

Endbericht

Energetische Sanierung von Bestandsgebäuden oder Neubau - Ökologische Bewertung hinsichtlich Materialbedarf, Primärenergieverbrauch und damit verbundenen Treibhausgas- Emissionen

Wuppertal, 01.März 2022

Autoren: Sören Steger, Dr. Henning Wilts, Laura Bergs, Luisa Bergmann

Ansprechpartner:

Sören Steger

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (WI)
Senior Researcher Abteilung Kreislaufwirtschaft
Döppersberg 19, 42103 Wuppertal
Tel.: 0202 2492-162, Fax: -108
Mail: soeren.steger@wupperinst.org

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Einleitung	3
1.1 Hintergrund des Projektes	3
2 Key Messages	5
3 Die Materialzusammensetzung ausgewählter Gebäude des Gebäudebestandes der LEG	9
3.1 Auswahl der Beispielgebäude	9
3.2 Die Materialzusammensetzung der ausgewählten Gebäude des Gebäudebestandes der LEG	11
4 Modellierung des Rückbaues von LEG-Gebäuden und deren (Ersatz-)Neubau	14
4.1 Abrissmodell für die Beispielgebäude der LEG	14
4.2 Modellierung Neubau der Beispielgebäude der LEG	19
4.3 Ökonomischen Kosten für Rückbau und Verwertung sowie des Neubaus.	25
5 Modellierung einer energetischen Sanierung von LEG-Bestandsgebäuden	30
5.1 Ökonomischen Kosten für Sanierung	33
6 Vergleich und ökologische Bewertung von Sanierung versus Rück- und Neubau unter Berücksichtigung der Nutzungsphase	35
6.1 Modellannahmen für die Extrapolation der Nutzungsphase	36
7 Einordnung der Ergebnisse aus AP4 in politische-regulatorische Rahmenbedingungen	55
7.1 EU-Ebene	55
7.2 Nationale Ebene	58
8 Annex: Tabellenanhang	59
8.1 Tabellen Bestand	59
8.2 Tabellen Abrissmodell	61
8.3 Tabellen Neubau	63

1 Einleitung

1.1 Hintergrund des Projektes

Die Bauindustrie - und damit auch die Immobilienwirtschaft als einer der wichtigsten Nachfrager innerhalb der Wertschöpfungskette - stellt einen der ressourcenintensivsten Sektoren der heutigen Zeit dar. So werden jedes Jahr nicht nur Millionen von Tonnen an mineralischen Rohstoffen, Metallen, Holz, Kunststoff, Glas und andere Materialien für die Erstellung und Sanierung von Wohngebäuden genutzt. Sondern auch die Herstellung des Bindemittels Zement als ein Hauptbestandteil von Beton ist mit enormen Treibhausgas-Emissionen verbunden. Zudem verursacht die Bauindustrie (und deren nachfragenden Sektoren wie die Immobilienwirtschaft) bei der Erstellung, der Sanierung und durch den Abriss von Gebäuden hohe Mengen an Bau- und Abbruchabfällen. Diese Abfälle, die allerdings auch Abfälle aus anderen Bereichen wie Straßeninfrastrukturen enthalten, stellen die größte Einzelkategorie innerhalb der Abfallstatistik in Deutschland dar. Gleichzeitig findet ein hochwertiges Recycling lediglich bei einzelnen Abfallkategorien wie metallischen Bauabfällen statt.

Neben der Errichtungsphase von Wohngebäuden ist gerade im Bereich Wohnen die Nutzungsphase für die Bewertung der Umweltwirkung entlang des Lebenszyklus von Gebäuden relevant. Dies ist umso mehr der Fall, da es wenige Güter gibt, die eine so lange Lebensdauer aufweisen wie Gebäude. Allerdings hat sich die energetische Qualität von Neubauten in den letzten 10-15 Jahren dramatisch verbessert, so dass es heutzutage durchaus realistisch und möglich ist die Nutzungsphase klimaneutral zu gestalten oder ggf. sogar mehr erneuerbare Energie zu erzeugen als selbst zu verbrauchen. Damit verschiebt sich der Fokus der ökologischen Bewertung bei Neubauten von der Nutzungsphase hin zur Erstellungsphase und dem Abriss der Wohngebäude nach ihrer Nutzungsphase. Bestandsgebäude haben den Vorteil, dass deren ökologischer Fußabdruck der Entstehungsphase schon vorhanden ist. Aber deren Nutzungsphase noch reichlich ökologisches Verbesserungspotenziale aufweist. Dies sind einer der Hauptgründe weshalb die Sanierung des Gebäudebestandes in letzter Zeit zunehmend in den Fokus von Politik, Wissenschaft und der Immobilienwirtschaft selbst gerückt ist.

Für die Immobilienwirtschaft stellt sich dabei u.a. die Frage, wie sie ihren Gebäudebestand ökologisch optimieren können. Zwei grundsätzliche Strategien sind hier denkbar: Abriss und Neubau von Gebäuden oder eine (energetische) Sanierung des Gebäudebestandes. Daraus ergibt sich die Frage, ob der Abriss von Bestandsgebäuden und der anschließende Neubau ggf. einer Sanierung des Bestandes vorzuziehen ist, wenn die energetische Performance der Neubauten eventuell dramatisch besser ist als die von sanierten Bestandsgebäude. Mit anderen Worten: was wiegt ökologisch stärker: der deutliche Mehrbedarf an Rohstoffen und höheren Abfallmengen bei Abriss und Neubau oder die voraussichtlich ökologisch überlegene Nutzungsphase gegenüber den sanierten Bestandsgebäuden? Genau dieser Vergleich soll in diesem Projekt anhand von drei typischen Gebäuden des Immobilienbestandes der LEG analysiert und anhand der Umweltindikatoren Carbon Footprint (CF), des kumulierten Energieaufwand (KEA) und des kumulierter Rohstoffbedarf bzw. Material Footprint (RMI) bewertet werden.

Kumulierter Energieaufwand (KEA) in GJ

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) ist die Gesamtheit der erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergieinputs, die benötigt werden zur Herstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung.¹ In einer umfassenden Betrachtung schließt er auch die Nutzung des Produktes mit ein. Im Gegensatz dazu wird bei einer reinen Betrachtung der Grauen Energie konzeptionell nur die in die Materialien eingeflossenen Energiemengen erfasst. In Rahmen der Systemgrenzen in diesem Projekt ist der KEA und graue Energie identisch. Der Energiebedarf der Nutzungsphase der Gebäude wird in dieser Studie separat analysiert und ausgewiesen.

Primärrohstoffaufwand (RMI: Raw Material Input) oder kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) in Tonnen

Unter dem Primärrohstoffaufwand (RMI) versteht man die Menge an Primärrohstoffen, die für die Bereitstellung von Produkten und Dienstleistungen benötigt werden. Zum einen wird die Materialmenge des Produktes und das Material, dass zur Produktion erforderlich ist, zum RMI gezählt. Zum anderen wird auch das genutzte Material dazu gezählt, dass zur Bereitstellung aus der Umwelt gefördert wird, wie zum Beispiel die Gangart, die schlecht wirtschaftlich verwendbaren Gesteine und Mineralien, bei der Erzförderung. Mithilfe des RMIs können die Emissionen und Abfälle auf der ganzen Wertschöpfungskette berechnet werden. In Ecoinvent wird mit Hilfe eines Bewertungsmoduls des Wuppertal Institutes der RMI errechnet. Dieser ist für den in dieser Studie relevanteren abiotischen Teil identisch mit der Berechnung des kumulierten Rohstoffaufwands (KRA). Der Unterschied zwischen RMI und KRA besteht in unterschiedlichen Berechnungsmethoden des biotischen Anteils. Dieser ist im KRA tendenziell niedriger als beim RMI.² Allerdings spielt der biotische Anteil für die Mehrzahl der hier verwendeten Materialien eine sehr untergeordnete Rolle. Daher ist es vertretbar, für die Fragestellung dieser Studie den KRA als synonym zum Indikator RMI zu interpretieren.

Carbon Footprint in Tonnen CO₂-Äquivalent

Der Carbon Footprint ist die Gesamtheit der Treibhausgasemissionen, die direkt und indirekt von einer Person, einem Unternehmen oder einem Produkt verursacht werden. Er wird berechnet, indem die Emissionen aus allen Phasen des Lebenszyklus eines Produkts oder einer Dienstleistung addiert werden. Während des Lebenszyklus eines Produkts können verschiedene Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Di-Stickstoffoxid (N₂O) emittiert werden, die jeweils unterschiedliche hohe Fähigkeit haben, Wärme in der Atmosphäre zu speichern. Diese Unterschiede werden durch das Erderwärmungspotenzial (GWP) der einzelnen Gase ausgedrückt, was zu einem Kohlenstoff-Fußabdruck in Masseneinheiten von Kohlendioxid-Äquivalenten (CO₂-Äqu) führt.

¹ Günther, K. (2018): Kumulierte Energiebedarf. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/kumulierter-energieaufwand-kea-52378/version-275516>

² Bringezu et al. (2019): Bestimmung des Materialfußabdrucks mit ökobilanziellen Methoden und Softwarelösungen. https://www.uni-kassel.de/einrichtungen/fileadmin/datas/einrichtungen/cesr/documents/Bestimmung_des_Materialfu%C3%9Fabdrucks_mit_%C3%B6kobilanziellen_Methoden_und_Software%C3%B6sungen.pdf

