBIS (2014): Blei - WECOBIS - Ökologisches Baustoffinformationssystem. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.wecobis.de/grundstoffe/metalle-gs/blei-gs.html>, zuletzt geprüft am 10.08.2016.
- Weimar, H. (2011): Der Holzfluss in der Bundesrepublik Deutschland 2009. Methode und Ergebnis der Modellierung des Stoffflusses von Holz. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Institut für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft (6/2011).
- Weimar, H. (2014): Holzbilanzen 2012 und 2013 für die Bundesrepublik Deutschland. Working Paper, No. 31. Hg. v. Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und

- Forstökonomie. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:253-201410-dn054034-8>, zuletzt geprüft am 28.03.2018.
- Weimar, H.; Jochem, D. (Hg.) (2013): Holzverwendung im Bauwesen. Eine Marktstudie im Rahmen der „Charta für Holz“. Thünen Report 9. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Hamburg. Online verfügbar unter DOI:10.3220/REP_9_2013.
- Wendehorst, R. (2011): Baustoffkunde. 27. Aufl. Hg. v. Günter Neroth. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Praxis).
- Werner, F.; Seidel, J. (1992): Der Eisenbau. Vom Werdegang einer Bauweise. Berlin: Verlag für Bauwesen.
- Wight, K. (Hg.) (2015): Journal of Glass Studies. Corning: The Corning Museum Of Glass (Vol. 57).
- Wirtschaftsvereinigung Metalle (2015): Metallstatistik 2014. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Metalle. Berlin.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (2015): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2014. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Stahl. Düsseldorf.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (2016): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2015. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Stahl. Düsseldorf.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (2017): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2016. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Stahl. Düsseldorf.
- World Bureau of Metal Statistics; ICSG; ILZSG; INSG (2015): WVM - Geschäftsbericht 2014/2015. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVM). Berlin.
- WVM; GDB (2015): Metallstatistik 2014. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVM) und Gesamtverband der Buntmetallindustrie (GDB). Berlin.
- WVM; GDB (2017): Verwendete Menge an Blei in Deutschland nach Hauptverwendungsgebieten im Jahr 2016. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVM) und Gesamtverband der Buntmetallindustrie (GDB). Berlin.

Kapitel 4

- Ayres, R. U.; Simonis, U. E. (1994): Industrial Metabolism. Restructuring for Sustainable Development. Tokyo: United Nations University Press.
- Baustoffe Standorte Online. Transportbeton (2014). Iffezheim: Stein Verlag Baden-Baden GmbH. Online verfügbar unter [www.http://standortkarten.geoplangmbh.de/](http://standortkarten.geoplangmbh.de/), zuletzt geprüft am 03.12.2016.
- Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2014): Entsorgung von Bauabfällen in Bayern 2012. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung. München.
- BMWi (2016): Stahlindustrie. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Wirtschaft/branchenfokus,did=171736.html>, zuletzt geprüft am 13.07.2016.

- BTB (2016): Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie - Jahresbericht 2015/2016. Hg. v. Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., zuletzt geprüft am 26.11.2016.
- Bureau of International Recycling (2018): Wichtigste Länder nach Menge des exportierten Stahlschrotts weltweit im Jahr 2016 (in 1.000 Tonnen). In Statista - Das Statistik-Portal, zuletzt geprüft am 15.03.2018.
- Destatis (2016a): Erzeugerpreisindizes für Güterverkehrsleistungen. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Destatis (2016b): Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz) nach dem Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken. Lange Reihen der Fachserie 17, Reihe 2 von Januar 2000 bis Oktober 2016. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Destatis (2016c): Wirtschaftsbereiche - Flächennutzung. Boden nach Nutzungsarten. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Flaechennutzung/Tabellen/Bodenflaeche.html>, zuletzt geprüft am 26.11.2016.
- DIHK (2017): Rohstoffe: Zugang sichern, Ressourcen schonen. Hg. v. Der Deutsche Industrie- und Handelskammertag (DIHK). Berlin.
- Europäische Kommission (2018): EU schützt europäische Hersteller mit Antidumpingzöllen auf chinesischen Stahl. Hg. v. Europäische Kommission. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/germany/news/20180208-chinesischer-stahl_de, zuletzt geprüft am 15.03.2018.
- Glück, S.; Vinnemann, C. (2007): Bodenschätze der Bundesrepublik Deutschland. Hannover: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.
- Herrler, B. (2012): Der Transportmarkt in Deutschland. Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Supply Chain Services. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Pillnitz, 17.10.2012.
- Husar, R. B. (1986): Emissions of Sulfur Dioxide and Nitrogen Oxides and Trends for Eastern North America. In: National Research Council (Hg.): Acid Deposition Long-Term Trends. Washington, DC: National Acad. Pr., S. 48–92.
- Kreislaufwirtschaft Bau (2015): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2012. Hg. v. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. Berlin.
- Landbell Group (2018): China Abfallimport-Sperre – eine Chance für die europäische Wirtschaft? Hg. v. Recyclingportal.eu – Fachportal für Abfall, Entsorgung, Recycling, Kreislaufwirtschaft und Märkte. Online verfügbar unter <http://recyclingportal.eu/Archive/38881>, zuletzt geprüft am 27.02.2018.
- NABU (2016): Auslaufmodell Müllverbrennung. Technik von gestern gefährdet Recycling von heute. Hg. v. Naturschutzbund Deutschland e.V. Online verfügbar unter <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/verbrennung/21106.html>, zuletzt geprüft am 17.03.2018.
- Regierung von Oberbayern (2013): Regionalplan München - Karte 2 - Siedlung und Versorgung. München: Bayerische Vermessungsverwaltung.

- RPV (2012): Region München - Region der Zukunft - Regionalplan. Hg. v. Regionale Planungsverband München. Online verfügbar unter <http://www.region-muenchen.com/regplan/rplan.htm>, zuletzt geprüft am 26.11.2016.
- Seidler, C. (2012): Deutschlands verborgene Rohstoffe. Kupfer, Gold und Seltene Erden. München: Hanser.
- Stahl Zentrum (2016): Transportstruktur der Stahlindustrie. Hg. v. Stahl Zentrum. Online verfügbar unter <http://www.stahl-online.de/index.php/themen/wirtschaft/verkehr/>, zuletzt geprüft am 13.07.2016.
- Thünen, J. H. von (1921): Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie. Jena: Fischer.
- DIN EN 1045-2, 2008: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206.
- Wirtschaftslexikon24 (2015): Thünensche Kreise - Wirtschaftslexikon. Online verfügbar unter <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/th%C3%BCnensche-kreise/th%C3%BCnensche-kreise.htm>, zuletzt aktualisiert am 17.11.2015, zuletzt geprüft am 13.07.2016.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (2016): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2015. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Stahl. Düsseldorf.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (2017): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2016. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Stahl. Düsseldorf.

Kapitel 5

- Albracht, G.; Schwerdtfeger, O. A. (Hg.) (1991): Herausforderung Asbest. Wiesbaden: Universum Verlagsanstalt.
- Axmann, M. (2017): Asbest in Bauabfällen. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg.
- Bahr, C.; Lennerts, K. (2010): Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen. Hg. v. Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Berlin.
- Bardi, U.; Leipprand, E. (2013): Der geplünderte Planet. Die Zukunft des Menschen im Zeitalter schwindender Ressourcen. München: Oekom-Verl.
- Bayerische Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2014): Zensus 2011 – Gemeindedaten Gebäude und Wohnungen. Hg. v. Bayerische Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung. München.
- BBSR (2011): Künstliche Mineralfaserdämmstoffe. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Berlin (1/2011).
- Bleher, D.; Dehoust, G.; Alwast, H.; Thörner, T.; Stuckenholz, F.; Grass, V. et al. (2017): Planspiel Mantelverordnung (Aspekte der Kreislaufwirtschaft und des Bodenschutzes) Planspiel mit dem Ziel einer Gesetzesfolgenabschätzung zu den Auswirkungen der

- Mantelverordnung. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Darmstadt.
- BMUB (2016): Ökobaudat. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Online verfügbar unter <http://www.oekobaudat.de/>, zuletzt geprüft am 30.11.2016.
- BMUB (2017): Langfristige Regeln für die Entsorgung HBCD-haltiger Abfälle. Pressemitteilung Nr. 196/17. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bmub.bund.de/pressemitteilung/langfristige-regeln-fuer-die-entsorgung-hbcd-haltiger-abfaelle/>.
- Bogusch, N.; Brandhorst, J. (2013): Sanieren oder Abreißen? Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Böhmer, H.; Fanslau-Görlitz, D.; Zedler, J. (2010): U-Werte alter Bauteile. Arbeitsunterlagen zur Rationalisierung wärmeschutztechnischer Berechnungen bei der Modernisierung. [Vollst. überarb. und erw. Aufl.]. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl.
- Bonner, A. (2012): Sanierung PCB-belasteter Gebäude. 3. Sankt Augustiner Expertentreff "Gefahrenstoffe". BG-Bau, 30.08.2012.
- Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (2015): Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden: Springer-Verlag (VDI-Buch).
- Christen, K.; Meyer-Meierling, P. (1999): Optimierung von Instandsetzungszyklen und deren Finanzierung bei Wohnbauten. Zürich: vdf Hochschulverlag.
- Deilmann, C.; Reichenbach, J.; Krauß, N.; Gruhler, K. (Hg.) (2017): Materialströme im Hochbau. Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Stand: Dezember 2016. Bonn: Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Schriftenreihe Zukunft Bauen, Band 06).
- DEKRA (2008): Zweiter DEKRA-Bericht zu Baumängeln an Wohngebäuden. Hg. v. DEKRA Real Estate Expertise GmbH. DEKRA Real Estate Expertise GmbH. Saarbrücken.
- Destatis (2015): Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff - Lange Reihen ab 1980. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Destatis (2016a): Abfallbilanz (Abfallaufkommen /-verbleib, Abfallkennzahlen, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen) - 2014. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Destatis (2016b): Abfallentsorgung - Fachserie 19 Reihe 1 - 2014. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Dieckmann, J. (2002): Einführung in die Systematik der häufigsten Schadstoffe in Innenräumen und an Gebäuden. Online verfügbar unter <http://www.fas-geb.de/pdf/SYSFGBAU.pdf>, zuletzt geprüft am 06.07.2015.
- Diefenbach, N.; Cischinsky, H.; Rodenfels, M.; Clausnitzer, K. D. (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den

- Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. neue Ausg. Darmstadt: Wohnen und Umwelt.
- Gensbaur, J. (2017): Mengenverteilung und Entsorgungsphasen von Baustoffen bei Abbruchmaßnahmen. Masterarbeit betreut von: Matthias Heinrich. Hg. v. Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen. Technische Universität München. München.
- Gruhler, Karin; Böhm, Ruth (2011): Auswirkungen des demografischen Wandels auf das Stofflager und die Stoffflüsse des Wohngebäudebestandes - Deutschland 2050. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl. (Reihe Wissenschaft, 25).
- Gruhler, K.; Böhm, R.; Deilmann, C.; Schiller G. (2002): Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe. Gebäudevergleiche und Hochrechnungen für Bebauungsstrukturen. Hg. v. Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR). Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR). Dresden.
- Gruhler, K.; Deilmann, C. (2015): Materialaufwand von Nichtwohngebäuden. Verfahrensschritte zur Abbildung der Ressourceninanspruchnahme des Nichtwohnbau-Bestandes. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Wissenschaft, 45).
- Hassler, U.; Kohler, N.; Wang, W. (1999): Umbau. Über die Zukunft des Baubestandes. Tübingen: Wasmuth.
- IP Bau (1994): Alterungsverhalten von Bauteilen und Unterhaltskosten. Grundlegenden Daten für den Unterhalt und die Erneuerung von Wohnbauten. Hg. v. Bundesamt für Konjunkturfragen. Bern.
- Kalusche, W. (2011): Grundflächen und Planungskennwerte von Wohngebäuden. In: Mike Gralla und Matthias Sudermeier (Hg.): Innovationen im Baubetrieb. Wirtschaft - Technik - Recht. Festschrift für Universitätsprofessor Dr.-Ing. Udo Blecken. Köln: Werner Verlag, S. 35–47.
- Kisskalt, J. (2016): Gebäudeschadstoffe. Hg. v. LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH. Online verfügbar unter <http://www.lga-geo.de/index.php/de-de/geb%C3%A4udeschadstoffe-abbruch/geb%C3%A4udeschadstoffe.html>, zuletzt geprüft am 19.11.2016.
- Klauß, S.; Kirchhof, W. (2010): Altbaukonstruktionen - Materialien und U-Werte im Gebäudebestand. Baustoffe und Bauweisen mit regionalem Bezug. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl.
- Klöpffer, W.; Grahl, B. (2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH.
- Kohler, N.; Hassler, U.; Paschen, H. (1999): Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kratochwil, A. (2011): Gebäudeschadstoffe – Erkennen von Risiken bei Sanierung und Modernisierung im Bestand. IHK Passau. Landshut, 27.10.2011.
- Krauß, N.; Schiller, G.; Deilmann, C. (2016): Erhebliche Mengen an Stahl und Kupfer. Eine neue Methode mittels „Bottom-up“-Verfahren ermöglicht die Berechnung des Materiallagers von Heizungsleitungen im Wohngebäudebestand. In: ReSource (2/2016), S. 28–37.

- Landeshauptstadt München (2013): Energiegerechte Stadtentwicklung in München. Chancen für den Bestand durch energetisch innovative Neubaugebiete in Freiam und Neuaubing. Hg. v. Landeshauptstadt München - Referat für Stadtplanung und Bauordnung. München.
- Landeshauptstadt München (2017): Demografiebericht München - Teil 1. Analyse und Bevölkerungsprognose 2015 - 2035. Hg. v. Landeshauptstadt München. Referat für Stadtplanung und Bauordnung I/22. München.
- Loga, T.; Diefenbach, N.; Knissel, J.; Born R. (2005): „Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden. Kurzverfahren Energieprofil“. Hg. v. Institut Bauen und Umwelt (IBU). Darmstadt.
- Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R. (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt GmbH. Darmstadt.
- Markova, S.; Rechberger, H. (2011): Entwicklung eines Konzepts zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen: Materieller Gebäudepass und Design for Recycling für das Bauwesen. Unter Mitarbeit von Stanimira Markova und Helmut Rechberger. Hg. v. Technische Universität Wien. Wien.
- Mötzl, H.; Pladerer, C. (2009): Assessment of Buildings and Constructions (ABC) – Disposal. Maßzahlen für die Entsorgungseigenschaften von Gebäuden und Konstruktionen für die Lebenszyklusbewertung. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Österreich. Wien.
- Nemeth, I. (2011): Methodenentwicklung zur Bestimmung von Potenzialen der Energieeffizienzsteigerung im Haushalts- und GDH-Sektor. Am Beispiel von drei Landkreisen in Bayern. Dissertation. Technische Universität München. München.
- Ortlepp, R.; Gruhler, K.; Schiller, G. (2015): Material stocks in Germany's non-domestic buildings: a new quantification method. Hg. v. Building Research and Information.
- Pfeiffer, M.; Arlt, J. (2005): Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau. Stuttgart: IRB Verlag (Bau- und Wohnforschung, 2464).
- Pfeiffer, M.; Bethe, A.; Fanslau-Görlitz, D.; Zedler, J. (2010): Nutzungsdauertabellen für Wohngebäude. Lebensdauer von Bau- und Anlagenteilen. 1. Aufl. Berlin: Bauwerk.
- Potrykus, A.; Milunov, M. (2015): Ermittlung von potentiell POP-haltigen Abfällen und Recyclingstoffen - Ableitung von Grenzwerten. Hg. v. Umweltbundesamt. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), zuletzt geprüft am 29.11.2017.
- Riedel, W. (2010): Wärmedämm-Verbundsysteme. Von der Thermohaut bis zur transparenten Wärmedämmung. 2., überarb. Aufl. Waldshut-Tiengen, Stuttgart: Baulino; Fraunhofer-IRB-Verl.
- Ritter, F. (2011): Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen. Modellierung und praxisnahe Prognose. Technische Universität Darmstadt. Darmstadt.

- Rudolphi, A. (2009): Schadstoffkataster – Bewertung und Sanierung vorhandener Schadstoffkontaminationen: GFÖB Berlin mbH.
- Schiller, G.; Ortlepp, R.; Krauß, N.; Steger, S.; Schütz, H.; Acosta Fernández, J. et al. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Schneider, M.; Rubli, S. (2007): Ressourcenmodell mineralischer Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich. Schlussbericht. Hg. v. Wertstoff-Börse GmbH. Schweiz, Zürich.
- Schulze, H. J. (1990): Gebäudeatlas - Mehrfamilienwohngebäude der Baujahre 1880-1980. 1. Aufl. Berlin: Bauinformation (Spezielle Informationsschriften).
- SIG3D (2013): Handbuch für die Modellierung von 3D Objekten - Teil 2: Modellierung Gebäude (LoD 1, LoD 2 und LoD 3) – SIG3D Quality Wiki DE. Hg. v. Special Interest Group 3D.
- Stier, C.; Bayha, A.; Volk, R.; Sevilmis, N. (2014): ResourceApp - Erkennung und Erschließung von Rohstoffpotentialen im Hochbau. Fraunhofer ICT; KIT; Fraunhofer IGD. Deutscher Abbruchverband. Wiesbaden.
- UBA (2012): Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe. Umweltschädlich! Giftig! Unvermeidbar? Hg. v. Umweltbundesamt.
- Weber-Blaschke, G.; Faulstich, M. (2005): Analyse, Bewertung und Management von Baustoffströmen in Bayern. Hg. v. Technische Universität München und Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe. München.
- Wedler, B.; Hummel, A. (1947): Trümmerverwertung. Technische Möglichkeiten und wirtschaftliche Bedeutung. 2. Aufl. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.

Kapitel 6

- Bald, M. (2017): Status der Realisierungsabschnitte von Freiham/Neuaubing. München, 12.10.2017. Persönliche Korrespondenz mit der Landeshauptstadt München an M. Heinrich.
- Basten, M. (2002): Zementrohstoffe in Deutschland. Geologie, Massenbilanz, Fallbeispiele. Düsseldorf: Verlag Bau und Technik.
- BMUB (2016): Ökobaudat. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Online verfügbar unter <http://www.oekobaudat.de/>, zuletzt geprüft am 30.11.2016.
- DAfStb (2010): DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620.
- Deilmann, C.; Krauß, N.; Gruhler, K. (2014): Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Berlin (10.08.17.7-12.29).
- Gruhler, K.; Böhm, R. (2011): Auswirkungen des demografischen Wandels auf das Stofflager und die Stoffflüsse des Wohngebäudebestandes - Deutschland 2050. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl. (Reihe Wissenschaft, 25).

- Heinz, D. (2017): Verwendung von mineralischen RC-Baustoffen. Technische Universität München, 01.09.2017. Persönliche Korrespondenz an M. Heinrich.
- Heinz, D. (2012): Altbeton-Recycling. Hg. v. cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung. Technische Universität München. München.
- Hullmann, H.; Kraft, U.; Lichtnecker, H. (2001): Einsatz von Kupfer und Zink bei Dächern, Dachrinnen und Fallrohren. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Metalle. Hannover.
- Krauß, N.; Schiller, G.; Deilmann, C. (2016): Erhebliche Mengen an Stahl und Kupfer. Eine neue Methode mittels „Bottom-up“-Verfahren ermöglicht die Berechnung des Materiallagers von Heizungsleitungen im Wohngebäudebestand. In: ReSource Magazin 2016 (20/2016), S. 28–37.
- Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (2018): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Landeshauptstadt München (2013): Energiegerechte Stadtentwicklung in München. Chancen für den Bestand durch energetisch innovative Neubaugebiete in Freiham und Neuaubing. Hg. v. Landeshauptstadt München - Referat für Stadtplanung und Bauordnung. München.
- Landeshauptstadt München (2015): Freiham - Planungsgeschichte. Hg. v. Landeshauptstadt München. Online verfügbar unter <https://www.muenchen.de/rathaus/dam/jcr:11d26f52-26f8-42b0-81ec-d4c5d0d59617/planungsgeschichte710.pdf>, zuletzt geprüft am 19.09.2017.
- Landeshauptstadt München (2017): Demografiebericht München - Teil 1. Analyse und Bevölkerungsprognose 2015 - 2035. Hg. v. Landeshauptstadt München. Referat für Stadtplanung und Bauordnung I/22. München.
- LfU (2016): Derzeit im Ablagerungsbetrieb befindliche Deponien entsorgungspflichtiger Gebietskörperschaften in Bayern. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). Augsburg.
- Loga, T.; Diefenbach, N.; Knissel, J.; Born, R. (2005): Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt. Darmstadt.
- Material Archiv (2018): Gipsplatte. Hg. v. Material Archiv. Zürich. Online verfügbar unter <http://www.materialarchiv.ch/detail/1245/Gipsplatte#/detail/1245/gipsplatte->, zuletzt geprüft am 13.08.2018.
- Mötzl, H.; Pladerer, C. (2009): Assessment of Buildings and Constructions (ABC) – Disposal. Maßzahlen für die Entsorgungseigenschaften von Gebäuden und Konstruktionen für die Lebenszyklusbewertung. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Österreich. Wien.
- Müller, A. (2016): Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (10.08.17.7-14.27).

- Popp, M.; Waltenberger, L. (2015): Fensterwerkstoffe im Vergleich: Lebenszykluskosten und Ökobilanz im Wohnbau. Eine Potenzialanalyse aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht. Hg. v. Aluminium-Fenster-Institut. Wien.
- DIN 4226-101:2017-08: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen.
- Schiller, G.; Deilmann C.; Gruhler, K.; Röhm, P. (2010): Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (56/2010).
- Schneider, M.; Rubli, S. (2007): Ressourcenmodell mineralischer Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich. Schlussbericht. Hg. v. Wertstoff-Börse GmbH. Schweiz, Zürich.
- Spyra, W.; Heyn, S.; Mettke, A. (2010): Ökologische Prozessbetrachtungen - RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen). Hg. v. Brandenburgische Technische Universität Cottbus.
- Steger, S.; Fekkak, M.; Bringezu, S. (2011): Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.
- VDZ (2016): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Hg. v. Verein Deutscher Zementwerke e.V. Düsseldorf, zuletzt geprüft am 07.09.2017.
- VFF/BF (2014): Mehr Energie sparen mit neuen Fenstern. Hg. v. Verband Fenster und Fassade (VFF), Bundesverband Flachglas e.V. (BF). Frankfurt am Main / Troisdorf.
- World Bank; Thomson Reuters (2018a): Durchschnittlicher Preis für Aluminium weltweit in den Jahren 1960 bis 2016. Worldbank.org: World Bank Commodity Price Data.
- World Bank; Thomson Reuters (2018b): Durchschnittlicher Preis für Eisenerz weltweit in den Jahren 1960 bis 2016. Worldbank.org: World Bank Commodity Price Data.
- World Bank; Thomson Reuters (2018c): Durchschnittlicher Preis für Kupfer weltweit in den Jahren 1960 bis 2016. Worldbank.org: World Bank Commodity Price Data.
- World Bank; Thomson Reuters (2018d): Durchschnittlicher Preis für Zink weltweit in den Jahren 1960 bis 2016. Worldbank.org: World Bank Commodity Price Data.

Kapitel 7

- Abmayr, H. (2016): Falsches Signal: Wie die Bahn beim Gütertransport versagt. Weitere Beteiligte: SWR / ARD. Hermann Abmayr (Regie).
- Bahn-Walkowiak, B.; Bleischwitz, R.; Sanden, J. (2010): Einführung einer Baustoffsteuer zur Erhöhung der Ressourceneffizienz im Baubereich. Meilenstein AS3.2: Maßnahmenvorschläge zur Ressourcenpolitik zur Gestaltung der Rahmenbedingungen. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal.
- Baustoff Recycling Bayern (2013): Gütesicherung. Hg. v. Baustoff Recycling Bayern e.V. München. Online verfügbar unter <https://www.baustoffrecycling-bayern.de/node/269>, zuletzt geprüft am 11.04.2018.

- Bauteilnetz (2017): Bauteilnetz Deutschland. Regionale Bauteilbörsen. Hg. v. U. Dechantsreiter. Online verfügbar unter http://www.bauteilnetz.de/bauteilnetz/website/stdws_adresse/bauteilboersen.html, zuletzt geprüft am 16.04.2018.
- BDE (2017): BDE-Leitfaden zur Gewerbeabfallverordnung 2017. Hg. v. Bundesverband des Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. Berlin.
- Bleher, D.; Dehoust, G.; Alwast, H.; Thörner, T.; Stuckenholz, F.; Grass, V. et al. (2017): Planspiel Mantelverordnung (Aspekte der Kreislaufwirtschaft und des Bodenschutzes) Planspiel mit dem Ziel einer Gesetzesfolgenabschätzung zu den Auswirkungen der Mantelverordnung. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Darmstadt.
- BMF (2017): 26. Subventionsbericht. Bericht der Bundesregierung über die Entwicklung der Finanzhilfen des Bundes und der Steuervergünstigungen für die Jahre 2015 bis 2018. Hg. v. Bundesministerium der Finanzen. Referat für Öffentlichkeitsarbeit. Berlin.
- BMUB (2017): Referentenentwurf. Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung. Hg. v. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin.
- Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (2015): Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden: Springer-Verlag (VDI-Buch).
- Buddemeier, P.; Rheinbay, L. (2017): Chancen der Kreislaufwirtschaft für Deutschland. Analyse von Potenzialen und Ansatzpunkten für die IKT-, Automobil- und Baustoffindustrie. Hg. v. Rat für Nachhaltige Entwicklung, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Accenture Strategy Sustainability. Berlin.
- Busse, D. (2012): Nachhaltigkeitsaspekte in Theorie und Praxis der Entscheidungsfindung. Perspektiven institutioneller Steuerung in der Immobilienwirtschaft. Wiesbaden: Springer Gabler (Research).
- BVS (2011): Standpunkt Fachbereich Bau. Stellplatzbreiten. Hg. v. Bundesverband öffentlich bestellter und vereidigter sowie qualifizierter Sachverständiger e.V. (BVS).
- City of Seattle (2018): Residential Deconstruction. Hg. v. Seattle Department of Construction & Inspections. Online verfügbar unter <http://www.seattle.gov/dpd/permits/permittypes/residentialdeconstruction/default.htm>, zuletzt geprüft am 17.04.2014.
- City of Vancouver (2018): Demolition permit with recycling requirements. Hg. v. City of Vancouver. Online verfügbar unter <http://vancouver.ca/home-property-development/demolition-permit.aspx>, zuletzt geprüft am 17.04.2018.
- Debacker, W.; Manshoven, S.; et al. (2016): BAMB - Buildings as Material Banks - D1 Synthesis of the State-of-the-Art. Key Barriers and Opportunities for Materials Passports and Reversible Building Design in the Current System. Hg. v. BAMB VITO.

- Dechantsreiter, U.; Horst, P.; Mettke, A.; Asmus, S.; Schmidt, S.; Knappe, F. et al. (2015): Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Dechantsreiter, U. (1992): Recycling im Hochbau erprobt. Forschungsprojekt im Rahmen des Experimentellen Wohnungsbaus BMBau. In: Das Bauzentrum 1992 (2/93), S.50-55.
- Dechantsreiter, U. (2016): Bauteile wiederverwenden - Werte entdecken. Ein Handbuch für die Praxis. München: Oekom Verlag.
- DEKRA (2008): Zweiter DEKRA-Bericht zu Baumängeln an Wohngebäuden. Hg. v. DEKRA Real Estate Expertise GmbH. DEKRA Real Estate Expertise GmbH. Saarbrücken, zuletzt geprüft am 13.07.2016.
- Ellen MacArthur Foundation (2015): Delivering the Circular Economy. A Toolkit for Policymakers, zuletzt geprüft am 17.04.2018.
- EU-Recycling (2014): RC-Baustoffe: Schwellenängste überwinden. In: EU Recycling 2014 (04), S. 6–13.
- Ferguson, M.; Souza, G. C. (2010): Closed-loop supply chains. New developments to improve the sustainability of business practices. Boca Raton: CRC Press (Supply chain integration).
- Fink, D.; Fischer, F. (2012): Neue Werkzeuge für die dichte Stadt. In: Bauwelt 2012 (36), S. 46–49.
- Gielen, M. (2018): Identifying new Material Flows in Industry and Construction. RotorDC. EcoBuild 2018. London, 07.03.2018.
- Görisch, U. (2016): Desaster Mantelverordnung. Hg. v. Prof. Dr.-Ing. Uwe Görisch GmbH - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft. Karlsruhe.
- Government of the Netherlands (2016): A Circular Economy in the Netherlands by 2050. Hg. v. The Ministry of Infrastructure and the Environment, Ministry of Economic Affairs, Ministry of Foreign Affairs, Ministry of the Interior and Kingdom Relations.
- Heitzer, B. (2012): Im Interesse einer sicheren Versorgung mit Rohstoffen. Die Umsetzung der deutschen Rohstoffstrategie. In: Zeitschrift für Außen- und Sicherheitspolitik 2012 (5), S. 41–49.
- Henrotay, C.; Debacker, W.; Steinlage, M. (2017): How do current policies support a transition towards a circular economy in the built environment? In: F. Di Maio, S. Lofti, M. Bakker, M. Hu und A. Vahidi (Hg.): HISER International Conference 2017. Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste. Delft: Delft University of Technology, S. 227–230.
- IRR (2017): Bauen als Kreislaufwirtschaft. Die Innovationsregion Rheinisches Revier als Pilotgebiet in NRW. Hg. v. Innovationsregion Rheinisches Revier GmbH (IRR). Jülich.
- Kohler, N. (2015): On the use of historical material data. Mining the Technosphere - Potentials and Challenges, Drivers and Barriers. Institute for Water Quality and Resource Management. Technische Universität Wien. Wien, 02.10.2015.

- Kohler, N.; Hassler, U.; Paschen, H. (1999): Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Krumme, J. (2018): Definition: Öffentliche Verwaltung. Hg. v. Gablers Wirtschaftslexikon. Sekretariat der Kultusministerkonferenz. Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/verwaltung-47011/version-270283>, zuletzt geprüft am 04.04.2018.
- LHM (2017): Ökologischer Kriterienkatalog der Landeshauptstadt München (2017). Hg. v. Landeshauptstadt München - Referat für Stadtplanung und Bauordnung.
- Lichtensteiger, T. (Hg.) (2006): Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender in der langfristigen Entwicklung urbaner Systeme; ein Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten ; [Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt ARK 04 - Gebäude im Umbau urbaner Kulturlandschaften der ETH Zürich und der Eawag]. Zürich: vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH.
- Lutz, C. (2012): Wenn der SUV an der Wand entlang schrammt. In: Süddeutsche Zeitung, 2012 (8. September 2012). Online verfügbar unter <http://www.sueddeutsche.de/muenchen/parkplatzprobleme-wegen-breiter-autos-wenn-der-suv-an-der-wand-entlang-schrammt-1.1461766>, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- Lützkendorf, T.; Barthel, R. (2008): Fortsetzung des Dialogs Bauqualität - Erarbeitung von Lehrmodulen zum Nachhaltigen Bauen zur Unterstützung der Aus- und Weiterbildung der am Bau Beteiligten. Phase I: Analyse von Schlüsselakteuren und des Bedarfes an Lehrmodulen & Entwicklung von Handlungsanleitungen für Planer. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Berlin (BBR-Online-Publikation, Nr. 12/2008).
- Markova, S.; Rechberger, H. (2011): Entwicklung eines Konzepts zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen: Materieller Gebäudepass und Design for Recycling für das Bauwesen. Unter Mitarbeit von Stanimira Markova und Helmut Rechberger. Hg. v. Technische Universität Wien. Wien.
- Mulhall, D.; Hansen, K.; Luscuere, L.; Zanatta, R.; Willems, R.; Boström, J. et al. (2017): Buildings as Material Banks (BAMB) Framework for Materials Passports. Hg. v. EPEA Nederland BV und SundaHus Linköping AB.
- Müller, A. (2016): Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (10.08.17.7-14.27).
- Ott, S.; Hausmann, B. (2015): Stoffpass Gebäude. Entwicklung von Grundlagen für das operative Ressourcenmanagement im Real-Estate-Development und Baukonstruktion. Band 2. Hg. v. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Technische Universität München (TUM).
- Peters, M.; Ribeiro, A.; Oseyran, J.; Wang, K. (2017): Buildings as Material Banks and the Need for Innovative Business Models. Hg. v. VITO IBM.
- Schlegelmilch, K. (2017): Wie wir eine Rohstoffwende einleiten. In: Stop CO2 2017 (3), S. 8–9.

Schröder, M. (2015): Abbrucharbeiten. Grundlagen, Planung, Durchführung ; mit 134 Tabellen. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Köln: Müller.

Kapitel 8

Kohler, N.; Hassler, U.; Paschen, H. (1999): Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen. Berlin, Heidelberg: Springer.

Glossar

- Baccini, P.; Brunner, P. (2012): Metabolism of the anthroposphere. Analysis, evaluation, design. 2nd ed. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Baustoff Recycling Bayern (2018): Mineralische Abfälle. Online verfügbar unter <https://www.baustoffrecycling-bayern.de/node/320>, zuletzt geprüft am 07.05.2018.
- Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J.(2015): Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden: Springer-Verlag (VDI-Buch).
- Brunner, P.; Rechberger, H. (2004): Practical handbook of material flow analysis. Boca Raton, FL: CRC/Lewis (Advanced methods in resource and waste management, 1).
- Destatis (2018). Hg. v. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Glossar/DissipativeVerluste.html>, zuletzt geprüft am 28.08.2018.
- DIN EN ISO 14040:2006, August 2012: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.
- DIN EN ISO 14044:2006, November 2009: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- DIN EN 15643-1:2010, Dezember 2010: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 1: Allgemeine Rahmenbedingungen; Deutsche Fassung EN 15643-1:2010.
- DIN EN 15804:2014-07, Juli 2014: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013.
- DIN EN 15978:2012-01: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011.
- DIN EN ISO 9000, November 2015: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015.
- Gruhler, K.; Böhm, R. (2011): Auswirkungen des demografischen Wandels auf das Stofflager und die Stoffflüsse des Wohngebäudebestandes - Deutschland 2050. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl. (Reihe Wissenschaft, 25).

- Günther, E. (2018): Stoffstrommanagement. Hg. v. Gabler Wirtschaftslexikon. Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/stoffstrommanagement-41938/version-265294>.
- Klöpffer, W.; Grahl, B. (2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfadens für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH.
- Richtlinie 1999/31/EG, 26.04.1999: Richtlinie 1999/31/EG vom 26. April 1999 über Abfalldeponien.
- UBA (2012): Glossar zum Ressourcenschutz. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau.
- VDI 3475 Blatt 3, Dezember 2006: Emissionsminderung - Anlagen zur mechanisch-biologischen Behandlung von Siedlungsabfällen.
- VDI 3925 Blatt 1, Dezember 2013: Methoden zur Bewertung von Abfallbehandlungsverfahren.
- VDI 4631, Februar 2011: Gütekriterien für Biogasanlagen.
- VDI 4800 Blatt 1, Februar 2016: Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien.
- VDI 6210 Blatt 1, Februar 2016: Abbruch von baulichen und technischen Anlagen.