2 Key Messages

Lebenszyklusphase Abriss/Neubau und Sanierung, ohne Nutzungsphase

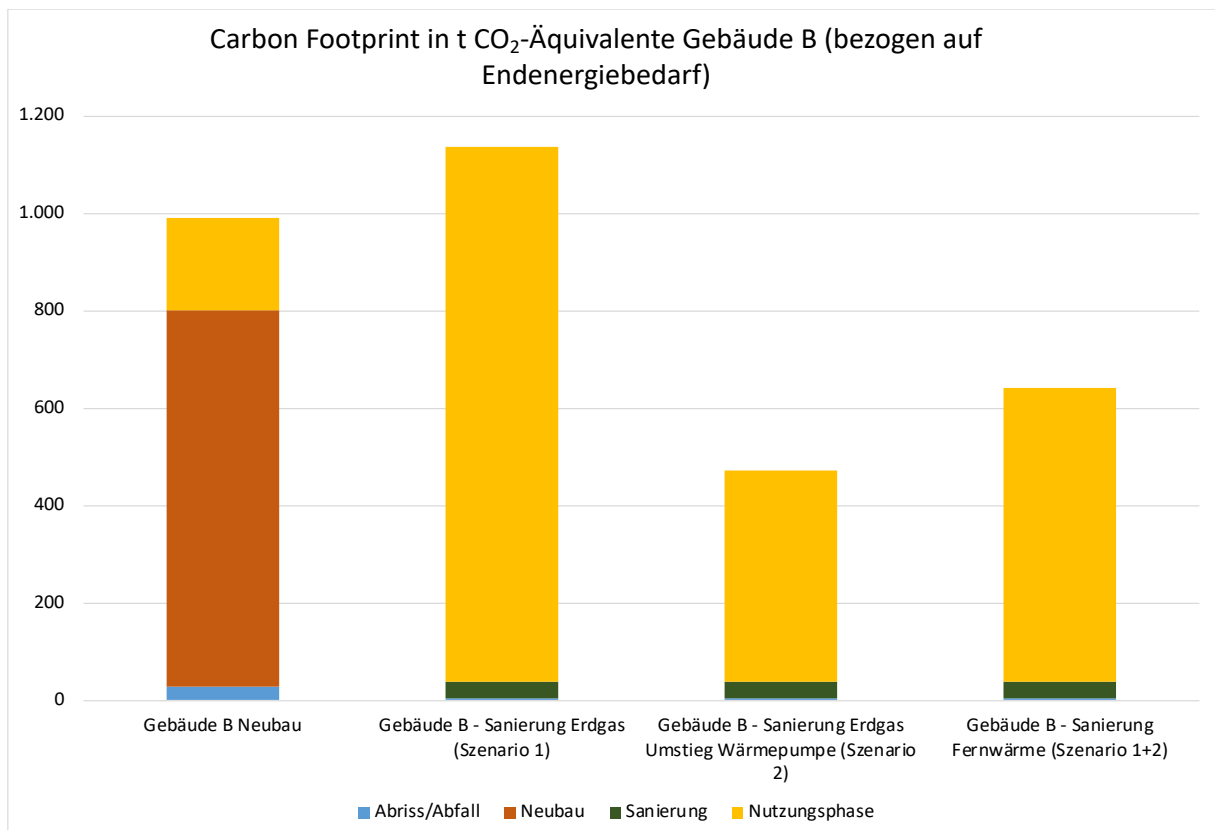
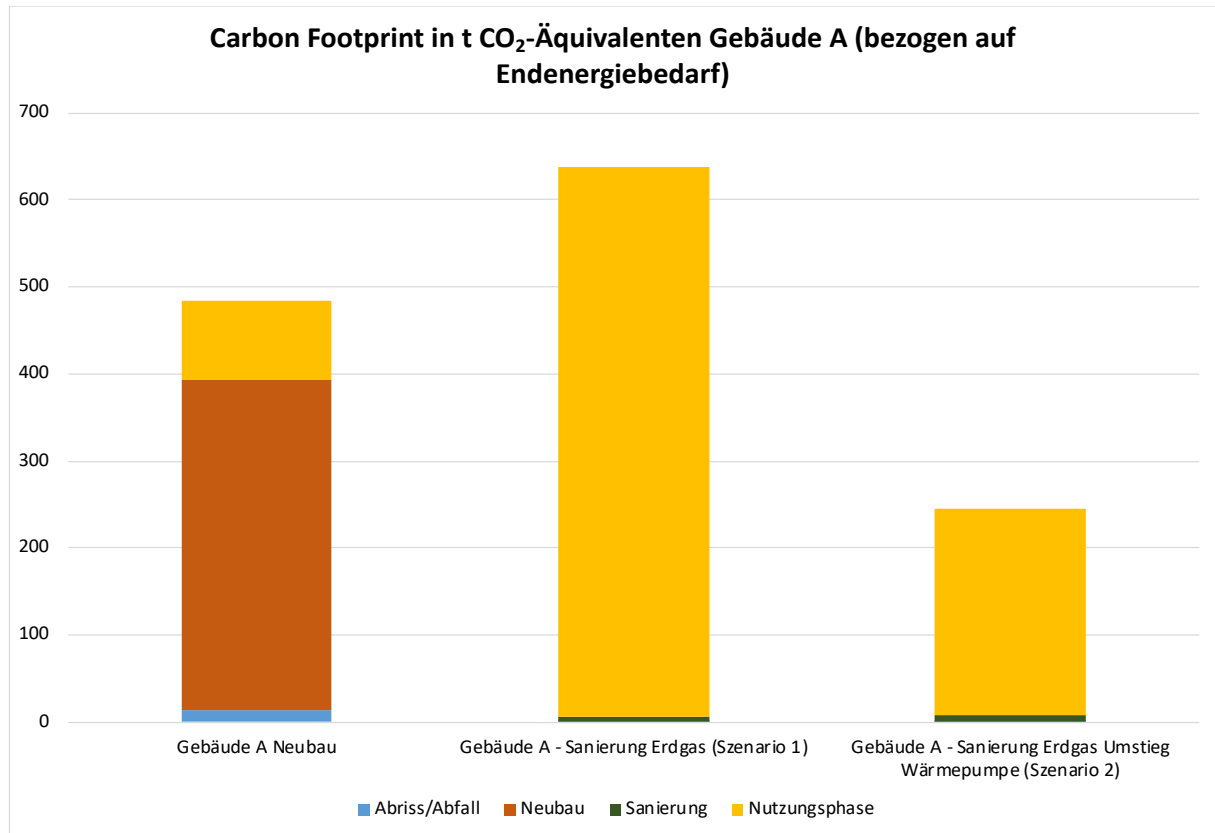
- In den modellierten Bestandsgebäude der LEG sind enorme Mengen an Baumaterialien gespeichert. Dies sind vor allem mineralische Rohstoffe, aber auch Metalle, Holz, Kunststoffe, Glas und Dämmmaterial. Je nach stofflicher Zusammensetzung der Gebäude unterscheiden sich auch die Abfallmengen, die bei einem Abbruch dieser Gebäude anfallen würden.
- Ein Abriss und Neubau dieser Gebäude würde deutlich mehr Rohstoffe benötigen als die energetische Bestandssanierung dieser Gebäude. Während der Neubau der drei Gebäude zwischen 1.276 t und 7.070 t an neuen Rohstoffen benötigt, kommen in der Sanierung (je nach Sanierungsaufwand) nur ca. 2,3 t bis 46 t an neu verbaute Material zum Einsatz. Es fallen bei der Sanierung entsprechend auch weniger Abfälle an (z.B. durch den Austausch von Fenstern) als bei einem Abriss von Bestandsgebäude zum Zwecke des anschließenden Neubaus.
- Aufgrund der im Vergleich zum Neubau niedrigen Rohstoffmengen, die bei der Sanierung zum Einsatz kommen, sind die Umweltwirkungen (gemessen an Carbon Footprint, KEA und KRA) der Sanierung ebenfalls deutlich niedriger als im Neubau. Schon allein die Behandlung und Beseitigung der Abbruchmengen der Bestandsgebäude übersteigen in ihrer Umweltwirkung die der Sanierung (inkl. der Behandlung und Beseitigung der bei der Sanierung anfallenden Abfälle).
- Insgesamt sind die Umweltwirkungen, die mit Abfallaufbereitung und Beseitigung selbst verbunden sind, im Vergleich zu den Umweltwirkungen, die mit der Herstellung der Baumaterialien einhergehen, gering. Dies spricht für eine weitreichenden Erhalt von bestehenden Gebäuden statt eines (Ersatz-)Neubaus.
- Der rohstoffliche Aufwand der Haustechnik ist im Vergleich zur Rohstoffmenge, die in der Gebäudehülle verbaut ist, relativ marginal. Eine umfassendere energetische Sanierung, z.B. die zusätzliche Installation einer PV-Anlagen auf dem Dach würde im Vergleich „Sanierung vs. Neubau“ zu keinen Veränderungen der Ergebnisse führen.
- Berücksichtigt man die Anzahl der Wohnungen der drei modellierten Gebäude, nähern sich die Ergebnisse über verbaute Materialien im Neubau, den Abfallmengen und der Aufwand der Sanierung stark an. In dieser Hinsicht gibt es keine fundamentalen Unterschiede, ob es sich um ein Gebäude aus den 1950er Jahren oder den 1970er Jahren handelt. Dies liegt auch daran, dass die LEG ihre Sanierungen sehr standardisiert durchführt und z.B. einheitliche Dämmdicken und -materialien verbaut.

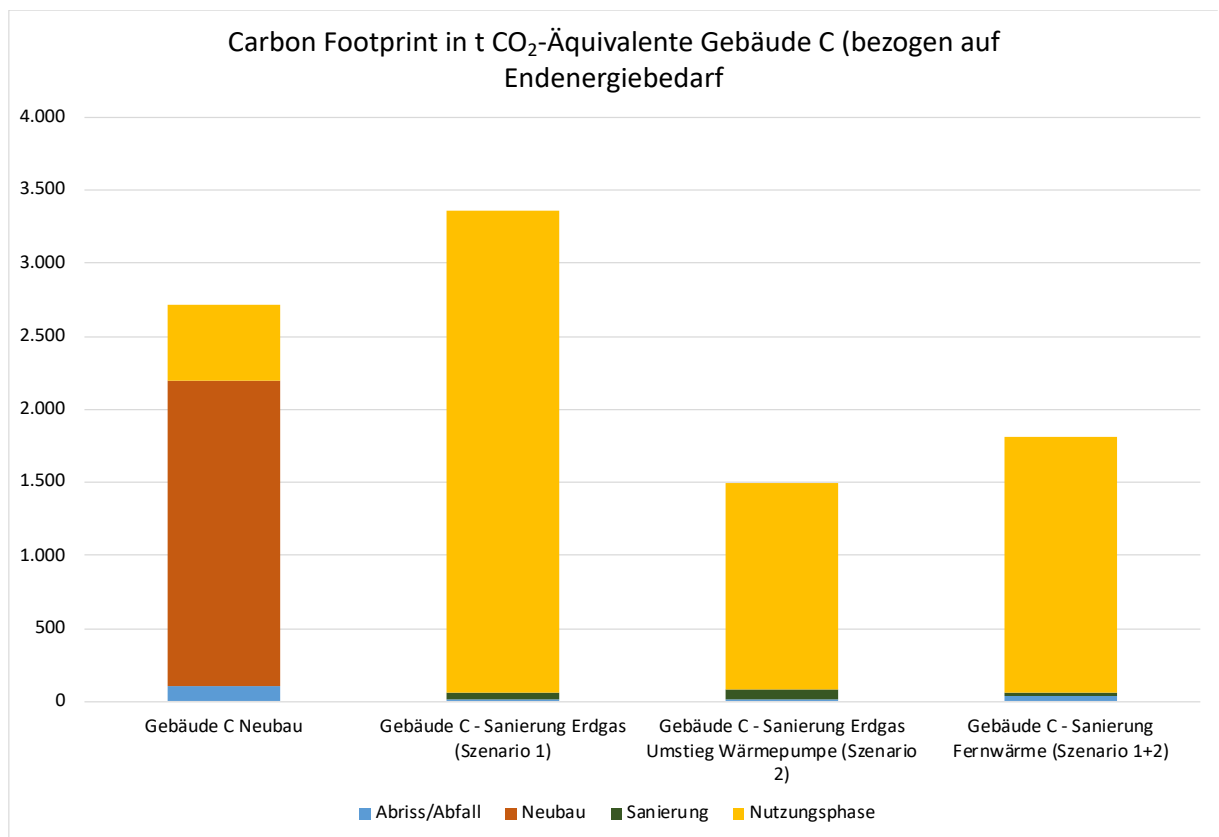
Lebenszyklusphase Nutzungsphase

- Die Bereitstellung von Wärme und Warmwasser wurde mit drei verschiedenen Energieträgern und Heiztechnologien modelliert: Erdgas mit Brennwertkessel, Strom zur Nutzung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe und Fernwärme.