Anhang

- BBS (2016): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Hg. v. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V. Berlin.
- Bogusch, N.; Brandhorst, J. (2013): Sanieren oder Abreißen? Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Buchert, M.; Sutter, S.; Alwast, H.; Schütz, N.; Weimann, K. (2017): Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau (33/2017).
- Destatis (2016): Produktion der deutschen Baustoffindustrie nach ausgewählten Erzeugnissen im Jahr 2015. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/589435/umfrage/produktion-der-deutschen-baustoffindustrie-nach-ausgewaehlten-erzeugnissen/>, zuletzt geprüft am 22.10.2016.

Glossar

Begriff	Definition	Quelle
3D-Stadtmodell	Virtuelles dreidimensionales Modell eines Stadtgebiets mit klassifizierten Informationen zu Geometrie, Lage und Aussehen von Gebäude und Geländeabschnitten	Borrmann et al. 2015, S. 581
Abfall	Alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss	§3. Abs. 1 KrWG
Abfallfraktion	Aus einem Abfallgemisch nach speziellen Kriterien (z. B. Korngrößen Reaktion auf Magnetfeld, spezifisches Gewicht) abgetrennter Teil der Abfälle	VDI 3475 Blatt 3, S. 4
Bauelement	Teil eines Bauwerks, das eine definierte Kombination von Produkten umfasst	DIN EN 15804:2014-07, S. 8
Bauprodukt	Ware, die hergestellt oder bearbeitet/veredelt wurde, um in ein Bauwerk eingefügt zu werden	DIN EN 15978:2012-01, S. 8
Bauschutt	Mineralische Abfälle aus Bautätigkeiten	Baustoff Recycling Bayern 2018, S. 1
Baustellenabfall	Abfälle die aus Bautätigkeiten resultieren	
Bausubstanz	An einem Gebäude dauerhaft befestigte Bauprodukte, deren Ausbau zu einer Veränderung der Qualität des Gebäudes führt, wobei der Ausbau oder Austausch der Produkte Baumaßnahmen beinhaltet	EN 15643-1:2010, S. 8
Bautätigkeit	Aktivitäten zur Erstellung eines Bauwerkes	DIN EN 15978:2012-01, S. 8
Bauwerk	Alles was gebaut ist oder aus baulicher Tätigkeit resultiert	DIN EN 15978:2012-01, S. 8
Binomialverteilung	Diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung	
Building Information Modeling (BIM)	Methoden und Werkzeuge zur durchgängigen digitalen Unterstützung der Planung, Ausführung und Bewirtschaftung im Lebenszyklus von Bauwerken	Borrmann et al. 2015, S. 582
City Geography Markup Language (CityGML)	Vom OpenGIS herausgegebenes offenes, standardisiertes und herstellerneutrales Format für die Persistierung (nichtflüchtiger Speicher) und den fachübergreifenden Austausch virtueller 3D-Stadtmodelle	Borrmann et al. 2015, S. 582

Deponie	Abfallbeseitigungsanlage für die Ablagerung von Abfällen oberhalb oder unterhalb der Erdoberfläche. Dies beinhaltet betriebsinterne Abfallbeseitigungsanlagen für die Ablagerung der Abfälle und einer auf Dauer angelegten Anlage, die für die vorübergehende Lagerung von Abfällen genutzt wird	1999/31/EG, S. 5
Deponiegut	Abfall der die Ablagerungskriterien für die Deponierung erfüllt (Deponieverordnung [DeponieV])	VDI 3475 Blatt 3, S. 5
Dissipative Verluste	Materialien, die eine indirekte Folge von Produktions- und Konsumaktivitäten sind und an die Umwelt abgegeben werden	Destatis 2018, S. 1
Downcycling	Recycling, bei dem der erzeugte Sekundärrohstoff von geringerer Qualität als das Ausgangsmaterial ist	UBA, S. 5
Element	Mit chemischen Mitteln nicht weiter zerlegbarer Stoff	Duden
Erneuerbare Ressource	Ressource, die im menschlichen Zeithorizont nachwächst oder auf natürliche Art erneuert oder gereinigt werden kann	DIN EN 15804:2012-07, S. 9
Exergie	Maximaler Anteil an Energie, der in Arbeit umgewandelt werden kann	VDI 3925 Blatt 1, S. 4
Funktionalität	Eignung oder Nützlichkeit hinsichtlich eines bestimmten Zwecks oder einer bestimmten Maßnahme	EN 15643-1:2010, S. 12
Gefährliche Abfälle	Abfälle, die nach ihrer Art, Beschaffenheit oder Menge in besonderem Maße gesundheits-, luft- oder wassergefährdend, explosionsfähig oder brennbar sind oder Erreger übertragbarer Krankheiten enthalten oder hervorbringen können	VDI 3925 Blatt 1, S. 4
Geographisches Informationssystem (GIS)	System zur Erfassung, Bearbeitung, Analyse und Präsentation räumlicher Daten, inklusive benötigter Hardware, Software, Daten und Anwendungen	Borrmann et al. 2015, S. 583
Gut	Ökonomische Einheiten aus Materie mit einem positiven oder negativen Wert (z. B. Trinkwasser, Abfall)	Brunner und Rechberger 2004, S. 36
Industry Foundation Classes (IFC)	Herstellerunabhängiges, offenes, standardisiertes und objektorientiertes Datenformat zum Austausch von Building Information Models (BIM)	Borrmann et al. 2015, S. 583

Koppelprodukte	Brauchbare Produkte, Materialien oder Substanzen die bei Produktionsprozessen neben dem eigentlich hergestellten Produkt auftreten (z. B. Nebenprodukte)	Klöpffer und Grahl 2009
Lager	Stoffe, die in einem Prozess gespeichert sind	Baccini und Brunner 2012, S. 383
Level of Detail (LOD)	Bezeichnet verschiedene Detaillierungsstufen bei der Darstellung virtueller Welten. Konzept findet auch bei 3D-Stadtmodellen Anwendung	Borrmann et al. 2015, S. 583
Massenbilanz	Gegenüberstellung der zugeführten und abgeführten Massenströme inklusive der Bestandsveränderung des zu betrachtenden Stoffs innerhalb eines bestimmten Zeitraums in einem geographisch bestimmten Bilanzraum	VDI 4631, S. 14
Material	Stoff oder Stoffgemisch, der oder das für die Herstellung von Produkten bestimmt ist; dies umfasst sowohl Rohstoffe als auch höher verarbeitete Stoffe und Stoffgemische	VDI 4800 Blatt 1, S. 7
Materialintensität	Stoffliche Zusammensetzung eines Produkts	
Nutzungsdauer	Zeitspanne nach der Errichtung eines Gebäudes oder zusammengesetzten Bauteils in der dieses die technischen- und die funktionalen Anforderungen erfüllt oder übertrifft	EN 15643-1:2010, S. 16
OpenGIS	Open Geospatial Consortium (OGC)	Borrmann et al. 2015, S. 584
Primärrohstoff	Rohstoff, der durch Entnahme aus der Natur gewonnen wird	VDI 4800 Blatt 1, S. 8
Produkt	Unmittelbar angestrebtes Ergebnis eines Prozesses	DIN EN ISO 9000, S. 44
Produktsystem	Gesamtheit der mit einem Produkt über seinen gesamten Lebensweg in Verbindung stehenden Prozesse sowie der zugehörigen stofflichen und energetischen Flüsse	ISO 14044:2006, S. 4
Prozess	In Wechselwirkung stehende Tätigkeiten, der Eingaben (Input) zum Erzielen eines vorgesehenen Ergebnisses (Output)	DIN EN ISO 9000, S. 33
Prozessmodul	Kleinster in der Sachbilanz berücksichtigter Bestandteil, für den Input- und Output-Daten quantifiziert werden	EN ISO 14040:2006, S. 13

Reaktions- produkte	Endprodukte von chemischen Reaktionen, die bei der Abfallverbrennung hauptsächlich im Bereich der Abgasreinigung oder der Vorbehandlung von gefährlichen Abfällen entstehen (Bsp. Gips)	VDI 3925 Blatt 1, S. 5
Recycling	Rückgewinnungsprozess, durch den Abfallstoffe zu Produkten, Werkstoffen oder Stoffen wiederaufbereitet werden, die entweder ihrem ursprünglichen Zweck oder anderen Zwecken dienen	EN 15643-1:2010, S. 14
Referenz- Nutzungsdauer (RSL)	Nutzungsdauer, die unter der Annahme von bestimmten Nutzungsbedingungen, z. B. Standardnutzungsbedingungen, für ein Bauprodukt zu erwarten ist. Die RSL kann als Grundlage für die Abschätzung der Nutzungsdauer unter anderen Nutzungsbedingungen dienen	DIN EN 15804:2014-07, S. 10
Ressource	Mittel, das in einem Prozess genutzt wird oder genutzt werden kann	VDI 4800 Blatt 1, S. 5
Ressourceneffizienz	Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz	VDI 4800 Blatt 1, S. 5
Ressourcennutzung	Jeglicher Zugriff des Menschen auf Ressourcen	VDI 3925 Blatt 1, S. 5
Ressourcenschonung	Sparsame Nutzung natürlicher Ressourcen mit dem Ziel der Erhaltung ihrer Menge und Funktion	VDI 4800 Blatt 1, S. 9
Ressourcenverbrauch	Form der Ressourcennutzung, bei der die Ressourcen so umgewandelt werden, dass sie einer erneuten Nutzung nicht mehr zur Verfügung stehen	VDI 3925 Blatt 1, S. 5
Rohstoff	Stoff oder Stoffgemisch in unbearbeitetem Zustand, der/das in einen Produktionsprozess eingeht oder eingehen kann	VDI 3925 Blatt 1, S. 5
Schadstoff	Gefährlicher Stoff im Sinne der GefStoffV und biologischer Arbeitsstoff im Sinne der BiostoffV	VDI 6210 Blatt 1, S. 7
Sekundärrohstoff	Abfall oder Produktionsrückstand, aus dem Material gewonnen werden kann	VDI 3925 Blatt1, S. 6
Semantik	Bedeutung einer Folge von Zeichen, Symbolen, Daten oder Informationen	Borrmann et al. 2015, S. 584
Senke (1)	Endpunkt von Stoffströmen	VDI 4800 Blatt 1, S. 10
Senke (2)	Aufnahmefunktion der Natur, z. B. für Schadstoffe	VDI 4800 Blatt 1, S. 10

Stoff	Sammelbezeichnung von Elementen, Substanzen, Rohstoffen und Materialien	Brunner und Rechberger 2004, S. 3
Stoffintensität	Siehe Materialintensität	
Stoffstrom	Gerichtete Bewegung von Stoffen	UBA, S. 34
Stoffstrommanagement	Zielorientierte, verantwortliche, ganzheitliche und effiziente Beeinflussung von Stoffströmen oder Stoffsystemen. Die Zielvorgaben kommen in der Regel aus dem ökologischen bzw. dem ökonomischen Bereich, zudem werden soziale Aspekte berücksichtigt	Günther 2018, S. 1
Synthetische Gebäude	Diese spiegeln die für eine bestimmte Gebäudeart (z. B. Mehrfamilienhaus) und ein bestimmtes Baualter (z. B. bis 1918) vorherrschenden Bauweisen, Baukonstruktionen, Bauelemente und Baustoffe wider	Gruhler und Böhm 2011
Verwertung	Jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis Abfälle und Rückstände innerhalb einer Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie andere Materialien ersetzen, die ansonsten zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen	§ 3 Abs. 23 KrWG
Vorgesehene Lebensdauer	Vom Planer vorgesehene Nutzungsdauer	DIN EN 15978:2012-01, S. 9
Wiederverwendung	Jeder Arbeitsgang, durch den Produkte oder Komponenten, die nicht als Abfall gelten, entweder erneut für den Zweck, für den sie ursprünglich entwickelt wurden, oder aber ohne Wiederaufbereitung für andere Zwecke verwendet werden	EN 15643-1:2010, S. 15

A Anhang Baustoffe - Ergänzende Erhebung

Die hier aufgeführten Werte ergänzen die Erhebung in Kapitel 3.

A.1 Natursteine

Natursteine finden eine vielseitige Verwendung im Bauwesen, sei es in natürlicher Form oder als Ausgangsmaterial für die Herstellung anderer Baustoffe. Eine Übersicht der Einsatzbereiche ist in Abbildung A.1 dargestellt.

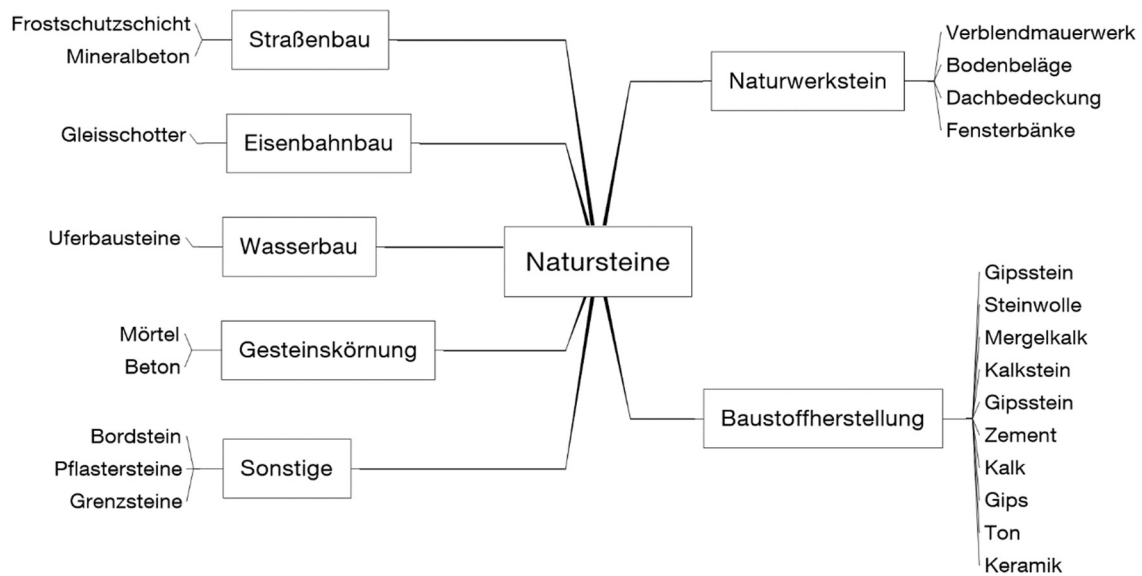


Abbildung A.1: Verwendung von Natursteinen im Bauwesen

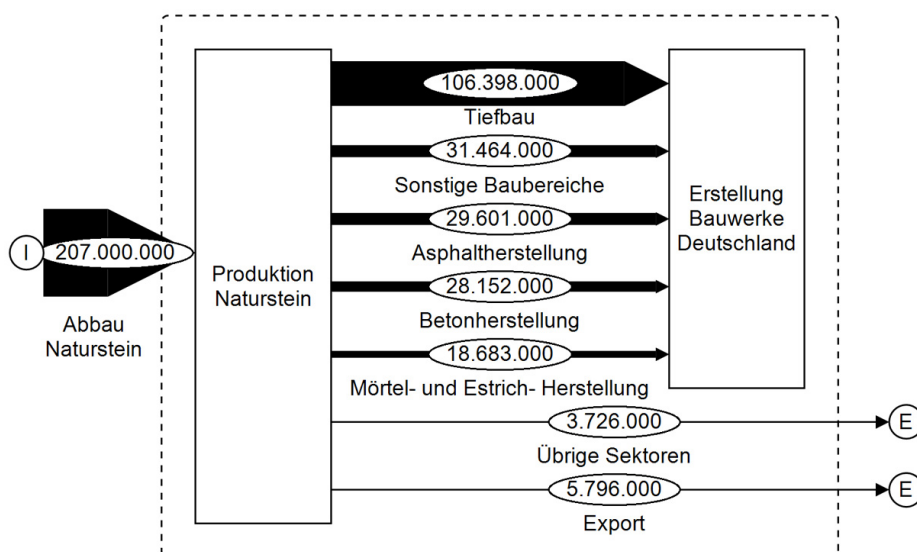


Abbildung A.2: Verwendung von Naturstein (in Tonnen) (Eigene Berechnungen nach BBS 2016, S. 26f.)

Mengenmäßig wurden 2013 rund 207 Mio. t (2,6 t/Person) bereitgestellt (BBS 2016, S. 26f) wovon mehr als 95 % im Bauwesen, überwiegend im Tiefbau, eingesetzt worden sind (Abbildung A.2).

A.1.1 Kalkstein und Dolomitstein

Insgesamt wurden 2013 rund 23,7 Mio. t Kalk und Dolomitstein produziert (BBS 2016, S. 27f). Diese Fraktion wird in jeweils zwei Unterkategorien (ungebrannt und gebrannt) aufgeteilt, die jeweils 50 % des Gesamtaufkommens ausmachen. Die jeweiligen Stoffströme und -mengen, die im Bauwesen Verwendung finden, sind in Abbildung A.3 und Abbildung A.4 dargestellt.