- Die unterstellte Sanierung der Gebäude verbesserte die Energieeffizienz der Gebäudehülle auf Endenergiewerte von 90 bis 110 kWh/m²a. Dies sind reale Zahlen der LEG.
- Für die modellierten Neubauten ist die energetische Qualität der Gebäudehülle nur geringfügig besser. Aber durch die Verwendung von Luft-Wasser-Wärmepumpen erreichen die Neubauten in der Modellierung mit angenommener JAZ von 3,9 einen Endenergiebedarfe von 22 - 25 kWh/m²a.
- In der Modellierung der Nutzungsphase bis zum Jahr 2070 werden sinkenden Emissions- und Primärenergiefaktoren für Strom und Fernwärme unterstellt. Erdgas hingegen bleibt hinsichtlich des Emissionsfaktors (und damit auch hinsichtlich des Primärenergiefaktors) unverändert. Allerdings wäre auch hier ein Umstieg auf Biogas möglich.
- Als Resultat ist für den Neubau die Erstellungsphase wichtiger als die Nutzungsphase. Bei den sanierten Gebäuden wird der Gesamtwert der anfallenden THG-Emissionen bis 2070 vor allem durch die Nutzungsphase bestimmt.
- Daher ist hier vor allem die ökologische Performance der Wärme- und Warmwasserbereitstellung für das Gesamtergebnis wichtig. Würden sanierte Gebäude bis 2070 weiterhin mit Erdgas ihren Wärme- und Warmwasserbedarf abdecken, überstiege der ökologische Fußabdruck (gemessen als Carbon Footprint) der Sanierung am Ende des Betrachtungszeitraums im Jahr 2070 den ökologischen Fußabdruck des Neubaus.
- Würde allerdings Fernwärme als Energieträger eingesetzt oder erfolgte in den nächsten Jahren ein Umstieg der Wärmeerzeugung von Erdgas auf Wärmepumpe, würde der große ökologische Vorteil der Sanierung gegenüber Neubau aus der Entstehungsphase auch nach 50 Jahren Nutzung noch überwiegen. Vor allem wenn - wie zu erwarten - die Fernwärme und der Strom-Mix in Deutschland in den nächsten Jahrzehnten zunehmen dekarbonisiert wird und stark sinkenden Emissionsfaktoren die Folge sind.

Abbildung 1 a-c: Carbon Footprint der drei modellierten Gebäude über die gesamten Lebenszyklus in t CO₂-Äquivalent





3 Die Materialzusammensetzung ausgewählter Gebäude des Gebäudebestandes der LEG

3.1 Auswahl der Beispielgebäude

Die Materialzusammensetzung der drei Beispiel-Bestandsgebäude der LEG wurde anhand von Daten des Wohngebäudebestandes-Modells des Wuppertal Institutes (WI) bestimmt. Dieses Modell orientiert sich im Aufbau an verschiedenen Baualtersklassen von Gebäuden und deren damalig typischer Bauweise. Die Identifizierung der drei typischen Bestandsgebäude der LEG muss daher anhand dieser Baualtersklassen erfolgen, um die Modellangaben nutzen zu können.

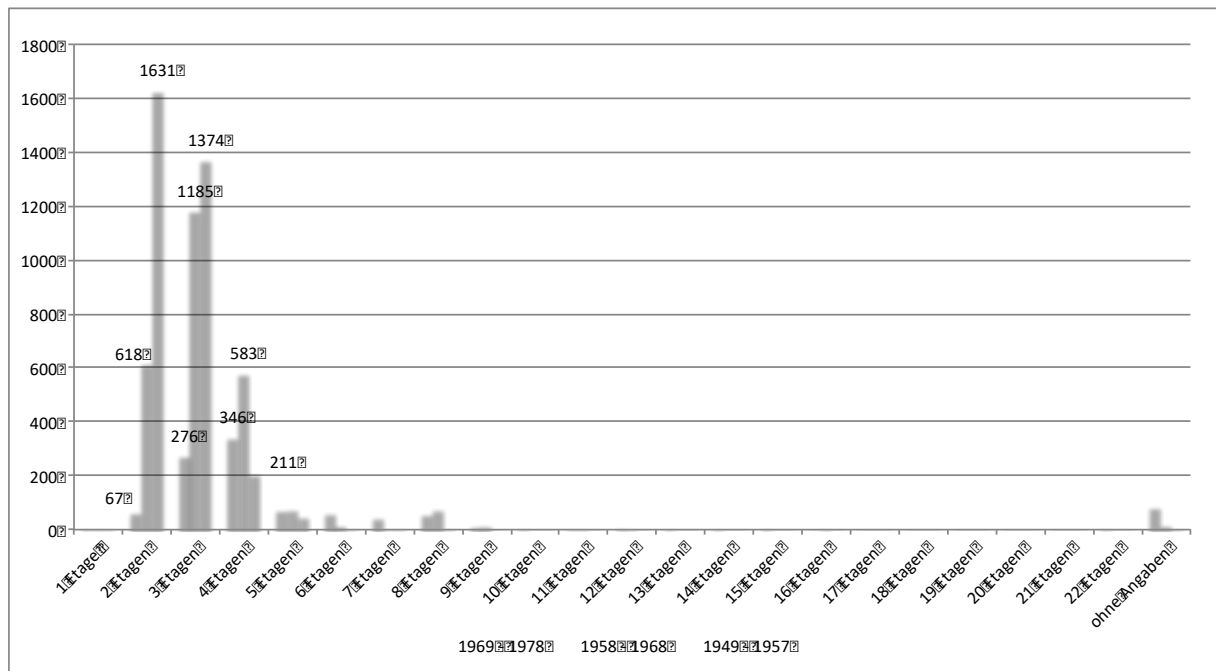
Die LEG stellte für die Identifizierung der drei Beispielhäuser einen umfangreichen Datensatzes zu ihren Bestandsgebäuden aus drei relevanten Baualtersklassen (1949-1958; 1959 – 1968; 1969 – 1978) zur Verfügung, der neben den entsprechenden Zeiträumen der Erstellung weitere Strukturmerkmale dieser Gebäude, wie Anzahl an Wohnungen, Anzahl an Etagen, Dachform, Wandaufbau und Wohnfläche enthielten.

Knapp 7.000 Gebäude in der Grundgesamtheit

Das erste Merkmal für die Sortierung der knapp 7.000 Gebäude, die im Datensatz enthalten waren, war eine Verteilung der Gebäude auf die Anzahl der Etagen je Altersklasse. Es wurden anschließend nur die Gebäude ausgewertet, die innerhalb des Teilssegmentes der am häufigsten vorkommenden Etagenanzahl zu finden waren. Für den Baualtersklassen 1949 – 1958 und 1969-1978 ergibt sich dadurch eine recht gleichmäßige Verteilung auf jeweils zwei Merkmalsklassen. Daher wurden hier auch die typischen Gebäudemerkmale für zwei Gebäudetypen mit unterschiedlichen Etagen-Anzahlen ermittelt. Die Unterschiede der Gebäudemerkmale sind jedoch gering.

Aus Abbildung 2 wird ersichtlich, dass vor allem Gebäude mit zwei bis vier Etagen, die im Zeitraum 1949 bis 1978 gebaut wurden, prägend für den Gebäudebestand der LEG sind. Dabei gibt es im Laufe der Zeit eine Verschiebung von Gebäuden mit zwei bzw. drei Etagen hin zu Gebäuden mit drei bzw. vier Etagen. In der ersten Dekade (1949-1958) ist die Anzahl der Gebäude mit drei Etagen ähnlich hoch wie die Anzahl mit zwei Etagen. Daher wurden die Gebäudemerkmale für beide Gruppen ausgewertet. In der dritten Dekade (1979 – 1978) bilden Gebäude mit vier Etagen die größte Gruppe, jedoch ist die Gruppe an Gebäuden mit drei Etagen ähnlich hoch. Daher wurden hier ebenfalls die Gebäudemerkmale für Gebäude mit drei bzw. vier Etagen ermittelt.

Abbildung 2: Verteilung der Bestandsimmobilien nach Baualter und Etagenanzahl



Für die Berechnung der Sanierung bzw. Abbruch dieser typischen Gebäude wurde folgende Auswahl der Gebäude vorgenommen:

- Das größte Teilsegment bestimmt die typische Höhe der Gebäude der jeweiligen Dekade:
 - 1949 – 1957: 2 Etagen
 - 1958 – 1968: 3 Etagen
 - 1969 – 1978: 4 Etagen

Typische Gebäudemerkmale für Gebäude A erbaut 1949 – 1958 mit 2 Etagen

Allgemeinen Daten:

- Anzahl Wohnungen: 7
- Anzahl Treppenhäuser: 2
- Mittelwert Wohnfläche pro Gebäude: 380 m² (somit durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnung: 54,3 m²)

Typische Gebäudemerkmale für Gebäude B erbaut 1959 – 1968 mit 3 Etagen

Allgemeinen Daten

- Anzahl Wohnungen: 14
- Anzahl Treppenhäuser: 2
- Mittelwert Wohnfläche pro Gebäude: 852 m² (somit durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnung: 60,9 m²)

Typische Gebäudemerkmale für Gebäude C erbaut 1969 – 1978 mit 4 Etagen

Allgemeinen Daten

- Anzahl Wohnungen: 34

- Anzahl Treppenhäuser: 3
- Mittelwert Wohnfläche pro Gebäude: 2405 m² (somit durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnung: 70,7 m²)

Weitere typische Gebäudemerkmale der Gebäude einer Altersklasse und gleicher Etagenanzahl, wie z.B. Art des Dachaufbau, Tragekonstruktion und Art der Außenwandverkleidung, wurden ebenfalls aus dem LEG-Datensatz ausgelesen und mit der LEG abgestimmt.