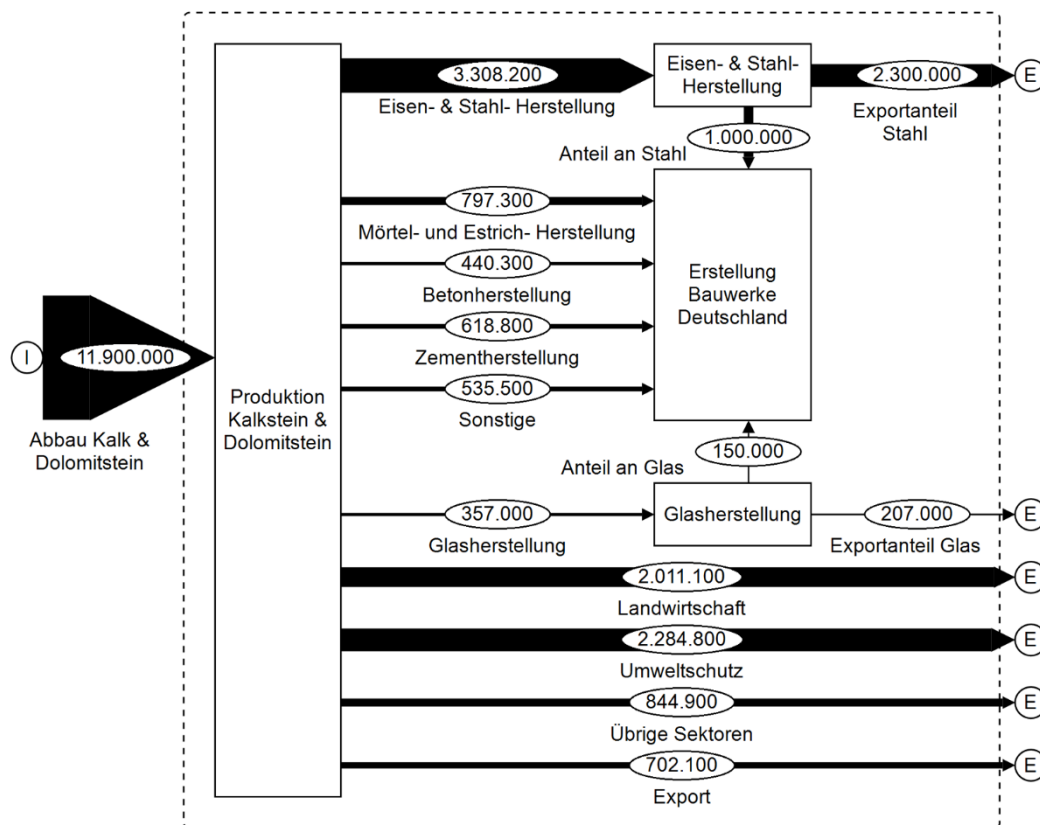


Abbildung A.3: Verwendung von Kalk und Dolomitstein (in Tonnen) (Eigene Berechnungen nach BBS 2016, S. 28f.)

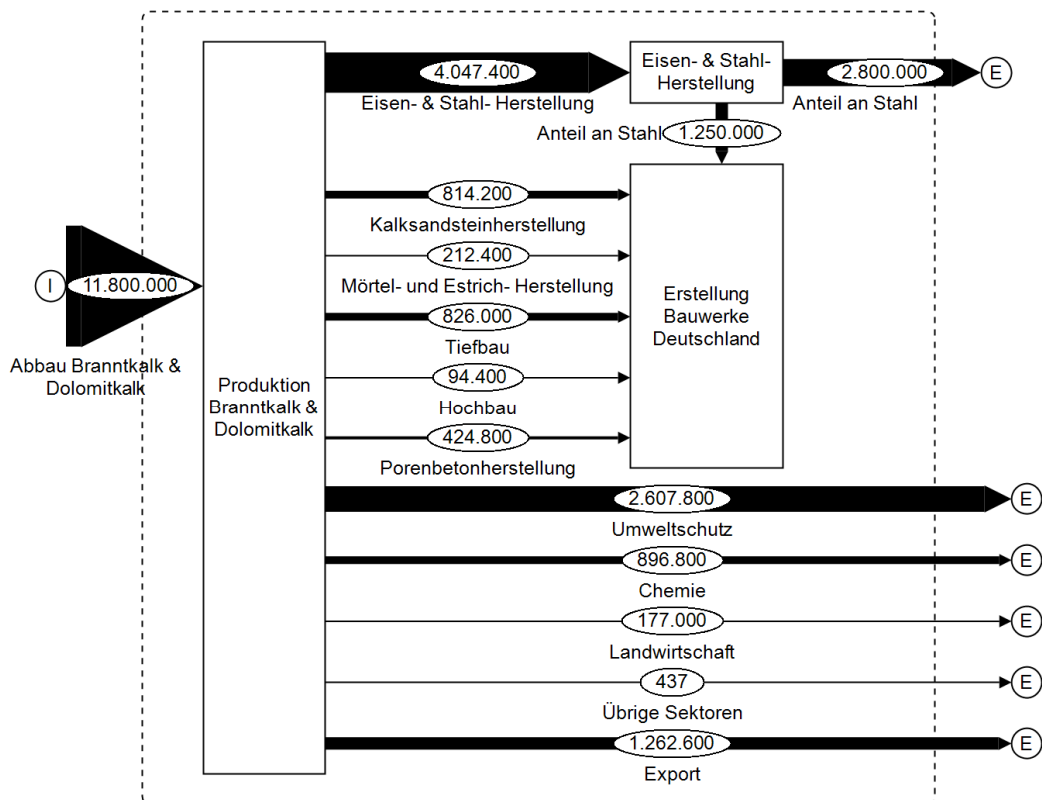


Abbildung A.4: Verwendung von Brantkalk und Dolomitkalk (in Tonnen) (Eigene Berechnungen nach BBS 2016, S. 29f.)

Zusammenfassend wurden 2013 im Bauwesen rund 3,5 Mio. t Kalk- und Dolomitstein in ungebrannter Form und rund 3,6 Mio. t in gebrannter Form verwendet. Der Anteil, der für chemische Erzeugnisse im Bauwesen verwendet wurde, kann nicht ermittelt werden, da die Datenlage diesbezüglich nicht ausreicht.

A.1.2 Gipsstein und Anhydritstein

Gipsprodukte finden im Bauwesen beispielsweise ihre Anwendung in der Herstellung von Gipskartonplatten, Spachtelmassen, Estrichen, keramischen Erzeugnissen (z. B. Waschbecken) und werden auch als Zusatzstoff in der Zementherstellung verwendet.

Insgesamt wurden 2013 rund 4,5 Mio. t Gips und Anhydrit gefördert (BBS 2016, S. 32). Neben Naturgips kommt auch der sogenannte REA-Gips zum Einsatz, der als Nebenprodukt in Rauchgasentschwefelungsanlagen von Kraftwerken anfällt. 2014 fielen davon rund 7 Mio. t an. 2015 wurden daraus rund 224,4 Mrd. m² Gipskartonplatten und 28 Mrd. m² Gipsfaserplatten hergestellt, die hauptsächlich im Hochbau verwendet wurden (Destatis 2016). Die Stoffströme und -mengen sind in Abbildung A.5 dargestellt.

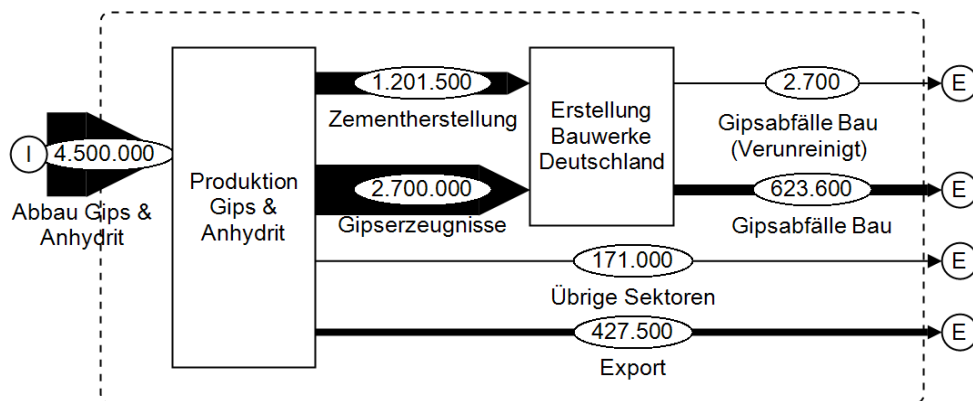


Abbildung A.5: Verwendung von Gips und Anhydrit (in Tonnen) (Eigene Berechnungen nach BBS 2016, S. 32, Destatis 2016.)

Aufgrund energiepolitischer Entscheidungen (z. B. zurückfahren von Kohlekraftwerken) kann es zu Verschiebungen bzw. zu einem Wegfall von REA-Gips-Stoffströmen kommen. Die Gipsindustrie ist daher angewiesen, neue Lagerstätten zu erkunden und zu erschließen, um weiterhin ausreichend Rohstoffe für die Produktion zur Verfügung zu haben. Die 0,6 Mio. t, die jährlich als Bauabfälle anfallen, können diesen Bedarf nicht decken.

Gips ist, solange die Sortenreinheit gewährleistet ist, ein ideales Kreislaufprodukt. In Deutschland existieren derzeit zwei stationäre Recyclinganlagen (Sachsen und Baden-Württemberg), die gipshaltige Bau- und Produktionsabfälle wiederaufbereiten (Buchert et al. 2017, S. 47). Das Projekt *GtoG* (Gypsum to Gypsum) beispielsweise beschäftigt sich ausführlich mit der Kreislaufführung dieser Stoffe.

A.2 Zusammenfassung Baustoffe Gesamt

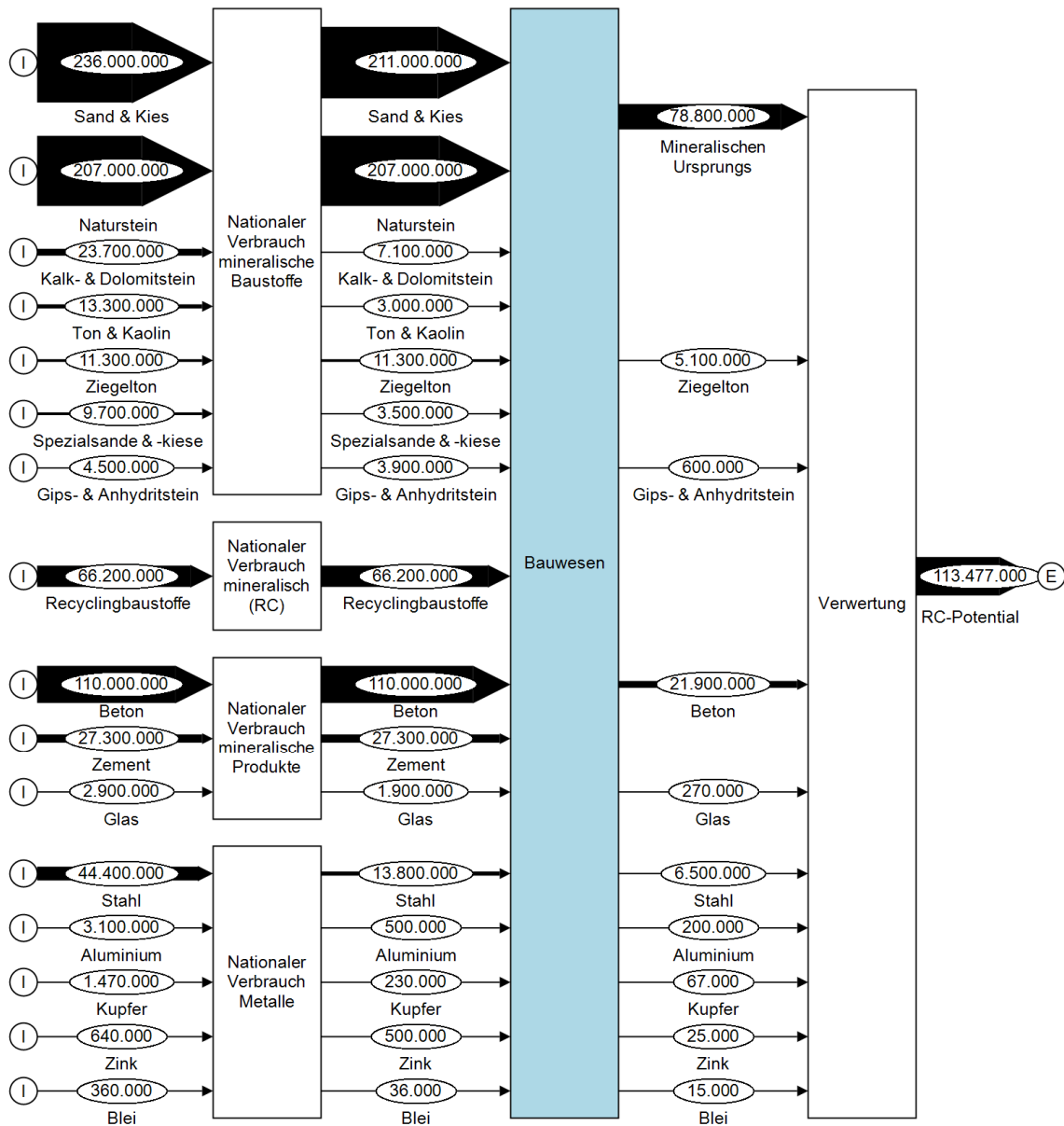


Abbildung A.6: Zusammenfassung von verwendeten Stoffen im Bauwesen (pro Jahr)

B Fallbeispiel Mehrfamilienhaus 1962

Zur Ermittlung stofflicher Daten und der Bildung von Kennwerten wurde eine detaillierte Bestandsaufnahme eines Mehrfamilienhauses (MFH) in Ziegelbauweise (Baujahr 1962) durchgeführt. Das Gebäude befindet sich im Münchner Stadtgebiet. Begründet wird diese Wahl damit, dass MFH in dieser Baualtersklasse den gängigsten Gebäudetypen in den untersuchten Räumen darstellen (Anzahl, Fläche und Volumen). Ein weiterer Grund ist die Abschätzung des Erhebungsaufwands, das Vorhandensein von detaillierten Unterlagen (Plänen, Rechnungen u.a.), sowie der bereits vorhandene Austausch mit Eigentümern und Erbauern. Die Gliederung der Auswertung ist an die DIN EN 276 angelehnt.

B.1 Gebäudedaten

Die relevanten Gebäudedaten, die die Basis für folgende Berechnungen liefern, sind in Tabelle B.1 aufgeführt.

Tabelle B.1: Gebäudedaten – MFH Baujahr 1962 München

Basisdaten		Volumen und Flächen		Kennwerte	
Baujahr	1962	BGF (m ²)	5.586	KGf / BGF	0,11
Baukonstruktion	Ziegel	Nutzfläche (m ²)	4.369	BRI / BGF (m)	2,65
Anzahl WE	53	KGf (m ²)	616	BGF / WFL	1,55
Anzahl Bewohner	75	BRI (m ³)	14.776	WFL / BGF	0,64
Ø Wohnfläche (m ² /Person)	48	Wohnfläche (m ²)	3.600		
		Geschoßhöhe (lichte in m)	2,63		

Im Rahmen der Arbeit wurde ein 3D-Gebäudemodell (LoD 4) aus Bestandsplänen und Vor-Ort-Aufnahmen erstellt (Abbildung B.1). Durch den gewählten Detailierungsgrad sind die Gebäudeöffnungen und der Innenraum dargestellt. Das Modell war hilfreich, da beispielsweise Flächen und Volumen vereinfacht abgeleitet werden konnten. Die Ansicht zeigt den Innenraum, mit ausgeblendetem Dach. Abbildung B.2 zeigt eine bildliche Darstellung aus Google Earth. Wie in Kapitel 2 beschrieben, kann das LoD 4 Gebäudemodell in ein gängiges Stadtmodell (z. B. CityGML) importiert werden.



Abbildung B.1: Auszug aus dem 3D-Gebäudemodell (Eigene Darstellung)



Abbildung B.2: Darstellung des Gebäudes in Google Earth

B.2 Gründung (KG 320) und Keller

Die Bodenplatte und Kellerwände sind aus Stahlbeton. Der Stahlanteil wurde aus den vorhandenen Bewehrungsplänen ermittelt.

B.2.1 Fundament

Tabelle B.2: Stoffliche Kennwerte des Fundaments

Baustoff	Masse (kg)	Stoffintensität		
		kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Stampfbeton	155.376	27,8	10,5	2071,7

B.2.2 Bodenplatte und Kellerwände

Die Bodenplatte hat einen Stahlanteil von 6,3 % (Kellerwände 5,8 %).

Tabelle B.3: Stoffliche Kennwerte der Bodenplatte und Kellerwänden

Bauteil	Material	Volumen (m ³)	Masse (kg)	Stoffintensität		
				kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Bodenplatte	Beton	279	669.240	119,8	45,3	8.923
	Stahl		41.828	7,5	2,8	558
Kellerwände	Beton	273	654.584	117,2	44,3	8.728
	Stahl		38.184	6,8	2,6	509

B.3 Baukonstruktion – Außen- (KG 330) und Innenwände (KG 340)

Die Außen- und Innenwände sind aus Hochlochziegel. Die Außenwand Konstruktion besteht aus einem für die Zeit üblichen Standard Hochlochziegel (365 mm Dicke; Rohdichte von 1400 kg/m³). Mit einem Innenputz (15 mm) und einem Außenputz (20 mm), ergibt dies eine Gesamtaußenwandstärke von 400 mm (Abbildung B.3).