Entsprechend dieser Merkmale der typischen LEG-Gebäude wurden die Daten des WI-Wohngebäudebestands-Modells angepasst und auf die drei Beispielhäuser übertragen.

3.2 Die Materialzusammensetzung der ausgewählten Gebäude des Gebäudebestandes der LEG

Das Wohngebäudebestands-Modell des WI modelliert die verschiedenen Bestandteile der Gebäudehülle wie Keller, Außenwände, Dach oder Innenwände und rechnet über Flächen (z.B. Wandflächen) und Dicke diese Bestandteile in Volumenangaben um. Diese Volumenangaben werden anschließend mit Dichtekennzahlen der in diesen Gebäudebestandteilen verbauten Materialien verknüpft und so wieder in Mengenangaben übersetzt, die in diesen Bestandteilen der Gebäudehülle verbaut sind.

Die Flächen der einzelnen Gebäudebestandteile werden wiederum aus den Grunddaten der Gebäude abgeleitet. Dabei werden u.a. folgende Faktoren berücksichtigt: Geschosshöhe, Anzahl der Etagen, Umrechnung der Wohnfläche in Grundfläche unter Berücksichtigung der Etagenanzahl und einem Faktor für Nichtwohnflächen im Gebäude. Weiterhin wird die Gebäudeform (eher quadratisch oder rechteckig) definiert, was wiederum Einfluss auf den Außenumfang des Gebäudes hat, dessen Wert wiederum für die Berechnung der Wandflächen benötigt wird.

An einem Beispiel erläutert, sieht dies wie folgt aus: Das Modell geht bei Gebäude A von zwei Geschossen plus Keller aus. Die Geschosshöhe (inkl. Deckenschicht) wird mit 2,80 m im Modell angenommen. Die Wohnfläche von 380 m² wandelt unser Modell in eine Grundfläche von 281 m² um, woraus sich bei einem rechtwinkligen Grundriss mit einer Ratio Breite/Länge von rund 1 : 2,8 ein Gebäudeumfang von 75,8 m ergibt. Zusammen mit den Geschosshöhen und Anzahl der Geschosse ergibt dies eine Außenwandfläche (abzüglich Fenster und Türen) von rund 557 m². Bei Außenwänden der Baualtersklasse 1949-1958 ist im Wohngebäudebestandsmodell des WI eine Wanddicke von 37 cm für das Tragewerk vorgesehen, so dass sich aus der Wandfläche des Gebäudes A mit 557 m² und der Wandstärke von 37 cm ein Volumen von 206 m³ Tragewerk ergibt. Dieses Volumen wird im Modell schließlich mit Materialkennziffern in Form von Dichtekennzahlen in Tonnen/m³ verknüpft. Im Fall der Baualtersklasse 1949-1958 zu 100% mit der Dichte von Vollziegeln, die in unserem Modell mit 1.800 kg/m³ angegeben ist. Als Ergebnis errechnet das Modell, dass in Gebäude A in den Außenwänden der Gebäudehülle rund 370 Tonnen Vollziegel verbaut sind.

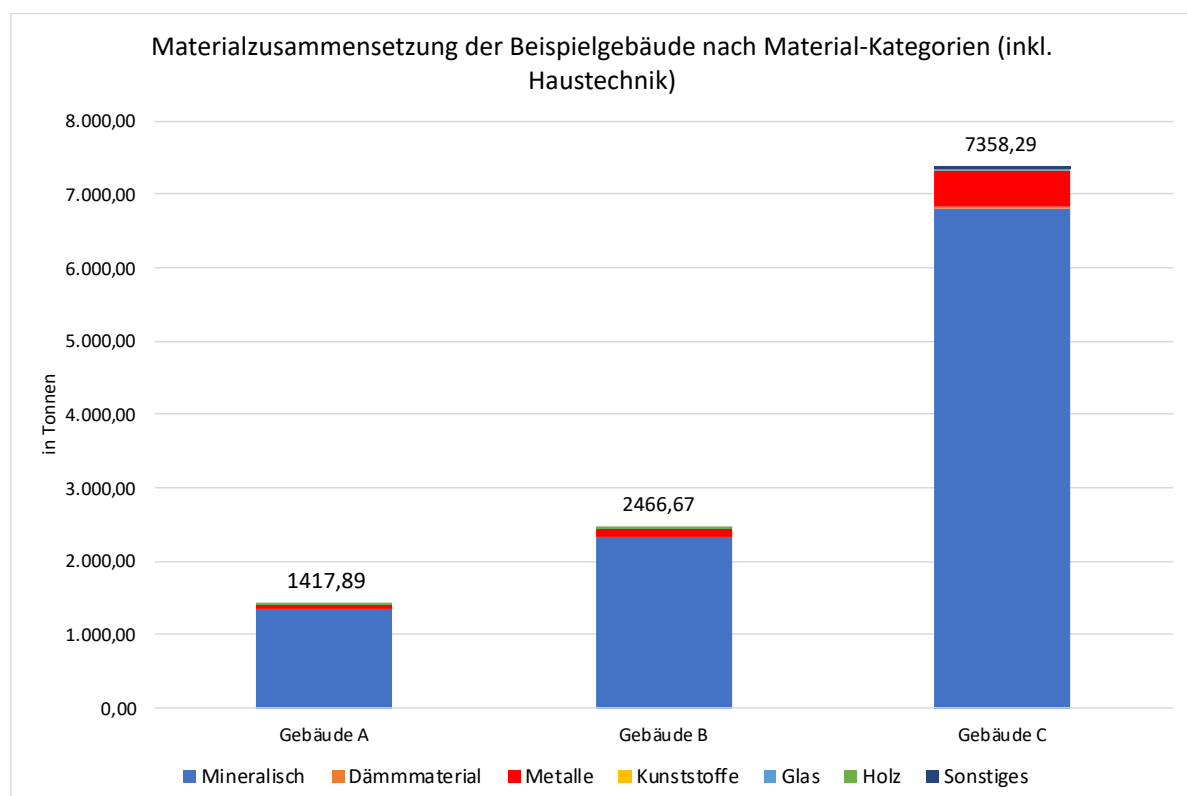
Zusätzlich wird für die Außenwände eine 2 cm dicken Putzschicht in dieser Baualtersklasse modelliert. Die Fenster und Außentüren, die in den Außenwänden verbaut

sind, werden ebenfalls über Kennzahlen hochgerechnet, sind in Tabelle 1 bis 3 des Anhangs allerdings mit den Innentüren zusammengefasst.

Das Wohngebäudebestandsmodell konzentriert sich insgesamt auf die Gebäudehülle und bezieht lediglich die Innenwände mit ein, jedoch ursprünglich nicht die Haustechnik oder Treppen. Ebenso sind Balkone in diesen Altersklassen im WI-Modell nicht vorgesehen. Für das LEG-Projekt wurden daher das Wohngebäudebestandsmodell um die Kennzahlen von Treppen, Innentüren und Haustechnik (ohne Elektrik) erweitert. Diese Daten stammen ursprünglich aus einem Projekt, indem Neubauten modelliert wurden (und dessen Daten für AP3 verwendet wurden). Für die Wärmeversorgung wurden Gasbrennwertkessel mit Heizkörpern unterstellt, für die grobe Materialzusammensetzungen vorliegen. Für Wasser, Abwasser und Sanitär gehen wir davon aus, dass diese Neubau-Daten ebenfalls näherungsweise auf den Gebäudebestand übertragbar sind, auch wenn ggf. im konkreten Fall in unsanierten Gebäuden der 1950 und 1960er Jahre z.B. noch kein PP-Abwasserrohre verbaut, sondern andere Materialien wie Faserzement genutzt wurden. Insgesamt ist die Fehlerquelle von ggf. zu modernen Baumaterialien in der Haustechnik aber niedrig, da die in der Haustechnik gespeicherten Materialien nur vergleichsweise gering sind und erfahrungsgemäß auch in einer ökologischen Bewertung mit allen vor- und nachgelagerten Prozessen die pure Menge der in der Gebäudehülle selbst gespeicherten Materialien nicht ausgleichen.

Aus der Übertragung der Gebäudekennzahlen der drei Mustergebäude der LEG auf das Bestandsmodell des WI mit der oben beschriebenen Erweiterung ergeben sich folgenden, in den Gebäuden gespeicherte, Materialmengen:

Abbildung 3: Materialzusammensetzung der drei Mustergebäude in Tonnen (inkl. Haustechnik)



Alle drei Gebäude bestehen vor allem aus mineralischen Rohstoffen. Metalle sind weitere Materialien, die zumindest einen Anteil im niedrigen einstelligen Prozentbereich aufweisen. Die restlichen Materialkategorien entsprechen jeweils weniger als 1% der Gesamtmenge an verbauten Rohstoffen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Prozentuale Zusammensetzung nach verschiedenen Materialkategorien der Bestandsgebäude in %

Materialkategorien	Gebäude A	Gebäude B	Gebäude C
Mineralisch	95,79%	95,06%	92,65%
Dämmmaterial	0,04%	0,15%	0,20%
Metalle	3,20%	3,85%	6,82%
Kunststoffe	0,03%	0,06%	0,05%
Glas	0,03%	0,04%	0,03%
Holz	0,88%	0,81%	0,18%
Sonstiges	0,02%	0,02%	0,08%
Summe	100,00%	100,00%	100,00%

Die detaillierten Materialzusammensetzung der Gebäude befindet sich in den Tabellen 1-3 des Anhangs. Aus ihnen ist ersichtlich, dass die detaillierte Materialzusammensetzung zwischen den Gebäuden nur leicht variiert. In Gebäude A und Gebäude B wird mit einem Schrägdach gerechnet, weshalb hier Holz- und (Dach-)Ziegel verbaut sind, während in Gebäude C ein 35 cm dickes Flachdach aus Betondecke und Bitumenabdeckung (in Sonstiges) modelliert wird. Ein weiterer Unterschied ist der Aufbau der Innenwände: im Gebäude A wird Bimsbeton unterstellt (bzw. Ziegel im Keller), in Gebäude B und C hingegen Kalksandstein.