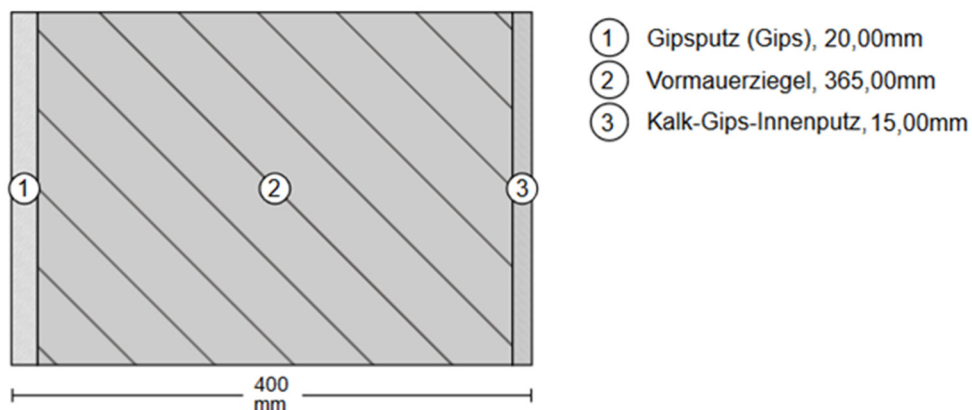


Abbildung B.3: Bauteilaufbau der Außenwand

Die Innenwände hingegen weisen unterschiedliche Wandstärken auf. Die Innentüröffnungen, wurden aus den Plänen entnommen und vor Ort vermessen. Ebenso wurden die Türzargen (Stahl) aufgenommen (Tabelle B.4).

Tabelle B.4: Stoffliche Kennwerte der Außen- und Innenwände

Bauteil	Baustoff	Volumen (m ³)	Masse (kg)	Stoffintensität		
				kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Türzargen	Stahl	0,4	3.474	0,6	0,2	46
Außenwand	Ziegel	385,0	538.944	96,5	36,5	7.186
	Mörtel (10 %)	38,5	69.293	12,4	4,7	924
			1.192.80			
Innenwand	Ziegel	852,0	0	213,5	80,7	15.904
	Mörtel (10 %)	85,2	153.360	27,5	10,4	2.045
Putz	Kalkgipsputz	150,3	165.330	29,6	11,2	2.204

Das Verhältnis der Innenwandöffnungsanteile (z.B. Türen) zur Gesamtinnenwandfläche (in m²) ergab **10 %**. Der Volumenanteil (m³) der Außenwände beträgt **31 %** des Gesamtvolumens der Außen- und Innenwände. Die Masse der Innenwände ist zweimal so hoch wie die der Außenwände.

B.3.1 Balkonbrüstungen – Loggias

Die Kennwerte der Loggias sind in Tabelle B.5 dargestellt. Der Stahlanteil wurde den Bewehrungsplänen entnommen.

Tabelle B.5: Stoffliche Kennwerte der Balkonbrüstungen (Loggias)

Baustoff	Volumen (m ³)	Masse (kg)	Stoffintensität		
			kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Beton	32,4	77.760	13,9	5,3	1.037
Stahl		3.240	0,6	0,3	43

B.3.2 Rückbaupotentiale

Beim Rückbau der Innen- und Außenwände fällt hauptsächlich mineralischer Bauschutt an. Durch die Verunreinigung mit Mörtel, Putz und Wandfarben können die Fraktionen nicht sortenrein erfasst werden. Es ist daher nötig, das Material zu brechen und anschließend zu sortieren. Die metallischen Fraktionen der Unterputzleitungen können mit Hilfe von Metallausscheidern erfasst werden (Abbildung B.4).



Abbildung B.4: Aussortierung von Metallfraktionen und Verunreinigungen in Bauschuttfraktionen (Eigene Bilder)

B.3.3 Baukonstruktion – Außentüren und Fenster (KG 334)

Der Öffnungsanteil der Außenwände ist nicht mit der Fensterfläche gleichzusetzen, da der Rahmenanteil der Fenster und Brüstungen ebenfalls berücksichtigt werden muss.

B.3.3.1 Geometrische Kennwerte

Die abgeleiteten Flächenkennwerte sind in Tabelle B.6 aufgezeigt. Die Daten wurden vor Ort vermessen.

Tabelle B.6: Flächenkennwerte für Außentüren und Fenster

	Fläche (m ²)	Verhältnis (Anteil)				
		Außenwände	Fassadenöffnung	Glasanteil	Fensterrahmen	Außentüren
Außenwände	2.017,4	100%	41,2%	25,6%	14,5%	1,1%
Fassadenöffnung	830,8	-	100%	62,2%	35,2%	2,6%
Davon:						
Glasanteil	516,5	-	-	100%	56,7%	4,2%
Fensterrahmen	292,8	-	-	-	100%	7,3%
Außentüren	21,5	-	-	-	-	100%

Der Öffnungsanteil der Außenwände beträgt 41,2%, wobei der Glasflächenanteil bei 25,6 % der Außenwandfläche liegt. Die restlichen Bestandteile der Fassadenöffnungen setzen sich aus dem Rahmenanteil der Fenster (14,5%), sowie den Außentüren (1,1%) zusammen. Der Fensterflächenanteil, bestehend aus Rahmen und Glas, beträgt somit 40,1%.

B.3.3.2 Massen und stoffliche Kennwerte

Die 2-Scheiben Holzfenster von 1962, wurden 1998 im gesamten Gebäude gegen 2-Scheiben PVC Fenster mit Isolierverglasung ausgetauscht. Insgesamt sind im ganzen Gebäude 330 Fenster verbaut, die aus 7,7 t Glas und 4,1 t PVC bestehen (Tabelle B.7). Die Zusammenfassung der stofflichen Kennwerte der Fensterbeschläge sind in Tabelle B.8 dargestellt. Die Berechnung erfolgte durch Wiegen und Messen der Bestandteile. Insgesamt sind im Gebäude 530,6 kg Stahl, 9,9 kg Edelstahl und 23,1 kg Aluminium in den Fensterbeschlägen gebunden.

Tabelle B.7: Stoffliche Kennwerte der Fenster

Baustoff	Fläche (m ²)	Volumen (m ³)	Masse (kg)	Stoffintensität		
				kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Glas	516,5	3,1	7.748	1,4	0,5	103,3
Rahmen (PVC)	292,8	2,9	4.100	0,7	0,3	54,7

Tabelle B.8: Stoffliche Kennwerte der Fensterbeschläge

Beschläge	Baustoff	Masse (kg)	
		Einzel	Gesamtgebäude
Fenstergriff	Komposit	0,1	33
davon:			
Griff	Aluminium	0,07	23,1
Dorn	Stahl	0,03	9,9
Befestigung	Edelstahl	0,03	9,9
Rasterbeschläge	Stahl	-	462,7
Scherenbeschläge	Stahl	-	58,0

B.3.3.3 Rückbaupotentiale

Die Fenster können auf der Baustelle sortenrein erfasst werden, um im Recyclingwerk in ihre Bestandteile zerlegt zu werden. Das Glas kann zur Herstellung von Behälterglas, Mineralwolle oder für Schüttungen verwendet werden. Aus dem sortenrein gewonnenen PVC können Sekundärkunststoffe hergestellt werden. Verunreinigtes PVC wird thermisch verwertet. Per Metallabscheider können Metalle aussortiert werden. Eine erneute Verwendung der Fenster (z. B. Baustoffbörsen) stellt keine sinnvolle Lösung dar, da der U-Wert nicht mehr den heutigen Stand der Technik erfüllt.

B.3.4 Baukonstruktion – Innentüren und Fenster (KG 344)

Insgesamt sind in den Wohneinheiten 240 Holztüren in Sandwichbauweise verbaut. Diese unterscheiden sich jedoch in ihren Maßen. Die Tür-Zargen bestehen aus Stahl (Tabelle B.9 und Tabelle B.10).

B.3.4.1 Massen und stoffliche Kennwerte

Tabelle B.9: Stoffliche Kennwerte der Türen und Zargen

Bauteil	Baustoff	Masse (kg)	kg/m ² _{BGF}	Stoffintensität	
				kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Türzargen	Stahl	3.474	0,62	0,24	46,3
Türen	Holz (Sandwich)	2.880	0,52	0,19	38,4
Brandschutztüren	Stahl	540	0,1	0,04	7,2

Tabelle B.10: Stoffliche Kennwerte der Türgriffe und Beschläge

Bauteil	Baustoff	Masse		Stoffintensität		
		(kg)	(g)	g/m ² _{BGF}	g/m ³ _{BRI}	g/Person
Türgriffe	Aluminium	50,4	50.400	9	3	672
	Stahl	13,2	13.200	2	1	176
Beschläge	Aluminium	60	60.000	11	4	800
	Stahl	24	24.000	4	2	320

Im Verhältnis zur Innenwandfläche beträgt der Anteil der Türöffnung **10 %**.

B.3.4.2 Rückbaupotentiale

Die Türen können bei einem Rückbau einer thermischen Verwertung zugeführt werden. Ebenso könnten diese auch auf Bauteilbörsen aufbereitet werden und einer erneuten Nutzung in Gebäuden zugeführt werden. Dies setzt allerdings voraus, dass die Türstöcke- und Zargen in einem Neubau den entsprechenden Maßen angepasst werden.

Die Stahlzargen sind fest mit dem Mauerwerk verbunden. Es ist unwahrscheinlich, dass diese zerstörungsfrei ausgebaut werden können. Der Stahlschrott kann daher einer stofflichen Verwendung zugeführt werden.

Die Brandschutztüren (feuerverzinktem Stahl) können zerstörungsfrei ausgebaut werden. Neben einer direkten Wiederverwendung können diese auch stofflich verwertet werden.

Die Türgriffe und Beschläge können weiterverwertet oder stofflich verwertet werden. Der Ausbau ist schnell und unproblematisch.

B.4 Baukonstruktion – Decken (KG350)

Die Deckenkonstruktion besteht aus 170 mm Stahlbeton, sowie einer 30 mm Schicht Zementestrich (Abbildung B.5). Der Stahlanteil wurde aus den Bewehrungsplänen ermittelt. Insgesamt sind 4 Decken, der gleichen Bauart vorhanden. Die Öffnungen für

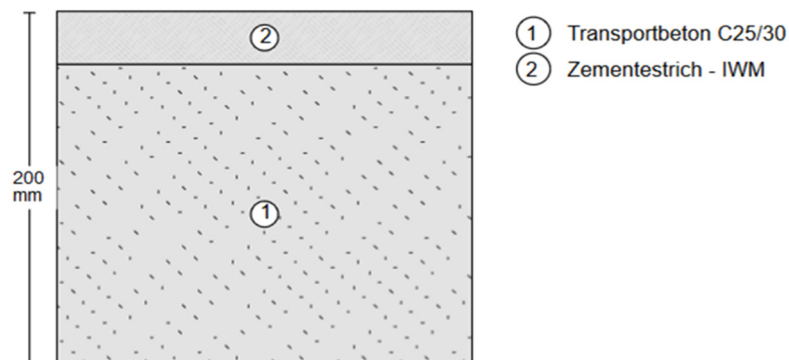


Abbildung B.5: Bauteilaufbau der Decken

die Treppenhäuser wurden abgezogen. Das ursprüngliche Stahlbeton Flachdach, das 1984 mit einem Dachstuhl aufgestockt wurde, hat eine Stärke von 270 mm (Tabelle B.11). Der Stahlanteil der Betondecken beträgt 6,5 %.

Tabelle B.11: Stoffliche Kennwerte der Decken

Baustoff	Volumen (m ³)	Masse (kg)	Stoffintensität		
			kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Beton	418	1.003.642	180	68	13.382
Estrich	54	107.562	19,3	7,3	1.434
Stahl		54.364	9,7	3,7	725

B.4.1 Fußboden- und Wandverkleidungen

Die Bodenbeläge der Wohneinheiten sind verschieden. Überwiegend sind Parkettböden und Vollholzdielen verlegt. Die ursprünglich mehr als 3.000 m² asbesthaltigen Floor-Flex-Platten, wurden im Laufe der Jahre ausgetauscht und sachgemäß entsorgt (gefährlicher Abfall).

Die Bäder sind an Wänden und Böden gefliest und werden gesamtheitlich ausgewiesen (Tabelle B.12). In den Treppenhäusern sind Betonsteine verlegt.

Tabelle B.12: Stoffliche Kennwerte der Fußboden- und Wandbekleidungen

Baustoff	Volumen (m ³)	Masse (kg)	Stoffintensität		
			kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Fliesen	8,0	21.673	3,9	1,5	289
Fliesenkleber	3,0	5.117	0,9	0,3	68
Fugenmasse	1,0	1.505	0,3	0,1	20
Holz (Parkett und Vollholz)	3,6	2.000	0,4	0,1	26
Betonsteine (Treppenhaus)	10,8	26.016	5	2	347

B.4.2 Rückbaupotentiale

Abbruchbedingt würden die Stahlbetondecken zusammen mit den Ziegel Außenwänden abgerissen werden, was unausweichlich zu einem Bauschutt-Gemisch führt (Abbildung B.4). Eine Teilsortierung kann bereits während des Rückbaus erfolgen. Verlustfraktionen (z. B. Verunreinigungen) sind unvermeidbar. Bauschuttfraktionen können nachträglich weiter sortiert werden, um den Anteil an reinem Bauschutt (Mischfraktion) zu reduzieren.

Der Stahl lässt sich per Magnetabscheider und während des Rückbaus aussortieren. Eine händische Entfernung von Fliesen ist, bedingt durch den hohen Aufwand, wirtschaftlich nicht vertretbar. Diese müssen samt Anhaftungen (z. B. Kleber, Fugenmaterial) als Bauschutt entsorgt werden.

Die Holzböden (Parkett und Dielen) sind gänzlich fließend verlegt (d.h. nicht mit dem Estrich verklebt). Daher können diese, unkompliziert händisch zurückgebaut werden. Während beim Klickparkett ein Teil des Bodens zerstörungsfrei wiedergewonnen werden kann, ist bei verleimten Bodenbrettern ein zerstörungsfreier Ausbau kaum möglich. Daher würde ein Großteil des Holzes einer thermischen Verwertung zukommen.

B.5 Baukonstruktion – Dächer (KG 360)

Durch Aufstellen eines Dachstuhls 1994 wurden rund 700 m² zusätzliche Wohnfläche geschaffen. Ebenfalls konnten durch die entstandenen Dachüberstände auch feuchtetechnische Probleme (z. B. Verhindern von Schlagregen an der Fassade; Ablaufen von Wasser von Flachdach) gelöst werden. Durch diese Maßnahme konnten die Lebensdauer und die Intervalle der Instandhaltungsmaßnahmen der entsprechenden Bauteile (z. B. Fassade, Flachdachabdichtung) verlängert werden. Zur stofflichen Ermittlung wurden die Baupläne ausgewertet und Interviews mit den Bauherren geführt, die gleichzeitig die bauausführende Zimmerei (Zimmerei Wilhelm Heinrich GmbH) war. Die Anzahl der Nägel wurde Anhand der Verbindungen im Dachstuhl, Schalung und Lattung abgeleitet (Tabelle B.13 und Tabelle B.14).

B.5.1 Dächer Gesamt

Zur stofflichen Ermittlung wurden die Baupläne ausgewertet und Interviews mit den Bauherren geführt, die gleichzeitig die bauausführende Zimmerei (Zimmerei Wilhelm Heinrich GmbH) war. Die Anzahl der Nägel wurde Anhand der Verbindungen im Dachstuhl, Schalung und Lattung abgeleitet.

Tabelle B.13 Stoffliche Kennwerte des Dachs (nach Bauteil / Gewerk)

Bauteil	Baustoff	Masse (kg)	Stoffintensität		
			kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Dachstuhl	Holz	29.008	5,19	1,96	387
Schalung	Holz	14.393	2,58	0,97	192
Lattung	Holz	3.722	0,67	0,25	50
Decke	Holz	7.512	1,34	0,51	100
Nägel	Stahl	100	0,02	0,01	1,3
Bleche	Titanzink	500	0,09	0,03	6,7
Dachpfannen	Ziegel	82.937	14,85	5,61	1.106
Dämmung	Mineralwolle	21.991	3,94	1,49	293
Schweißbahn	Bitumen	4.340	0,78	0,29	58
Gipskarton	Gips	19.905	3,56	1,35	265
Ständerprofile	Aluminium	1.275	0,23	0,09	17
Dachrinnen	Titanzink	224	0,04	0,02	3,0
Fallrohre	Titanzink	166	0,03	0,01	2,2
Gauben					
Fenster	Glas	396	0,07	0,03	5,3
Rahmen	Holz	290	0,05	0,02	3,9
Blech	Stahl	950	0,17	0,06	13
Dachflächenfenster					
Fenster	Glas	252	0,05	0,02	3,4
Rahmen	Holz	240	0,04	0,02	3,2

Tabelle B.14: Stoffliche Kennwerte des Dachs (nach Baustoff)

Baustoff	Masse (kg)	Stoffintensität		
		kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Aluminium	1.275	0,23	0,09	17
Bitumen	4.340	0,78	0,29	58
Gips	19.905	3,56	1,35	265
Glas	648	0,12	0,04	9
Holz	55.165	9,88	3,73	736
Mineralwolle	21.991	3,94	1,49	293
Stahl	1.050	0,19	0,07	14
Titanzink	891	0,16	0,06	12
Ziegel	82.937	14,85	5,61	1.106
Gesamt	188.202	34	13	2.509

B.5.2 Rückbaupotentiale

Der Abbruch des Dachstuhls wird unabhängig der ursprünglichen Gebäudekonstruktion durchgeführt. Dachziegel, Bleche, Rinnen können sortenrein und ohne zusätzlichen Aufwand abgebaut werden.

Früher wurden noch viele Balken und Bretter per Hand ausgenagelt, um sowohl die Nägel als auch das Holz einer hochwertigen Verwertung zufließen zu lassen. Diese



Abbildung B.6: Nachträglicher Einbau von Dachgauben und Vor-Ort-Sortierung von Holzfraktionen (Eigene Bilder)

Vorgehensweise ist oft nicht wirtschaftlich und daher werden der Dachstuhl (incl. Lattung und Schalung) einer thermischen Verwertung zufließen. Teilweise können Balken wiederverwendet werden, vorausgesetzt es wurden keine schadstoffhaltigen Holzschutzmittel (laut AltholzV) verwendet und Schrauben und Nägel wurden entfernt (Abbildung B.6). Eine Wiederverwendung von Nägeln und Schrauben scheidet allein aus wirtschaftlichem Grund aus.

Ein Teil des Stahls (Nägel etc.) kann aus der Schlacke der Verbrennungsanlage zurückgewonnen werden. Dieser Prozess ist allerdings nicht ohne Verluste durchzuführen.

Die Fenster können ausgebaut werden, um gesondert entsorgt und demontiert zu werden. Dennoch ist es wahrscheinlich, dass durch den Ausbau einige der Elemente zerstört werden. Es ist davon auszugehen, dass Teile des Glases zusammen mit dem Bauschutt entsorgt werden müssen (Siehe auch KG 344).

Die Mineralwolle kann sortenrein entfernt werden, da es sich um eine Zwischensparrendämmung handelt, die leicht auszubauen ist. Es gilt zu beachten, dass Künstliche Mineralfasern (KMF), krebserregende Stoffe enthalten können und gesondert behandelt werden müssten. KMF können je nach Kanzerogenindex (KI), ähnliche Wirkungen wie Asbest zeigen (Bogusch und Brandhorst 2013, S. 66f). Für die Bestimmung des KI sind labortechnische Untersuchungen notwendig.

Für KMF findet eine stoffliche Verwertung derzeit nicht statt und eine energetische Verwertung ist nicht möglich. Seit Juni 2000 sind sortenreine KFM deponierbar. Mit anteiligen Bauschutt ist eine Deponierung nur im Einzelfall zulässig (Bogusch und Brandhorst 2013, S. 67f). Allerdings ist eine Schadstoffbegehung unabdinglich, bevor eine verbindliche Aussage getroffen werden kann.

B.6 Baukonstruktive Einbauten (KG 370)

Die Treppengeländer sind aus Stahl (Tabelle B.15). Der Stahl kann nach einem Rückbau sortenrein erfasst und einer stofflichen Verwertung zugeführt werden. Die Treppengeländer lassen sich durch einen Winkelschleifer (Trennschleifer) problemlos von den Treppenstufen abtrennen.

Tabelle B.15: Stoffliche Kennwerte der Treppengeländer

Bauteil	Masse (kg)	Stoffintensität		
		kg/m ² _{BGF}	kg/m ² _{BRI}	kg/Person
Treppengeländer (Stahl)	721	0,13	0,05	9,6

B.7 Technische Anlagen – Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen (KG 410)

Die Wasserleitungen sind, wie üblich zu der Zeit, aus Stahl. Der gemessene Leitungsdurchmesser liegt bei 21 mm in den Wohnräumen und 50 mm bei den Verteilungsleitungen. Original TGA- und Leitungspläne wurden ausgewertet.

B.7.1 Geometrische Kennwerte

Die ermittelten Leitungskennwerte sind in Tabelle B.16 dargestellt. Allein bei den Wasserleitungen sind rund $0,1 \text{ m/m}^2_{\text{BGF}}$ verbaut. Bei den Abwasserleitungen $0,05 \text{ m/m}^2_{\text{BGF}}$.

Tabelle B.16: Abmessungen und Kennwerte der Wasserver- und -entsorgung

Art	Ø (mm)	Länge (m)	Leitungskennwerte		
			$\text{m/m}^2_{\text{BGF}}$	$\text{m/m}^3_{\text{BRI}}$	m/Person
Wasserleitungen					
Wohnung	21	261	0,05	0,02	3,5
Verteilungsleitungen	50	282	0,05	0,02	3,8
Gesamt		543	0,10	0,04	7,2
Abwasser Steigleitungen					
	125	256	0,05	0,02	3,4

B.7.2 Massen und stoffliche Kennwerte

Mit einer Masse von mehr als 4 t Stahl stellen Heizungsrohre ein bedeutendes Rohstofflager dar (Tabelle B.17).

Tabelle B.17: Stoffliche Kennwerte der Wasserver- und -entsorgung

Bauteil	Masse (kg)	Stoffintensität		
		$\text{kg/m}^2_{\text{BGF}}$	$\text{kg/m}^3_{\text{BRI}}$	kg/Person
Wasserleitungen				
Wohnung	4.599	0,82	0,31	61,3
Verteilungsleitungen Keller	9.198	1,65	0,62	122,6
Gesamt	13.798	2,47	0,93	184,0
Abwasser Steigleitungen				
	4.218	0,76	0,29	56,2

B.7.3 Sanitäröbekte

Die Bade- und Duschwannen sind aus emailliertem Gusseisen. Die Toiletten und Waschbecken aus Keramik (Tabelle B.18).

Tabelle B.18: Stoffliche Kennwerte der sanitären Öbekte

Baustoff	Masse (kg)	Stoffintensität		
		$\text{kg/m}^2_{\text{BGF}}$	$\text{kg/m}^3_{\text{BRI}}$	kg/Person
Gusseisen	1.440	0,3	0,1	19,2
Keramik	1.056	0,2	0,1	14,1

B.7.4 Rückbaupotentiale

Die gusseisernen Badewannen lassen sich sortenrein ausbauen und können stofflich verwertet werden. Der Ausbau der sanitären Objekte wird nicht zerstörungsfrei erfolgen. Eine direkte Ausschleusung von keramischen Anteilen aus dem Bauschutt ist wünschenswert, da der Verunreinigungsgrad von Bauschutt für ein effektives Recycling maßgebend ist.

Während intakte Waschbecken auf Bauteilbörsen angeboten werden können, geht der Bedarf nach benutzten Toiletten, allein aus hygienischen Gründen, gegen null. Diese Fraktionen müssen derzeit als Bauschutt entsorgt werden.

Da die Metalleitungen fest in die Konstruktion eingebunden sind besteht die Möglichkeit, diese anhand von Magnetabscheidern aus dem Bauschutt auszusortieren. Dennoch lassen sich Anhaftungen von mineralischen Fraktionen nicht vermeiden. Sammlungsverluste von 5 % sind realistisch.

B.8 Technische Anlagen – Wärmeversorgungsanlagen (KG 420)

Die Heizungsrohre zu den einzelnen Wohnungen, sind aus Stahl und haben einen gemessenen Außendurchmesser von 25 mm und einen Innendurchmesser von 23 mm.

B.8.1 Geometrische Kennwerte

Die Gesamtlänge des Leitungsnetzes beträgt mehr als 2 km (Tabelle B.19).

Tabelle B.19: Abmessungen und Kennwerte der Heizungsrohre

Bauteil	Ø (mm)	Länge (m)	Leitungskennwerte		
			m/m ² _{BGF}	m/m ³ _{BRI}	m/Person
Heizungsleitungen					
Wohnung & Steigleitungen	22	1.254	0,22	0,08	16,7
Verteilungsleitungen	43	504	0,09	0,03	6,7
Hauptleitung	61	273	0,05	0,02	3,6
Gesamt		2.031	0,36	0,14	27,1

B.8.2 Massen und stoffliche Kennwerte

Mit insgesamt 3,5 t Stahl stellen Heizungsrohre eine bedeutende Rohstoffquelle dar (Tabelle B.20).

Tabelle B.20: Stoffliche Kennwerte der Heizungsrohre

Art	Masse (kg)	Stoffintensität		
		kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Heizungsleitungen				
Wohnung & Steigleitungen	1.237	0,22	0,08	16,5
Verteilungsleitungen	1.019	0,18	0,07	13,6
Hauptleitung	1.171	0,21	0,08	15,6
Gesamt	3.428	0,61	0,23	45,7

B.8.3 Heizkörper

Die Heizkörper sind aus Stahl (Tabelle B.21). Insgesamt sind 198 Heizkörper (3 unterschiedliche Typen) im Haus mit einer Gesamtmasse von 6,9 t installiert.

Tabelle B.21: Stoffliche Kennwerte der Heizkörper

Typ	Anzahl	Masse (kg)		Stoffintensität		
		Stück	Gesamt	kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Typ 1	144	40	5.760	1,03	0,39	76,8
Typ 2	48	20	960	0,17	0,06	12,8
Typ 3	6	35	210	0,04	0,01	2,8
Gesamt	198		6.930	1,24	0,47	92,4

Die Ölheizung wurde 1997 erneuert. Die Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung kann vor Ort nicht ermittelt werden und Datenblätter des Herstellers sind nicht vorhanden. Der Großteil der Masse ist metallischen Ursprungs. Vergleichbare Anlagen haben eine Masse von 150 - 200 kg.

Der 30.000 Liter Öltank aus Stahl hat eine Masse von rund 6 t. Öltanks müssen gesondert entsorgt und gereinigt werden, der Stahl kann anschließend stofflich verwertet werden.

B.8.4 Rückbaupotentiale

Die Heizkörper können händisch ausgebaut, getrennt erfasst und stofflich verwertet werden. Bei den Heizungsleitungen wird ähnlich verfahren wie bei den Wasser- und Abwasserleitungen.

B.9 Technische Anlagen – Starkstromanlagen (KG 430)

Die Starkstromanlagen und Steigleitungen wurden von 2005 bis 2015 im gesamten Gebäude erneuert. In etwa 20 % der Wohneinheiten (WE) wurden neue elektrische Leitungen verlegt. Daher liegen genaue Daten zu den verwendeten Materialien vor, die anhand Elektrikerrechnungen ausgewertet wurden. Durch die Aufstellung war es

möglich, den Kupferanteil der unterschiedlichen Kabel zu erheben. Insgesamt wurden 7 Einzelabrechnungen ausgewertet.

Für die erneuerten Leitungen in den WE wurden zwischen 150 - 230 g/m²_{BGF} Kupfer verwendet. Die einzelnen Werte weichen unwesentlich voneinander ab (Standard Abweichung 40 g/m²_{BGF}).

Inklusive Steigleitungen liegt die Kupferkonzentration des Gebäudes allein aus den elektrischen Leitungen bei rund **280 g/m²_{BGF}** (Tabelle B.22). Die Gesamtmasse beträgt 1.549 kg (20,7 kg/Person). Dazu kommen die bestehenden Unterputzleitungen, die ein „schlafendes Lager“ darstellen, da sie immer noch im Gebäude eingebunden sind und erst bei einem Rückbau freigesetzt werden. Die Länge des ursprünglichen Stromleitungsnetzes wurde mit rund 1200 - 1800 m geschätzt. Dies basiert auf einer Erhebung nach einzelnen Wohneinheiten. Es ist nicht immer nachvollziehbar wo die Leitungen exakt verlaufen, da Leitungen früher oft schräg verlegt worden sind um Material einzusparen. Der Kupferanteil des ursprünglichen Leitungsnetzes (zweipolig) wird daher auf unter 100 kg geschätzt.

Durch die Erneuerung des elektronischen Leitungsnetzes in Wohngebäuden muss, um gehobenen Ansprüchen der Nutzer gerecht zu werden sowie der Zunahme an elektronischen Geräten Rechnung zu tragen, demnach mehr als 15-mal mehr Kupfer verbaut werden als noch vor 50 Jahren.

B.9.1 Massen und stoffliche Kennwerte

Tabelle B.22: Stoffliche Kennwerte und Kupferanteil der elektrischen Leitungen

Bauteil	Stoffintensität	
	kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}
Leitungen pro WE	0,19	0,001
Steigleitungen	0,09	0,034
Gesamt	0,28	0,035

B.9.2 Rückbaupotentiale

Ein Großteil der Leitungen (insbesondere Steigleitungen) kann selektiv zurückgebaut werden, da leicht zugängliche Leitungsschächte angelegt worden sind. Die Unterputz-Leitungen können parallel zum Rückbau aussortiert werden oder aus dem Bauschutt mithilfe von NE-Ausscheidern aussortiert werden.

Das Kupfer kann mit entsprechenden Maschinen von der Kunststoffummantelung befreit werden. Der Kunststoff wird einer thermischen Verwertung zugeführt und das Kupfer stofflich verwertet. Bei einem derzeitigen Kupferschrottpreis von € 4,25 pro kg beträgt der Wert des Kupfers aus den elektrischen Leitungen rund € 6.600.

B.10 Zusammenfassung des Gebäudebeispiels

Mit ca. 94 % haben mineralische Baustoffe (z. B. Ziegel, Beton, usw.) erwartungsgemäß den größten Anteil an der Gesamtmasse (Tabelle B.23). Die Stoffintensität beträgt **360 kg/m³_{BRI} (71 t/Person)**. Auf jeden Bewohner kommen rund 2,5 t Metalle.

Tabelle B.23: Stoffliche Kennwerte des Beispielgebäudes (Gesamtgebäude)

Baustoff	Masse (kg)	Anteil (%)	Stoffintensität		
			kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Aluminium	1.385	0,03%	0,2	0,1	18,5
Beton	2.586.618	48,3%	463,1	175,1	34.488,2
Bitumen	4.340	0,1%	0,8	0,3	57,9
Estrich	107.562	2,0%	19,3	7,3	1.434,2
Fliesen	21.673	0,4%	3,9	1,5	289,0
Fliesenkleber	5.117	0,1%	0,9	0,3	68,2
Gips	19.905	0,4%	3,6	1,3	265,4
Glas	8.396	0,2%	1,5	0,6	111,9
Gusseisen	5.658	0,1%	1,0	0,4	75,4
Holz	60.045	1,1%	10,7	4,1	800,6
Kalkgipsputz	270.540	5,0%	48,4	18,3	3.607,2
Keramik	1.056	0,02%	0,2	0,1	14,1
Kupfer	1.564	0,02%	0,3	0,0	20,9
Mineralwolle	21.991	0,4%	3,9	1,5	293,2
Mörtel	247.392	4,6%	44,3	16,7	3.298,6
PVC	4.100	0,1%	0,7	0,3	54,7
Stahl	177.068	3,3%	24,9	9,4	1.857,7
Titanzink	891	0,02%	0,2	0,1	11,9
Ziegel	1.814.681	33,9%	324,9	122,8	24.195,8
Gesamt	5.359.982	100%	952,9	360,1	70.963,3

Metalle machen nur einen geringen Teil der Gesamtmasse aus (ca. 3 %), haben jedoch einen höheren monetären Wert und benötigen einen höheren Aufwand in der Herstellung als mineralische Baustoffe (Tabelle B.24). Allein aus diesen Gründen ist die Erfassung von Metallen fundamental.

Tabelle B.24: Zusammenfassung der metallischen Fraktionen des Beispielgebäudes

Baustoff	Masse (kg)	Anteil (%)	Stoffintensität		
			kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Eisenmetalle	182.726	97,9%	26,0	9,8	1.933
Kupfer	1.564	0,8%	0,3	0,1	21
Aluminium	1.385	0,7%	0,2	0,1	18
Titanzink	891	0,5%	0,2	0,1	12
Gesamt	186.566	100%	26,6	10,1	1.984

Wie sich gezeigt hat, ist die Erfassung von Metallen in Bestandsgebäuden sehr aufwendig, da diese in relativ geringer Konzentration vorkommen. Mit 2 t/Person (9,8 kg/m³_{BRI}) haben Eisenmetalle den größten Anteil, gefolgt von Kupfer (21 kg/Person), Aluminium (18 kg/Person) und Titanzink (12 kg/Person).

B.10.1 Vergleich mit synthetischem Gebäudesteckbrief

Zum besseren Vergleich, wurde die stoffliche Zusammensetzung des ursprünglichen Gebäudes (ohne Aufstockung) ermittelt (Tabelle B.25). Dabei steigt die Stoffintensität auf **440 kg/m³_{BRI}** an. Dabei wurden die jeweiligen Bezugsgrößen angepasst.

Tabelle B.25: Stoffliche Kennwerte ohne Aufstockung

Baustoff	Masse (kg)	Anteil (%)	Stoffintensität		
			kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Aluminium	110	0,002%	0,02	0,01	1,9
Beton	2.586.618	50,0%	555,7	220,2	45.379,3
Estrich	107.562	2,1%	23,1	9,2	1.887,0
Fliesen	21.673	0,4%	4,7	1,8	380,2
Fliesenkleber	5.117	0,1%	1,1	0,4	89,8
Glas	7.748	0,1%	1,7	0,7	135,9
Gusseisen	5.658	0,1%	1,2	0,5	99,3
Holz	4.880	0,1%	1,0	0,4	85,6
Kalkgipsputz	270.540	5,2%	58,1	23,0	4.746,3
Keramik	1.056	0,02%	0,2	0,1	18,5
Kupfer	1.564	0,03%	0,3	0,1	27,4
Mörtel	247.392	4,8%	53,1	21,1	4.340,2
PVC	4.100	0,1%	0,9	0,3	71,9
Stahl	176.018	3,4%	37,8	15,0	3.088,0
Ziegel	1.731.744	33,5%	372,0	147,4	30.381,5
Gesamt	5.171.780	100%	1.111,1	440,2	90.733,0

Die Aufstockung hat eine Stoffintensität von **62 kg/m³_{BRI}** (Tabelle B.26). Der größte Anteil ist auf die Dachziegel (44 %) zurückzuführen, gefolgt von Holzwerkstoffen (29 %), Mineralwolle (12 %) und Gips (11 %). Demnach bietet eine Aufstockung große Chancen mit verhältnismäßig wenigen Rohstoffen Wohnraum bereitzustellen.