Die Materialien, gespeichert in der Haustechnik, sind für alle drei Gebäude in Tabelle 4 im Anhang dokumentiert. Die Haustechnik umfasst Wasser- und Abwasser sowie Heizungstechnik inklusive der Sanitärtechnik und Heizkörper, nicht jedoch die verlegte Elektrik in den Gebäuden. Weiterhin fehlen Daten für Dachrinnen, Kellerfenster oder ähnliche Details, die die Ergebnisse jedoch auch nicht stark beeinflussen würden. Im Vergleich zur Gebäudehülle sind die Mengen an Materialien, die in der Haustechnik gespeichert sind, fast zu vernachlässigen, auch wenn z.B. der Carbon Footprint von metallischen Rohstoffen wie Messing oder Kupfer pro Kilo deutlich höher ist als von Kalksandstein oder auch Beton.

4 Modellierung des Rückbaues von LEG-Gebäuden und deren (Ersatz-)Neubau

4.1 Abrissmodell für die Beispielgebäude der LEG

Für die Modellierung des Rückbaues der in AP1 modellierten Beispiel-Bestandsgebäude der LEG, wurde in diesem Projekt ein theoretisches Rückbau-Modell erstellt, bei dem die ökologischen Auswirkungen des Rückbaus selbst, der Sortierung und Aufbereitung der Abbruchabfälle in der Aufbereitungsanlage und die anschließende Deponierung von den Teilen der Abbruchabfälle, die keiner weiteren Verwertung zugeführt werden können, beachtet wurden. Die eigentlichen Recyclingaktivitäten liegen jedoch außerhalb der Systemgrenzen, d.h. z.B., dass der Einschmelzprozess des Armierungseisens aus Stahlbeton im Elektrostahlwerk außerhalb der Systemgrenze liegt. Der Abbruch und die Vorzerkleinerung an der Abrissstelle, der Transport zur Sortieranlage und die Zerkleinerung und Sortierung in der Sortieranlage liegen jedoch innerhalb der Systemgrenzen.

All diese Prozesse (Abbruch, Transport, Zerkleinerung, Sortierung und Deponierung) sind in Ökobilanzen mit (zumeist energetischem) Aufwand verbunden, der mit einem zusätzlichen Energie- und Materialbedarf und damit verbundenen Treibhausgasemissionen einhergeht. Diese Umweltwirkung kann mit Hilfe von Ökobilanzdatenbanken wie ecoinvent ermittelt werden. Für die Analysen in diesem Projekt wurde die ecoinvent-Datenbank v.3.7 verwendet. Die Abfallbehandlungswege der verschiedenen Bauabfälle sind in ecoinvent überwiegend in drei Varianten unterteilt, die unterschiedliche Behandlungswege darstellen und damit auch unterschiedliche Umweltwirkungen bedeuten. Somit muss für jede Materialkategorie oder Bauteile festgelegt werden, welche dieser drei Verwertungswege für die Abfallkategorie verwendet werden soll.

Variante 1 wird für Materialien verwendet, die direkt an der Abbruchstelle vorsortiert und direkt einem Recycling zugeführt werden können. Dies betrifft z.B. die Materialien, die in Fenstern und Türen verbaut sind, oder den Materialmengen der Haustechnik. Hier wird lediglich der Aufwand für Maschinen zum Abriss unterstellt, z.B. Bagger, aber keine Transportaufwendungen zur Verwertungsstelle. Beispielhaft hierfür kann Stahl angeführt werden, der direkt vorsortiert werden kann, oder PVC-Fensterrahmen, die direkt ausgebaut und einer stofflichen Verwertung zugeführt werden können, um das rezyklierte PVC-Granulat wieder in den Produktionsprozess von neuen PVC-Fenstern miteinzuspeisen, wodurch sie gänzlich ohne Umweltwirkung in den Prozessen bewertet werden können.

Variante 2 umfasst neben dem Abbruch auch den Transport zur Aufbereitungs- und Sortieranlage und die Sortierung selbst. Den weiteren Prozessweg der wiedergewonnen Abfallfraktion liegt anschließend außerhalb der Systemgrenzen dieser Abfallbehandlungsprozesse, während der bis dahin nicht verwertete Teil anschließend entweder thermisch verwertet oder deponiert wird und die Aufwendungen, die mit Verbrennung oder Deponierung verbunden sind, ebenfalls anteilig mitgerechnet werden. So z.B. bei Beton, der in der Sortieranlage im Backenbrecher zerkleinert und anschließend nach Gesteinskörnung und Bindemittel sortiert werden kann. Der Anteil der Gesteinskörnung kann anschließend im Weg- und Straßenbau primär Kies

und Sand substituieren, während die restlichen Abfälle deponiert oder verfüllt werden müssen. Letzteres ist weiterhin Teil der Umweltbewertung.

Variante 3 wiederum sind all jenen Materialien, die weder direkt von der Abbruchstelle vorsortiert in ein stoffliches Recycling gehen können, noch solche Materialien, für die nach Aufbereitung und Sortierung zumindest Teilgrößen stofflich verwertet werden können. Dies sind üblicherweise z.B. Holzabfälle, die oft mit Antipilz-Mitteln behandelt wurden oder einen Farbanstrich aufweisen und daher verbrannt werden. Auch PU-Schau fällt unter diese Variante, da für ihn ebenfalls keine Recyclingoptionen existieren und dieser deponiert bzw. verbrannt wird.

Bei Fenstern und Türen sowie der Haustechnik wird davon ausgegangen, dass diese vor dem Abriss überwiegend noch händisch ausgebaut werden können oder aber, dass sie an der Baustelle gut von den restlichen Abfallmengen separiert werden können. Damit entfällt hier eine Umweltbelastung, da der Großteil dieser Materialien wieder einer stofflichen Verwertung zugeführt werden kann. Einzig beim Holzanteil in Türen wird ebenfalls eine energetische Verwertung unterstellt, da diese oft über einen Farbanstrich verfügen.

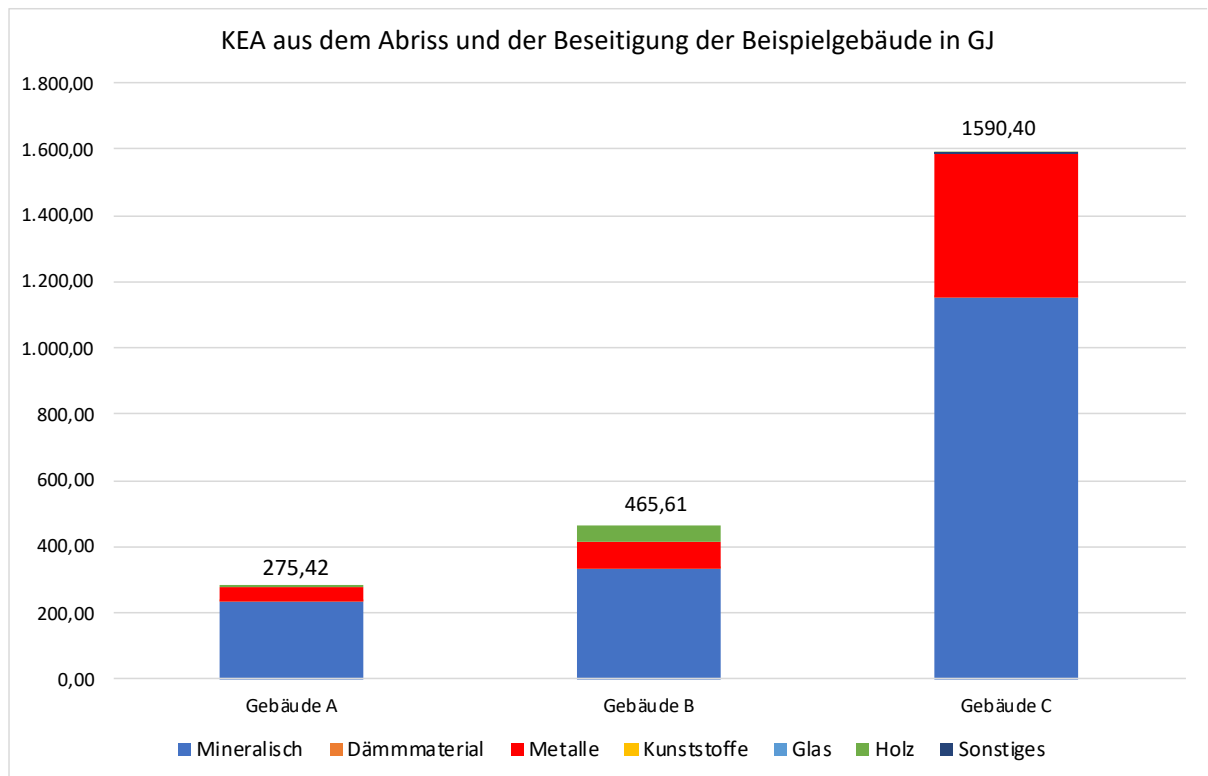
Tabelle 2: Ausgewählte Verwertungswege der verschiedenen Materialkategorien

Materialkategorien	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Anmerkung
Beton		X		Die Gesteinskörnung wird wiederverwertet, der Rest deponiert
Bimsbeton		X		Alternativ wird der concrete gravel-Prozess verwendet
Mörtel/Putz		X	X	50% des Mörtels/Putz wird erst in der Sortieranlage vom Beton etc getrennt und nur geringe Mengen stehen einer Verwertung zur Verfügung
Kalksandstein		X		Alternativ wird der concrete gravel-Prozess verwendet
Porenziegel		X	X	Porenziegel können zum Teil im Straßen- und Wegebau verwendet werden, Annahmen: 50/50 zw. Variante 2 und 3
Vollziegel		X	X	Ziegel können zum Teil im Straßen- und Wegebau verwendet werden, Annahmen: 50/50 zw. Variante 2 und 3
Holz			X	Verbrennung
Mineralwolle			X	Deponierung
EPS			X	Aufgrund der Brandschutzmittel: Deponierung
Sonstige Dämmstoffe			X	Deponierung
Glas	X			Keine Umweltbelastung durch Abbruch

Stahl		X		Der Unterschied der Koeffizienten für Variante 1 und Variante 2 ist gering, Stahlanteil in Türen und Fenstern ohne Umweltbelastung
Aluminium	X			Kein direkter Prozess vorhanden, Annahme: wird direkt einem Recycling zugeführt, keine Umweltbelastung durch Abbruch
Kunststoffe	X			Keine Umweltbelastung durch Abbruch
Sonstiges			X	Bitumenbahnen, Verbrennung
Türen und Fenster	X			Keine Umweltbelastung durch Abbruch
Haustechnik	X			Keine Umweltbelastung durch Abbruch, Annahme: Haustechnik wird entweder noch vor Abriss händisch ausgebaut oder kann einem Recycling zugeführt werden bzw. sind in ihren Mengen für die Umweltbewertung unkritisch

Daraus ergeben sich folgenden Umweltbelastungen, wenn die in diesem Projekt modellierten Gebäude komplett abgerissen und alle darin verbauten Materialien nach den drei Verwertungsmöglichkeiten von Bauabfällen behandelt werden. In Tabelle 6 des Anhangs ist der Kumulierte Energiebedarf abgebildet, der hierfür aufgewendet werden muss: Für Gebäude A, das mit rund 1.420 Tonnen die geringsten Mengen an Materialien verbaut hat, würden Abriss und Verwertung dieser Menge einen Energiebedarf von 275 GJ erzeugen; bei Gebäude C, mit deutlich höherer Wohnfläche und entsprechend höherer Materialzusammensetzung von rund 6.500 Tonnen, würden Abriss und Aufbereitung dieser 7.400 Tonnen mit einem KEA von 1.590 GJ einhergehen (Abbildung 4).

Abbildung 4: KEA aus dem Abriss und der Verwertung/Beseitigung der Beispielgebäude in GJ (inkl. Haustechnik)



Neben einem Energiebedarf ist der Abriss dieser Gebäude und die anschließende Aufbereitung und ggf. Deponierung oder Verbrennung dieser Abfallmengen mit kumulierten Rohstoffaufwendungen von zusätzlich 70 bis 306 Tonnen je nach Gebäude verbunden. Der energetische und stoffliche Aufwand diese Gebäude abzureißen und sachgerecht aufzubereiten, verursacht für ein Gebäude je nach Größe und gespeicherter Materialmenge und Zusammensetzung einen Carbon Footprint von 14 bis 102 Tonnen in CO₂-Äquivalenten (Abbildung 6).

Abbildung 5: KRA aus dem Abriss und der Verwertung/Beseitigung der Beispielgebäude in Tonnen (inkl. Haustechnik)

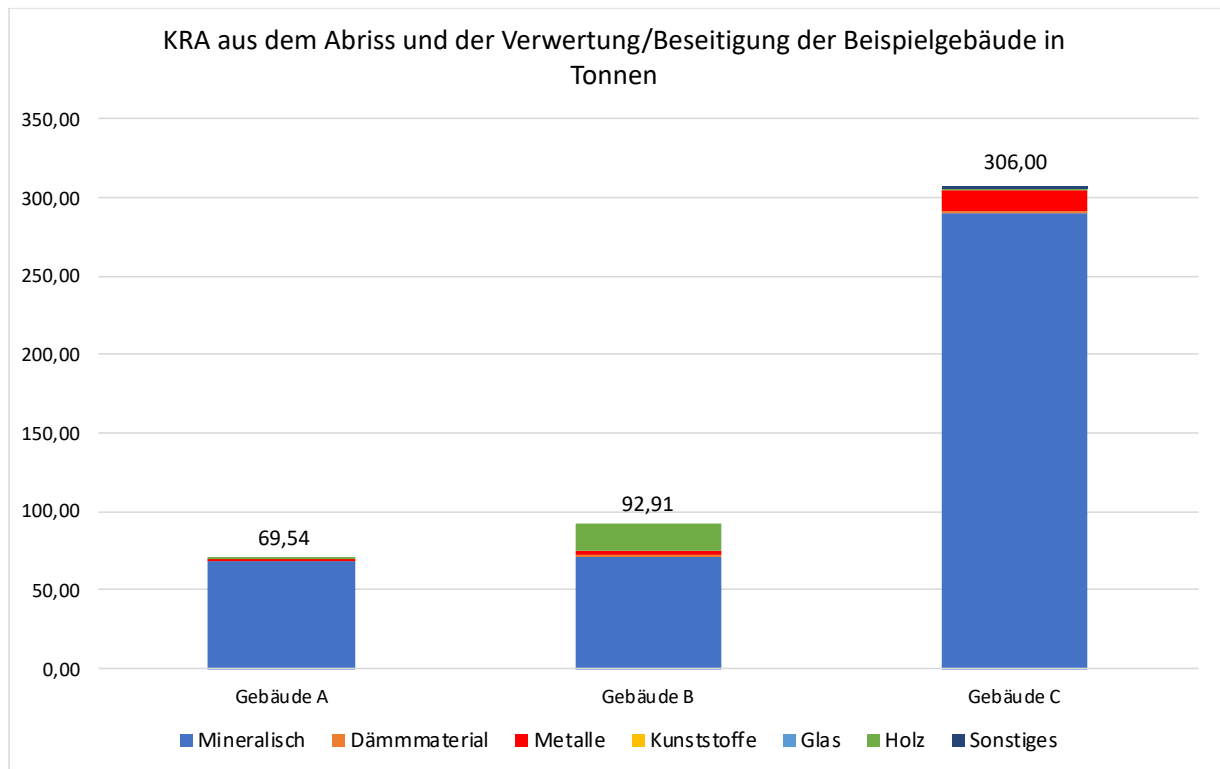
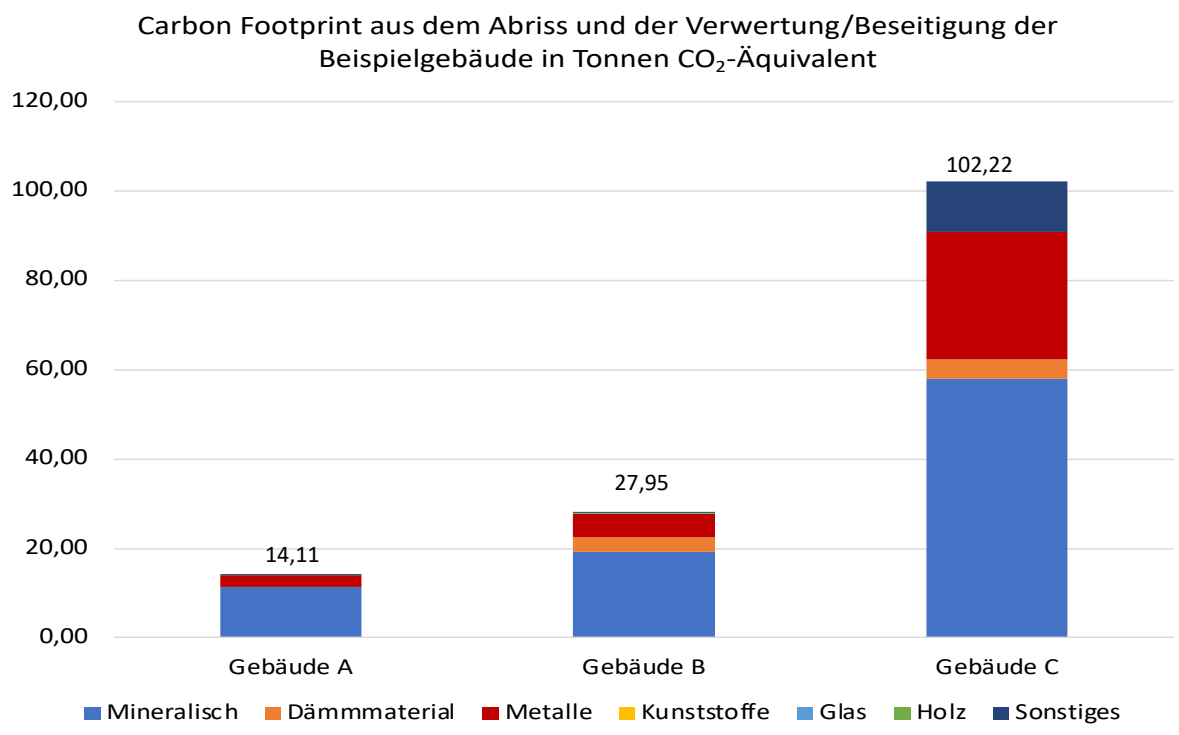


Abbildung 6: Carbon Footprint aus dem Abriss und der Verwertung/Beseitigung der Beispielgebäude in Tonnen CO₂-Äquivalent



Aus den detaillierten Tabellen 6 bis 8 im Anhang kann entnommen werden, dass Abriss und Aufbereitung der Betonabfälle die Höhe der Umweltindikatoren maßgeblich beeinflusst. Dies ergibt sich zum einen aus der Bedeutung von Beton für die Materialzusammensetzung der Bestandsgebäude, zudem ist die Zerkleinerung des Betons mittels Backenbrecher oder anderen Technologien vergleichsweise energieintensiv. Gleichzeitig ist in Abbildung 4 und 6 zu sehen, dass hinsichtlich des Energiebedarfs und der CO₂-Emissionen die mit dem Abriss verbundenen metallischen Rohstoffe prozentual deutlich dominanter sind als ihr Anteil am gespeicherten Material im Gebäude. Dies ist auf die hohen KEA und CF-Koeffizienten der Stahlverwertung zurückzuführen.

4.2 Modellierung Neubau der Beispielgebäude der LEG

Im Neubau-Szenario wird simuliert welcher Rohstoffbedarf notwendig wäre, wenn die drei Beispiel-Gebäude der LEG durch exakt gleich große Neubauten ersetzt werden würden. Dies würde in der Realität vermutlich nicht geschehen, da es zum einen grundsätzlich den Wunsch geben dürfte, kompakter zu bauen und ggf. wenigstens bei Gebäude A eine zusätzliche Etage zu realisieren (z.B. durch Dachausbau oder einer 3. Etage bei Flachdach) und damit mehr Wohneinheiten zu schaffen. Gleichzeitig sind die Wohnungen der 1950er-1960er Jahre häufig durch kleine und nicht mehr zeitgemäße Wohnungszuschnitte gekennzeichnet, so dass im Neubau häufig größere Wohneinheiten realisiert werden als im Bestand vorhanden. In der Folge dieser beiden gegenläufigen Trends kann die Anzahl der Wohnungen ggf. gleichbleiben, der Materialaufwand pro Wohneinheit aufgrund der größeren Wohnung aber steigen. Auch in Sanierungsprojekten wird das Thema Wohnungsgröße häufig mit aufgegriffen und die Anzahl der Wohneinheiten durch Neuzuschnitte verändert. Auch hier dürfte die Vergrößerung der Wohnungen und damit einhergehende Verringerung der Anzahl an Wohneinheiten wichtiger sein als ggf. kleinere Wohneinheiten für mehr Single- oder Senioren-Haushalten zu schaffen.