Tabelle B.26 Stoffliche Kennwerte der Aufstockung

Baustoff	Masse (kg)	Anteil (%)	Stoffintensität		
			kg/m ² _{BGF}	kg/m ³ _{BRI}	kg/Person
Aluminium	1.275	0,7%	1,4	0,4	70,8
Bitumen	4.340	2,3%	4,7	1,4	241,1
Gips	19.905	10,6%	21,4	6,6	1.105,8
Glas	648	0,3%	0,7	0,2	36,0
Holz	55.165	29,3%	59,3	18,2	3.064,7
Mineralwolle	21.991	11,7%	23,6	7,3	1.221,7
Stahl	1.050	0,6%	1,1	0,3	58,3
Titanzink	891	0,5%	1,0	0,3	49,5
Ziegel	82.937	44,1%	89,1	27,4	4.607,6
Gesamt	188.202	100%	202,2	62,2	10.455,7

B.10.2 Bewertung der Abweichungen

Die Abweichung des Gebäudebeispiels (ohne Aufstockung), von den synthetischen Gebäuden des IÖR (MFH 1949-1978) beträgt 9,5 % (Abbildung B.7). Die wesentlichen Unterschiede sind auf die Konstruktionsart zurückzuführen. Gebäude aus

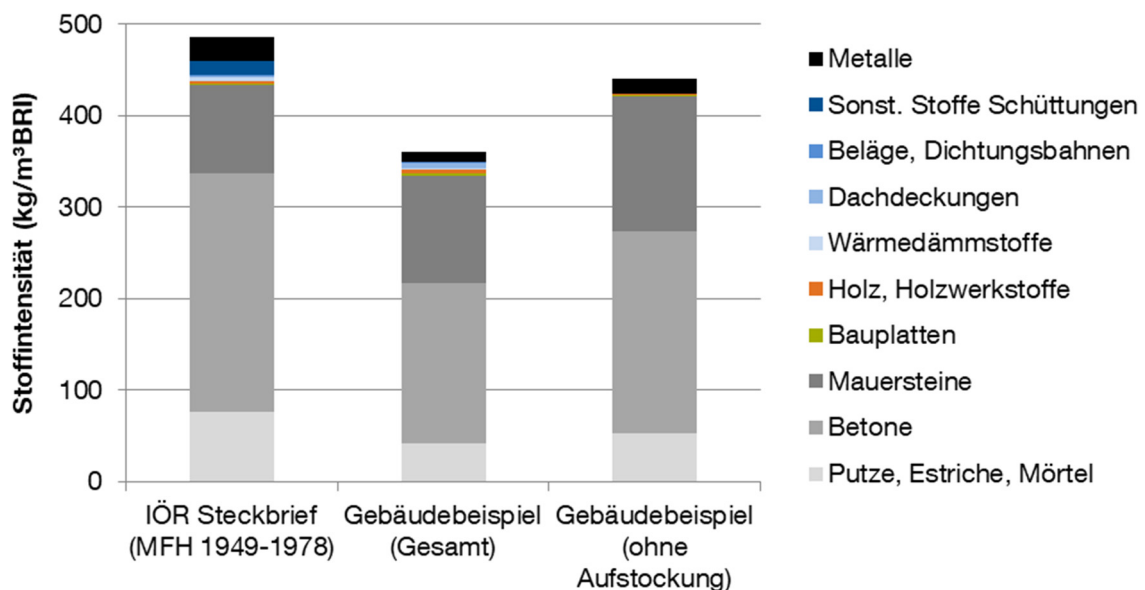


Abbildung B.7 Vergleich mit IÖR Gebäudesteckbrief

Ziegelmauerwerk repräsentieren einen Anteil von 35 % an den synthetischen Gebäuderepräsentanten des korrespondierenden Gebäudesteckbriefs. Der Rest setzt sich aus Leichtbeton-, Stahlbeton- und Kalksandsteinkonstruktionen zusammen, die eine höhere Dichte aufweisen als Ziegel. Ebenso können unterschiedliche Rohdichten die Kalkulationen beeinflussen. Die in dieser Arbeit verwendeten Rohdichten sind in Tabelle B.27 dargestellt.

Tabelle B.27: Verwendete Rohdichten nach Baustoff

Baustoff	Rohdichte (kg/m ³)
Aluminium	2.700
Beton	2.400
Betonfliesen (Treppenhaus)	2.400
Estrichbeton	2.000
Fensterglas	2.500
Fliesen	2.700
Fliesenkleber	1.700
Fugenmasse	1.500
Gusseisen	7.200
Hochlochziegel	1.400
Holz (Parkett und Vollholz)	550
Kalkgipsputz	1.100
Kupfer	8.920
Mauermörtel	1.800
Mörtel	1.800
PVC	1.400
Stahl	7.850

Tabelle B.28: Vergleich der Gebäudekennwerte mit Daten des IÖR

Kennwerte	Beispielgebäude	IÖR (Typ IMZ 5)
KGF / BGF	0,11	0,15
BRI / BGF (m)	2,65	2,70
BGF / WFL	1,55	1,92
WFL / BGF	0,64	0,52

C Gebäudevergleich

Tabelle C.1: Stoffliche Zusammensetzung ausgewählter Gebäude

Stoff	Stoffintensität (kg/m³)							Bürobau Massiv (BJ 2016)
	EFH Porenbeton (BJ 2014)	NexusHaus	EFH Holzständer (BJ 1996)	EFH Ziegel (BJ 2004)	EFH Kalksandstein (BJ 2014)	RH Kalksandstein (BJ 1977)	RH Kalksandstein (BJ 1977)	
Aluminium	0,3	1,1	0,01		0,2		0,1	0,3
Anstrich	0,4	0,7	0,2	0,2	0,04		0,03	0,4
Beton	166,6	49,8	86,9	240,2	235,7		238,8	296,0
Bitumen	1,1		0,8	0,4	0,7		1,0	1,4
Estrich	48,4	16,0	25,0	19,8	50,7		18,1	26,7
Faserzement							0,2	
Fliesen	0,3	0,5			0,3			2,3
Gips	7,0	9,9	19,5	3,9	0,8		0,8	15,5
Glas	13,7	2,3	1,3	0,4	0,8		0,3	0,7
Granit				25,0				0,2
Holz	12,9	43,2	36,4	19,8	0,4		5,6	0,4
Kalksandstein			1,4	6,6	75,6		61,0	29,0
Kies			57,3	34,3			22,7	6,6
Kleber	0,8							10,1
Kunststoff	3,6	0,9	0,6		3,7		0,4	2,5
Kupfer	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3		0,2	0,1
Lehm			5,9					
Mineralwolle	1,0	0,1	5,3	1,5	1,3		2,7	0,1
Mörtel	1,9	0,2					42,7	
Perlite				0,2				
Porenbeton	32,2							
Putz			3,3	20,9	13,2		30,3	6,0
Sand	64,5				54,8			
Stahl	26,0	46,0	28,3	11,9	8,5		11,3	18,2
Textil				0,1				0,04
Titanzink			0,2	7,8				0,1
Ziegel			13,8	67,3			66,4	15,0
Zink							0,1	
Sonstige		17,8						
	381,0	188,8	286,2	460,5	446,9		410,1	431,7

D Ergänzende Werte Fallbeispiel München/Freiham

D.1 Flächen- und Volumenkennwerte

Verteilung von Baualtersklasse und ausgewählten Kriterien

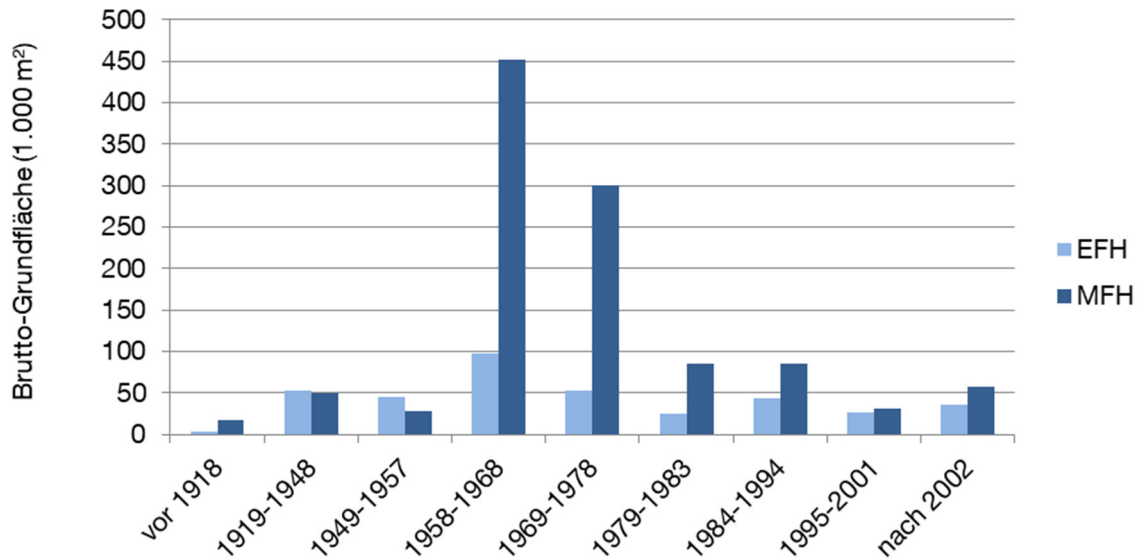


Abbildung D.1: Verteilung von Baualtersklasse und Brutto-Grundfläche in München/Freiham

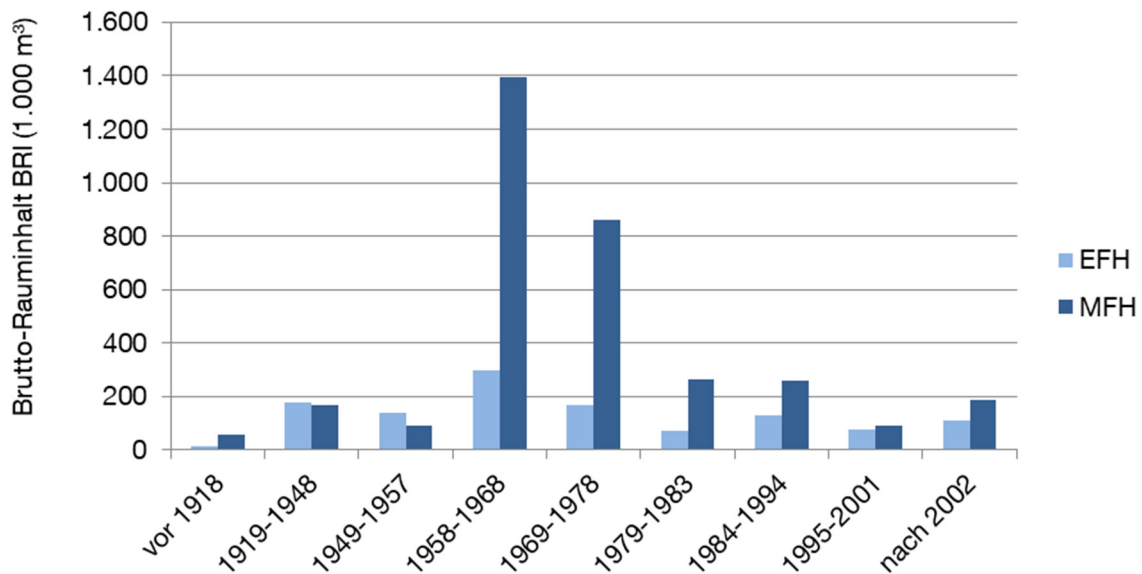


Abbildung D.2: Verteilung von Baualtersklasse und Brutto-Rauminhalt in München/Freiham

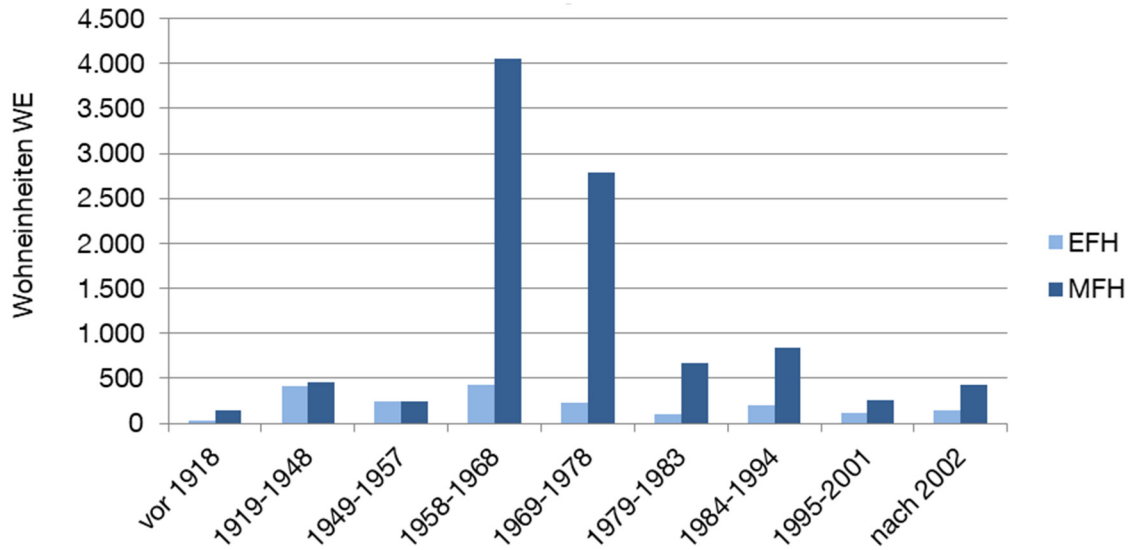


Abbildung D.3: Verteilung von Baualterklasse und Anzahl Wohneinheiten in München/Freiham

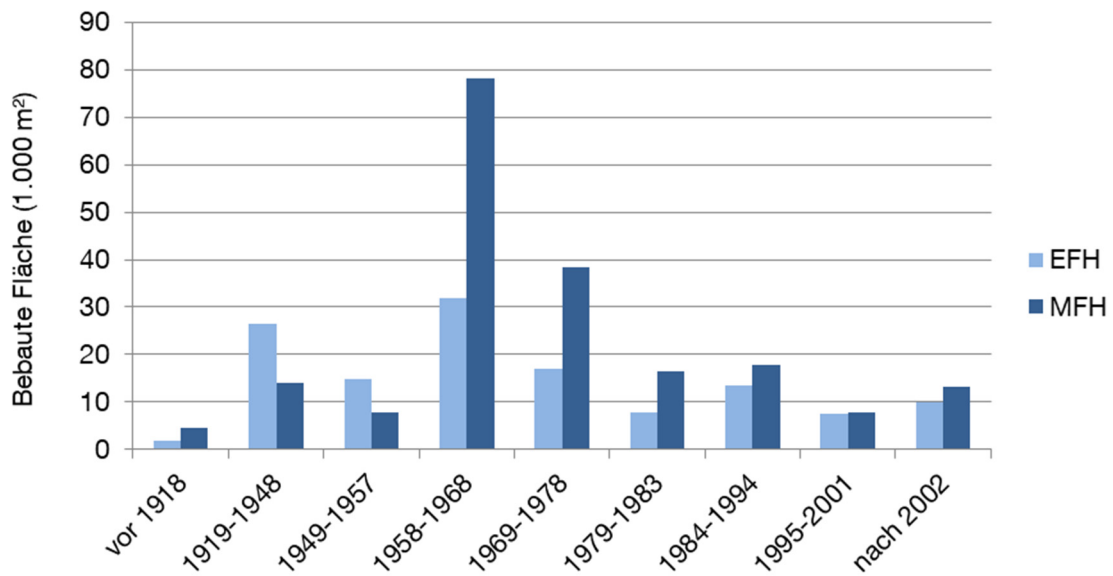


Abbildung D.4: Verteilung von Baualterklasse und bebauter Fläche in München/Freiham