Die Daten für die Modellierung des Neubaus basieren auf Daten aus Weißenberger (2016), der verschiedene Niedrigstenergiegebäude hinsichtlich ihres Materialaufwandes und den damit verbundenen ökologischen Wirkungen untersucht hat. Diese Daten wurden vom WI so aufbereitet, dass sie auf unterschiedliche Wohn- bzw. Grundflächenflächen oder unterschiedliche Anzahl an Etagen angepasst werden können. Dieses WI-Neubau-Modell wurde auch für die Modellierung des zukünftigen Wohnungsbedarfes von vier Kommunen im UBA-Projekt DemRes II (in Veröffentlichung) verwendet.

In der Arbeit von Weißenberger (2016) sind Niedrigstenergiehäuser in verschiedenen Bauweisen untersucht worden: Massivbauweise mit Wärmedämmung-Verbundsysteme (WDVS), Massivbauweise monolithisch oder aber auch in Leichtbauweise. Für die Modellierung des Neubaus wurden die Daten in Massiv-Bauweise mit WDVS verwendet. Diese stimmen grundsätzlich mit den Daten überein, die die LEG für zwei konkrete eigene Neubau-Projekte in Köln bzw. Essen in Form von Energiebedarfs-Nachweisen zur Verfügung gestellt hat.

Im Vergleich zum Bestandsmodell ist das Neubau-Modell deutlich detaillierter hinsichtlich der Materialzusammensetzung der einzelnen Bauteile der Gebäudehülle. So

gibt es im Bestandsmodell z.B. lediglich eine Außenwand und diese besteht nur aus drei bis vier Schichten: dem Tragwerk, der Dämmung, ggf. Verblendung und der Verputzung. Im Neubau-Modell wird hingegen nach verschiedenen Außenwänden unterschieden: gegen Außenluft und gegen Erdreich; ebenso bei Decken (gleiche Temperatur sowie unterschiedliche Temperatur). Jedes dieser Bauteile ist zudem in der Schichtzusammensetzung detaillierter als das Bestandsmodell. So besteht die Außenwand gegen Außenluft in Massivbauweise mit WDVS aus 10 verschiedenen Schichten, angefangen von Innenanstrich, über Gipsputz und Haftbrücken, zum Tragwerk aus Beton, der EPS-Dämmung, einem Armierungsgewebe zwischen Dämmung und Außenputz und schließlich dem Außenanstrich.

Diese Vielfalt der Schichten erweitert die Anzahl der zu betrachtenden Materialien enorm und reduzieren die Vergleichbarkeit mit der Bestandsmodellierung. Außerdem müssen die Daten des Neubaus grundsätzlich mit den Abriss-Modellierungen kompatibel sein, um sie in AP4 gemeinsam einem Sanierungsszenario gegenüberzustellen. Daher wurde die Materialauswahl im Neubau an die Kategorien des Abrisses (und damit des Bestands-Szenarios) angepasst. Das führt dazu, dass neue Materialien berücksichtigt werden, die im Bestandsmodell grundsätzlich vorgesehen sind, aber in den drei Beispielhäusern in der konkreten Modellierung nicht ausgewiesen wurden. So z.B. Gipskarton oder XPS. Andere Materialkategorien wie z.B. Fliesenkleber, Innenanstrich oder mineralische Haftbrücken werden dagegen in der Kategorie „Sonstiges“ zusammengefasst. Bei der Umweltbewertung liegen zudem für diese „sonstigen“ Bauteilelemente häufig keine geeigneten LCA (Life Cycle Analyse) -Prozesse vor, so dass alle Materialien, die in „Sonstiges“ zusammengefasst werden, nicht mit in die ökologische Bewertung einfließen.

In Abbildung 7 und 8 (sowie in Detail in Tabelle 9 und 10 im Anhang) sind im Überblick die Materialzusammensetzung der drei Beispielgebäude als Massivbauweise mit WDVS dargestellt. Grundsätzlich wäre auch eine Ausweisung der Materialien nach Bauteilen wie im Bestandsmodell möglich. Zu erkennen ist, dass die Materialzusammensetzung gegenüber den Bestandsmodell nicht wesentlich angestiegen, zumal die Neubau-Modellierung Balkone in allen drei Gebäuden enthalten, während in der Bestandsmodellierung diese nur bei den Gebäuden B und C vorgesehen sind.

Abbildung 7: Materialzusammensetzung Neubau Gebäude A bis C (Gebäudehülle) in Tonnen

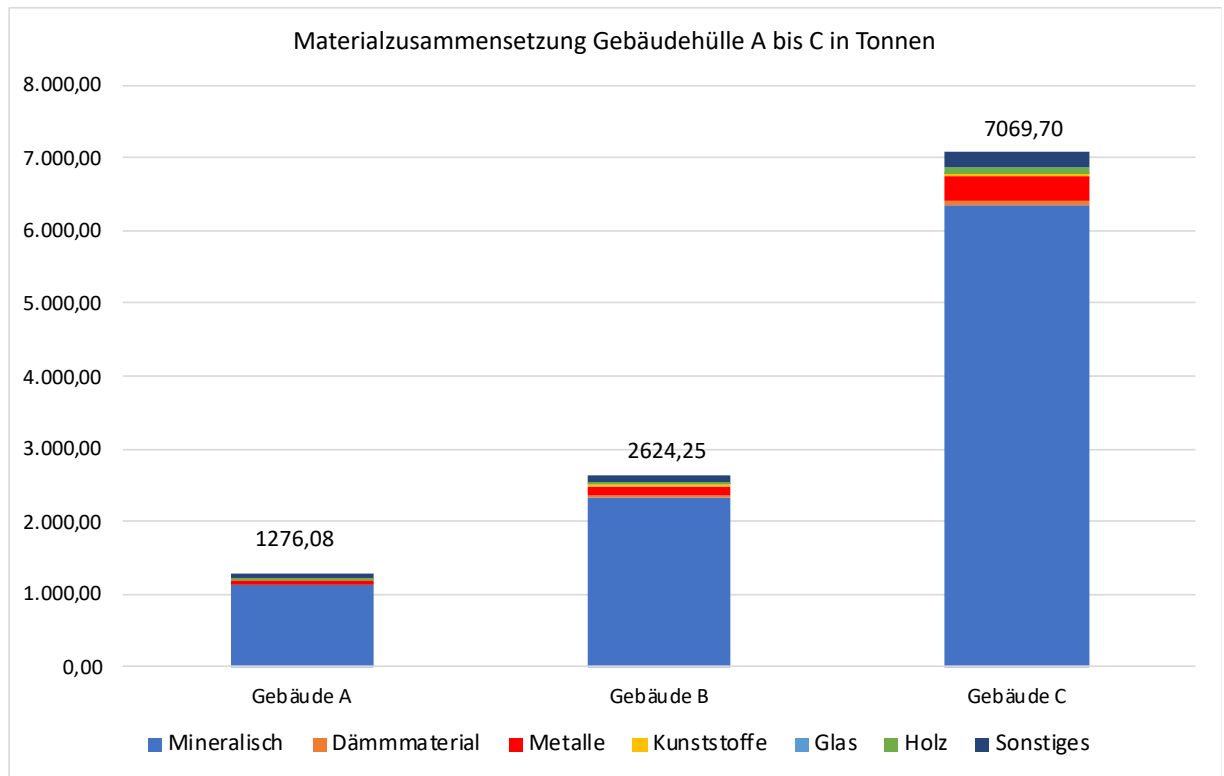
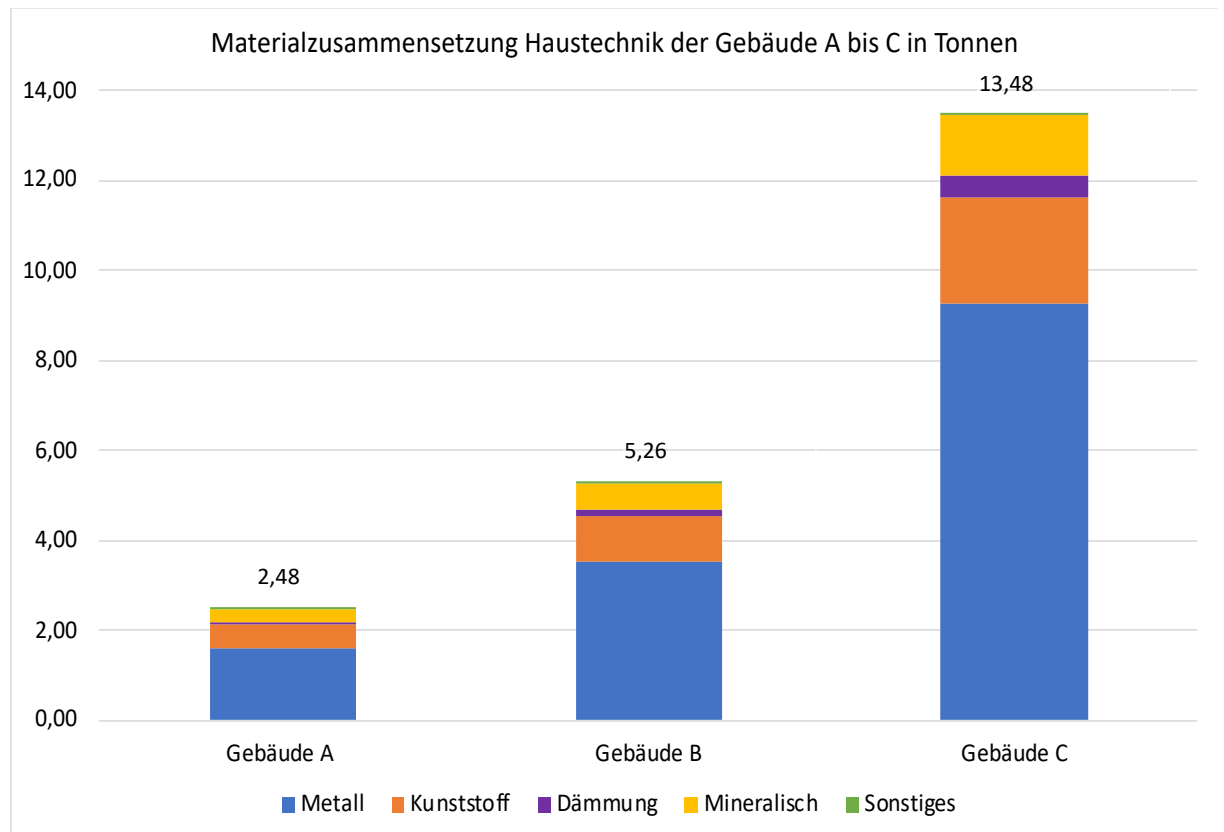