D.2 Einzelwerte für Sanierungsmaßnahmen

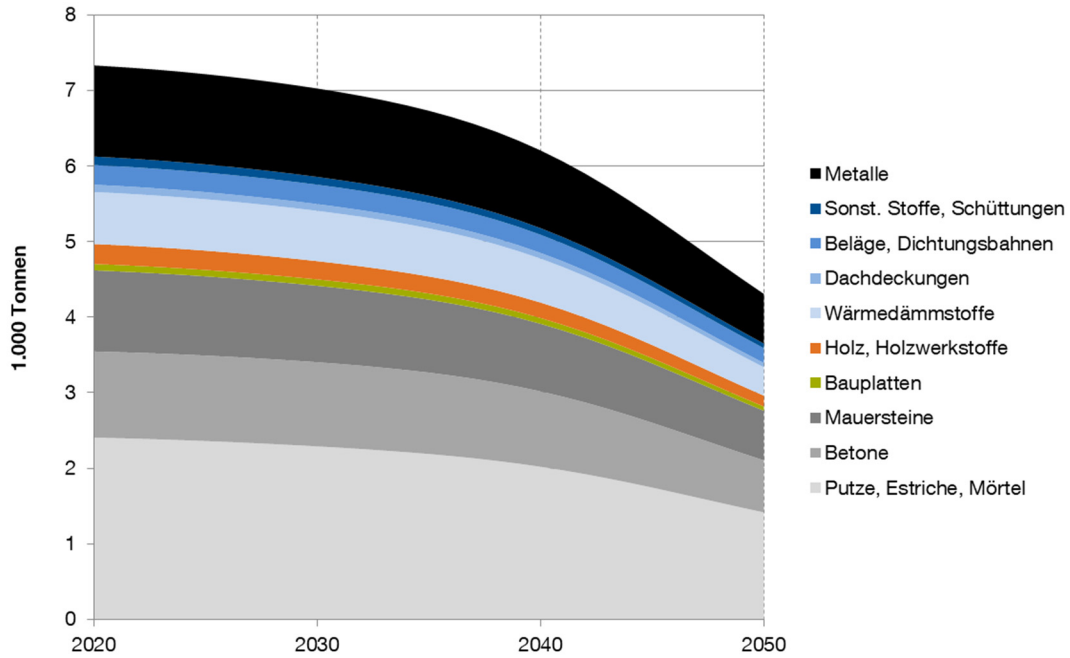


Abbildung D.5: Stoffinput durch Sanierung des Bestands von 2012

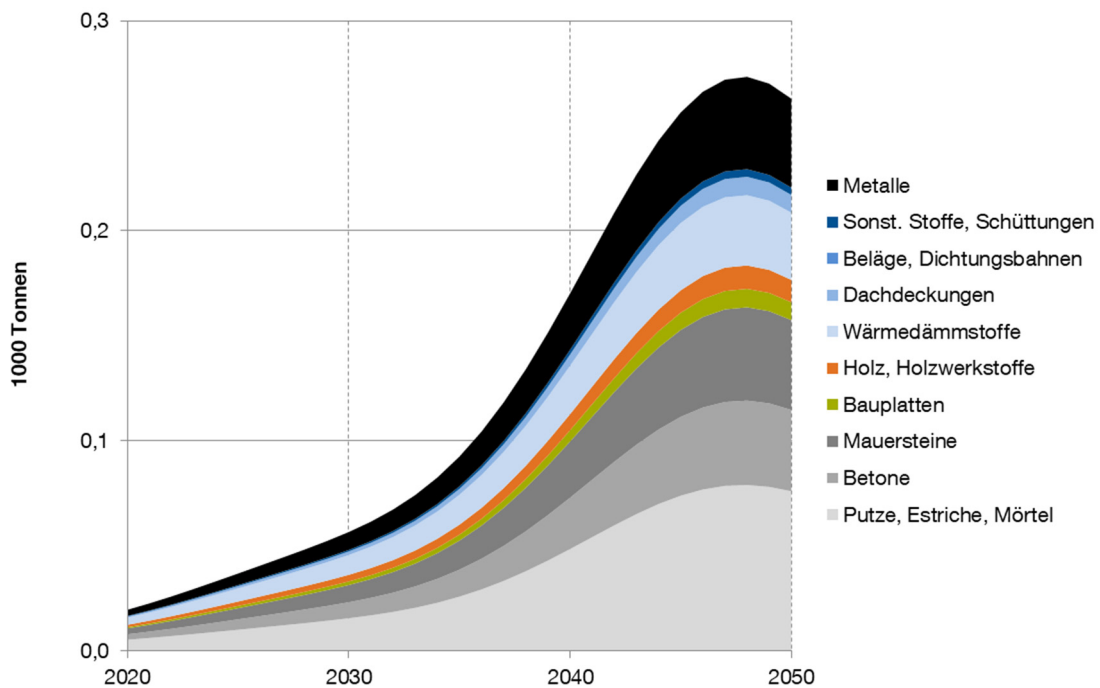


Abbildung D.6: Stoffinput durch Sanierung von Ersatzneubauten

D.3 Jahreswerte Stoffinput und -output

Tabelle D.1: Jahresbezogener Stoffbedarf (Input) in München/Freiham

Jahr	Putze, Estriche, Mörtel	Betone	Mauer- steine	Bau- platten	Holz, Holzwerk- stoffe	Wärme- dämmstoffe	Dach- deckungen	Beläge, Dichtungs- bahnen	Sonst. Stoffe, Schüttungen	Metalle	Gesamt
2020	24.165	72.391	42.834	1.636	1.873	2.298	1.650	260	6.341	8.965	162.412
2021	24.288	72.780	43.051	1.644	1.889	2.314	1.658	260	6.379	9.008	163.271
2022	24.420	73.202	43.287	1.654	1.905	2.331	1.667	260	6.420	9.054	164.202
2023	24.561	73.649	43.537	1.664	1.923	2.349	1.677	260	6.464	9.104	165.187
2024	24.706	74.113	43.795	1.674	1.941	2.368	1.687	260	6.509	9.155	166.207
2025	34.950	107.758	63.529	2.406	2.681	3.108	2.419	260	9.439	12.812	239.362
2026	35.097	108.233	63.793	2.416	2.700	3.128	2.429	260	9.486	12.864	240.404
2027	35.245	108.710	64.058	2.427	2.718	3.147	2.439	260	9.532	12.916	241.452
2028	35.395	109.199	64.330	2.438	2.736	3.166	2.450	260	9.579	12.969	242.521
2029	35.552	109.713	64.616	2.449	2.755	3.185	2.461	259	9.628	13.024	243.643
2030	35.722	110.276	64.931	2.462	2.775	3.205	2.473	259	9.682	13.085	244.870
2031	5.167	9.098	5.606	292	611	1.106	302	259	888	2.230	25.559
2032	5.540	9.938	6.122	325	650	1.178	334	259	965	2.392	27.702
2033	5.962	10.939	6.733	361	693	1.253	370	259	1.056	2.571	30.197
2034	6.446	12.146	7.465	402	740	1.333	410	258	1.165	2.773	33.137
2035	7.072	13.632	8.378	456	799	1.441	463	258	1.298	3.039	36.836
2036	7.779	15.387	9.450	516	865	1.554	522	257	1.455	3.334	41.120
2037	8.572	17.425	10.689	582	937	1.673	587	257	1.636	3.660	46.018
2038	9.448	19.737	12.089	654	1.014	1.798	659	256	1.840	4.015	51.509
2039	10.396	22.289	13.632	731	1.095	1.926	735	255	2.066	4.395	57.522
2040	11.398	25.023	15.282	812	1.180	2.058	816	254	2.306	4.794	63.924
2041	12.216	27.743	16.868	872	1.242	2.118	874	253	2.546	5.083	69.816
2042	13.027	30.449	18.447	931	1.303	2.176	933	251	2.783	5.370	75.671
2043	13.793	33.017	19.946	987	1.359	2.229	988	250	3.008	5.639	81.217
2044	14.473	35.318	21.291	1.037	1.408	2.273	1.038	248	3.208	5.877	86.170
2045	15.028	37.225	22.406	1.078	1.446	2.305	1.078	246	3.374	6.069	90.255
2046	15.425	38.631	23.230	1.108	1.471	2.323	1.108	243	3.495	6.203	93.237
2047	15.640	39.456	23.714	1.125	1.481	2.324	1.125	240	3.565	6.271	94.941
2048	15.658	39.657	23.835	1.128	1.476	2.308	1.128	237	3.579	6.267	95.273
2049	15.474	39.217	23.581	1.118	1.455	2.274	1.117	233	3.537	6.190	94.195
2050	15.114	38.213	22.996	1.094	1.419	2.225	1.093	229	3.445	6.048	91.877
Gesamt	557.732	1.534.565	913.522	38.479	48.539	68.474	38.689	7.859	136.671	215.177	3.559.706
Anteil	15,7%	43,1%	25,7%	1,1%	1,4%	1,9%	1,1%	0,2%	3,8%	6,0%	100%

Tabelle D.2: Jahresbezogener Stoffausgang (Output) in München/Freiham

Jahr	Putze, Estriche, Mörtel	Betone	Mauer- steine	Bau- platten	Holz, Holzwerk- stoffe	Wärme- dämmstoffe	Dach- deckungen	Beläge, Dichtungs- bahnen	Sonst. Stoffe, Schüttungen	Metalle	Gesamt
2020	3.593	4.110	3.815	127	407	175	238	795	1.475	15.455	
2021	3.730	4.290	4.062	128	424	181	239	875	1.502	16.157	
2022	3.878	4.495	4.324	129	441	187	239	958	1.531	16.919	
2023	4.033	4.726	4.594	131	459	194	240	1.043	1.565	17.730	
2024	4.191	4.984	4.863	133	477	200	240	1.126	1.601	18.573	
2025	4.641	6.238	5.689	157	516	228	241	1.288	1.745	21.534	
2026	4.793	6.560	5.931	160	532	234	242	1.358	1.769	22.404	
2027	4.939	6.924	6.151	164	548	241	243	1.418	1.836	23.283	
2028	5.081	7.341	6.349	168	562	246	244	1.466	1.889	24.182	
2029	5.221	7.824	6.529	173	574	252	245	1.504	1.949	25.126	
2030	5.508	8.467	6.781	196	602	273	247	1.540	2.098	26.634	
2031	4.905	6.248	5.295	154	564	230	249	1.312	1.937	21.822	
2032	5.232	7.134	5.573	179	591	251	251	1.341	2.114	23.669	
2033	5.597	8.182	5.892	205	620	273	254	1.375	2.310	25.786	
2034	6.012	9.419	6.272	232	650	296	257	1.417	2.528	28.244	
2035	6.701	10.977	6.853	285	707	344	261	1.483	2.889	31.816	
2036	7.460	12.762	7.527	339	767	393	265	1.566	3.278	35.836	
2037	8.293	14.778	8.301	395	831	443	270	1.670	3.694	40.322	
2038	9.200	17.013	9.175	454	899	495	275	1.793	4.137	45.260	
2039	10.172	19.437	10.141	513	970	548	280	1.936	4.603	50.594	
2040	11.263	22.032	11.217	582	1.051	609	286	2.097	5.125	56.458	
2041	12.171	24.581	12.213	628	1.110	648	291	2.258	5.536	61.765	
2042	13.080	27.102	13.213	674	1.169	687	296	2.421	5.944	67.048	
2043	13.955	29.490	14.176	719	1.226	726	299	2.578	6.338	72.101	
2044	14.765	31.637	15.057	763	1.280	764	302	2.720	6.703	76.710	
2045	15.476	33.438	15.812	805	1.329	801	304	2.839	7.028	80.667	
2046	15.849	34.694	16.282	821	1.347	812	303	2.918	7.183	83.082	
2047	16.074	35.447	16.563	834	1.358	820	301	2.961	7.280	84.537	
2048	16.140	35.663	16.638	843	1.361	826	297	2.965	7.313	84.959	
2049	16.038	35.335	16.498	849	1.355	828	292	2.926	7.281	84.319	
2050	15.793	34.512	16.179	852	1.342	829	285	2.856	7.192	82.749	
Gesamt	273.786	515.841	287.961	12.791	26.070	50.787	14.035	8.277	56.803	1.365.744	
Anteil	20,0%	37,8%	21,1%	0,9%	1,9%	3,7%	1,0%	0,6%	4,2%	8,7%	100%

Tabelle D.3: Jahresbezogener maximaler Selbstversorgungsgrad in München/Freiham

Jahr	Putze, Estriche, Mörtel	Betone	Mauer- steine	Bau-platten Holzwerk- stoffe	Holz, Holzwerk- stoffe	Wärme- dämmstoffe	Dach- deckungen	Beläge, Dichtungs- bahnen	Sonst. Stoffe, Schüttungen	Metalle	Gesamt
2020	14,9%	5,7%	8,9%	7,7%	21,7%	31,3%	10,6%	91,6%	12,5%	16,5%	9,5%
2021	15,4%	5,9%	9,4%	7,8%	22,4%	31,5%	10,9%	91,7%	13,7%	16,7%	9,9%
2022	15,9%	6,1%	10,0%	7,8%	23,1%	31,6%	11,2%	91,9%	14,9%	16,9%	10,3%
2023	16,4%	6,4%	10,6%	7,9%	23,9%	31,8%	11,5%	92,1%	16,1%	17,2%	10,7%
2024	17,0%	6,7%	11,1%	8,0%	24,6%	32,0%	11,9%	92,4%	17,3%	17,5%	11,2%
2025	13,3%	5,8%	9,0%	6,5%	19,2%	25,5%	9,4%	92,7%	13,6%	13,6%	9,0%
2026	13,7%	6,1%	9,3%	6,6%	19,7%	25,8%	9,7%	93,0%	14,3%	13,9%	9,3%
2027	14,0%	6,4%	9,6%	6,7%	20,2%	26,1%	9,9%	93,5%	14,9%	14,2%	9,6%
2028	14,4%	6,7%	9,9%	6,9%	20,5%	26,4%	10,1%	94,0%	15,3%	14,6%	10,0%
2029	14,7%	7,1%	10,1%	7,1%	20,8%	26,8%	10,2%	94,5%	15,6%	15,0%	10,3%
2030	15,4%	7,7%	10,4%	7,9%	21,7%	28,8%	11,0%	95,3%	15,9%	16,0%	10,9%
2031	94,9%	68,7%	94,4%	52,9%	92,4%	83,9%	76,2%	96,1%	147,8%	86,9%	85,4%
2032	94,4%	71,8%	91,0%	55,1%	91,0%	85,0%	75,3%	97,1%	139,1%	88,4%	85,4%
2033	93,9%	74,8%	87,5%	56,6%	89,5%	86,1%	74,0%	98,3%	130,2%	89,8%	85,4%
2034	93,3%	77,5%	84,0%	57,7%	87,9%	87,0%	72,3%	99,7%	121,7%	91,2%	85,2%
2035	94,8%	80,5%	81,8%	62,4%	88,4%	91,4%	74,2%	101,3%	114,2%	95,1%	86,4%
2036	95,9%	82,9%	79,6%	65,7%	88,7%	95,2%	75,2%	103,1%	107,7%	98,3%	87,1%
2037	96,7%	84,8%	77,7%	67,9%	88,8%	98,4%	75,4%	105,2%	102,1%	100,9%	87,6%
2038	97,4%	86,2%	75,9%	69,3%	88,7%	101,1%	75,1%	107,4%	97,4%	103,1%	87,9%
2039	97,8%	87,2%	74,4%	70,2%	88,6%	103,5%	74,5%	109,9%	93,7%	104,7%	88,0%
2040	98,8%	88,0%	73,4%	71,6%	89,1%	106,8%	74,7%	112,4%	90,9%	106,9%	88,3%
2041	99,6%	88,6%	72,4%	72,0%	89,4%	110,0%	74,1%	115,0%	88,7%	108,9%	88,5%
2042	100,4%	89,0%	71,6%	72,4%	89,7%	113,1%	73,7%	117,5%	87,0%	110,7%	88,6%
2043	101,2%	89,3%	71,1%	72,9%	90,2%	116,3%	73,5%	119,9%	85,7%	112,4%	88,8%
2044	102,0%	89,6%	70,7%	73,6%	90,9%	119,5%	73,7%	122,0%	84,8%	114,1%	89,0%
2045	103,0%	89,8%	70,6%	74,7%	91,9%	123,0%	74,3%	124,9%	84,1%	115,8%	89,4%
2046	102,7%	89,8%	70,1%	74,1%	91,6%	123,7%	73,3%	124,9%	83,5%	115,8%	89,1%
2047	102,8%	89,8%	69,8%	74,1%	91,7%	124,7%	72,9%	125,6%	83,1%	116,1%	89,0%
2048	103,1%	89,9%	69,8%	74,7%	92,2%	126,2%	73,2%	125,7%	82,8%	116,7%	89,2%
2049	103,6%	90,1%	70,0%	76,0%	93,2%	128,2%	74,2%	125,3%	82,7%	117,6%	89,5%
2050	104,5%	90,3%	70,4%	77,9%	94,6%	130,7%	75,8%	124,3%	82,9%	118,9%	90,1%

D.4 Standorte Altholzaufbereiter

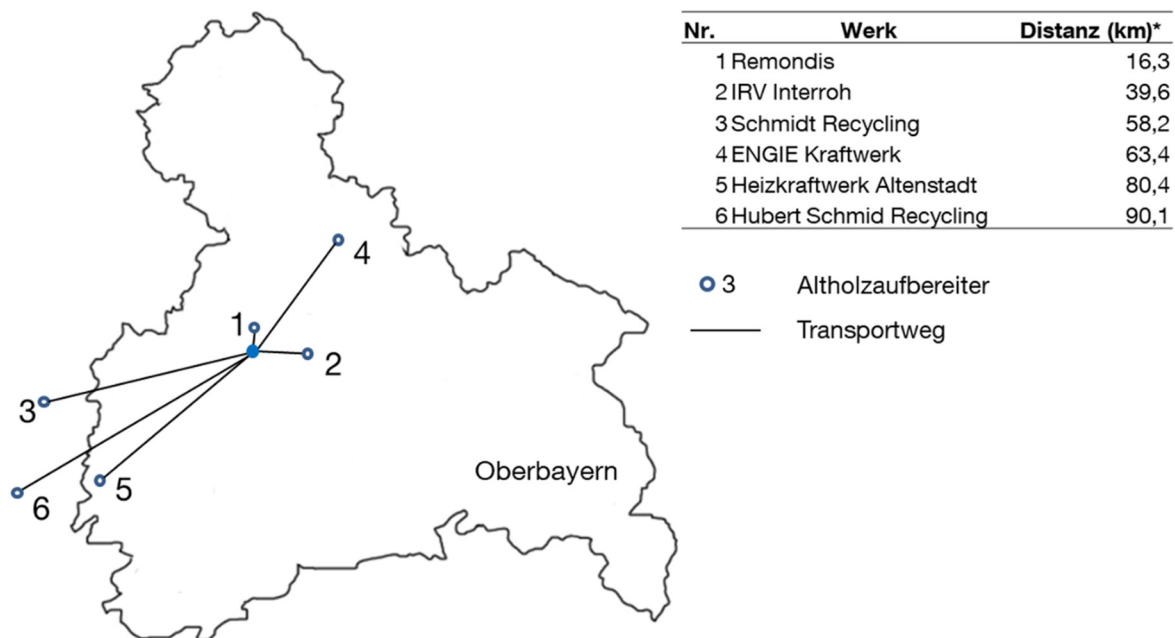


Abbildung D.7: Standorte und Transportdistanzen von Altholzaufbereitern