Abbildung 8: Materialzusammensetzung Neubau Gebäude A bis C (Haustechnik) in Tonnen

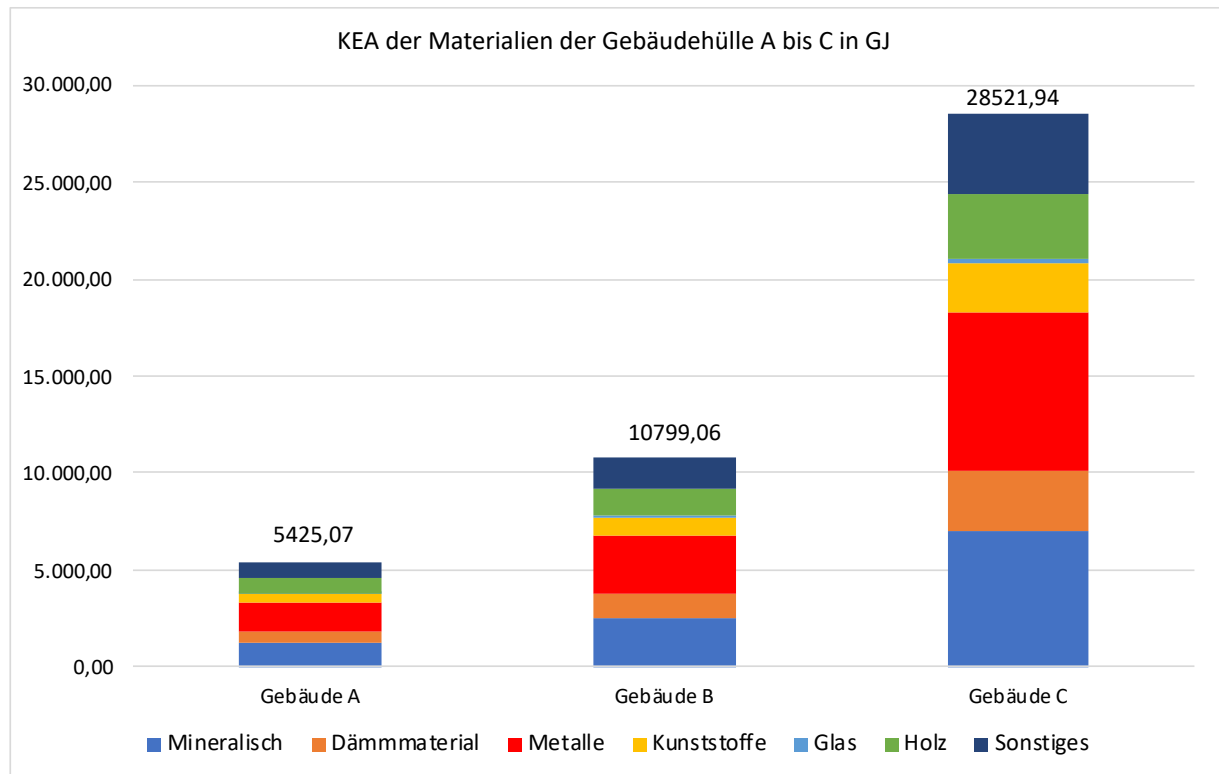


Der Neubau und der Abbau bzw. Produktion von Baustoffen ist wie der Abriss mit Umweltwirkungen verbunden. Diese werden wie im Abrissmodell mittels der Indikatoren KEA, KRA und Carbon Footprint abgebildet und enthalten alle Umweltwirkungen entlang der Vorkette, die bei der Bereitstellung der in Tabelle 9 und 10 des Anhangs dokumentierten Materialmengen angefallen sind. Diese beinhalten auch die Transporte entlang der Prozesskette soweit diese in den ecoinvent-Prozessen enthalten sind. Es liegen keine Informationen über die Ressourcennutzung vor, die bei der Erstellung der Gebäude selbst anfallen, ebenso wenig über die Menge an Produktionsabfällen, die bei der Errichtung der Gebäude anfallen würden. Somit liegt die Systemgrenze der ökologischen Bewertung an der Baustelle selbst und berücksichtigt alle Aufwendungen in der vorgelagerten Wertschöpfungskette vom Abbau der Rohstoffe bis zur Baustelle inkl. des Transport bis zur Baustelle. Die Baustelle selbst liegt jedoch außerhalb der Systemgrenze der Neubau-Modellierung.³

Diese Vorleistungsketten für einzelne Materialien können sehr lang sein und gerade für metallische Rohstoffe sind die Umwelt-Koeffizienten pro Tonnen Material mitunter sehr hoch. Dies wird verständlich, wenn man sich z.B. den niedrigen Erzgehalt von Kupfer vor Augen führt (üblicherweise unter 1%) und damit eine Vorstellung bekommt, wieviel Material bewegt werden muss, um 1 Tonnen Kupfer zu gewinnen. Zudem sind metallurgische Prozesse, ähnlich wie die der Zementindustrie, sehr energieintensive Prozesse, selbst wenn z.B. Armierungsstahl zu großen Teilen aus Schrott im Elektrolichtbogenofen hergestellt wird und nicht aus Eisenerz im Hochofen-Verfahren.

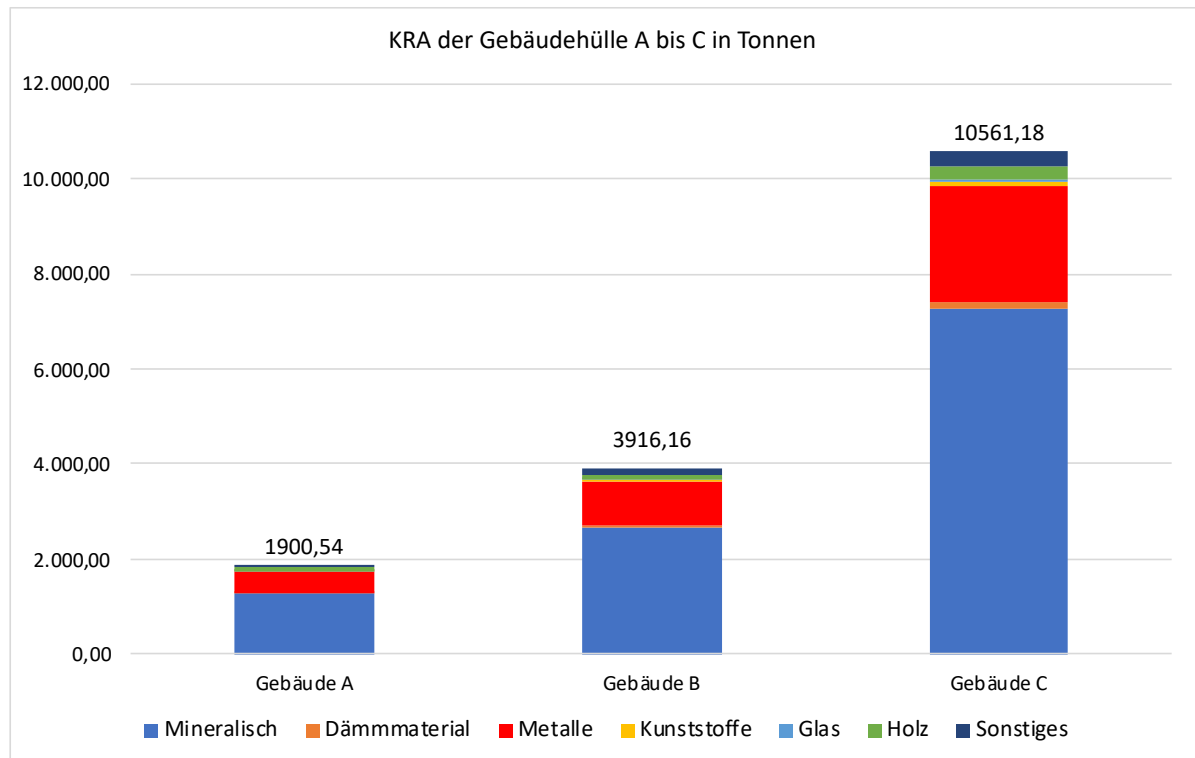
Die Bereitstellung der notwendigen Materialien für den Neubau ist mit einem Energieaufwand entlang der Vorkette von 5.400 bis 28.500 GJ verbunden. Die Werte, die mit dem Abriss und Verwertung verbunden sind, liegen in etwa bei 4% der Werte aus der Bereitstellung der Materialien für den Neubau. Mit anderen Worten: der KEA würde sich um rund 4% erhöhen, wenn der Abriss der Bestandsgebäude dem Neubau mit zugerechnet werden. Auffallend ist die sehr heterogene Bedeutung der verschiedenen Baumaterial-Kategorien: Obwohl die mineralischen Rohstoffe mengenmäßig dominant sind, ist die Umweltwirkung, zumindest beim Indikatoren KEA, deutlich stärker durch andere Materialkategorien bestimmt. Beim Carbon Footprint und dem KRA nimmt die Bedeutung der Metalle an der Gesamtumweltbelastung ebenfalls deutlich zu.

³ Zudem fallen relevanten Energieverbräuche oder Produktionsabfälle auch bei der alternativ stattfindenden Sanierung an. Allerdings zeigen verschiedenen Bauprojekte, die stark auf vorproduzierten Bauteilen setzen, die auf der Baustelle verbaut werden, dass so die Montagezeit deutlich reduziert werden kann (womit auch der Energieverbrauch auf Baustellen niedriger sein dürften), als auch dass weniger Produktionsabfälle anfallen.

Abbildung 9: KEA der Materialien im Neubau der Gebäudehülle A bis C in GJ

Der kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) liegt bei 1.900 t bzw. 10.500 t (je nach Gebäudetyp). Dies bedeutet, dass statt der 1.280 bis 7.000 Tonnen, die in den Gebäuden gespeichert sind, der eigentlichen Materialbedarf entlang der Vorkette rund 150% der Menge entspräche, die in den Gebäuden selbst verbaut wäre, wenn diese Gebäude tatsächlich so erstellt werden würden.

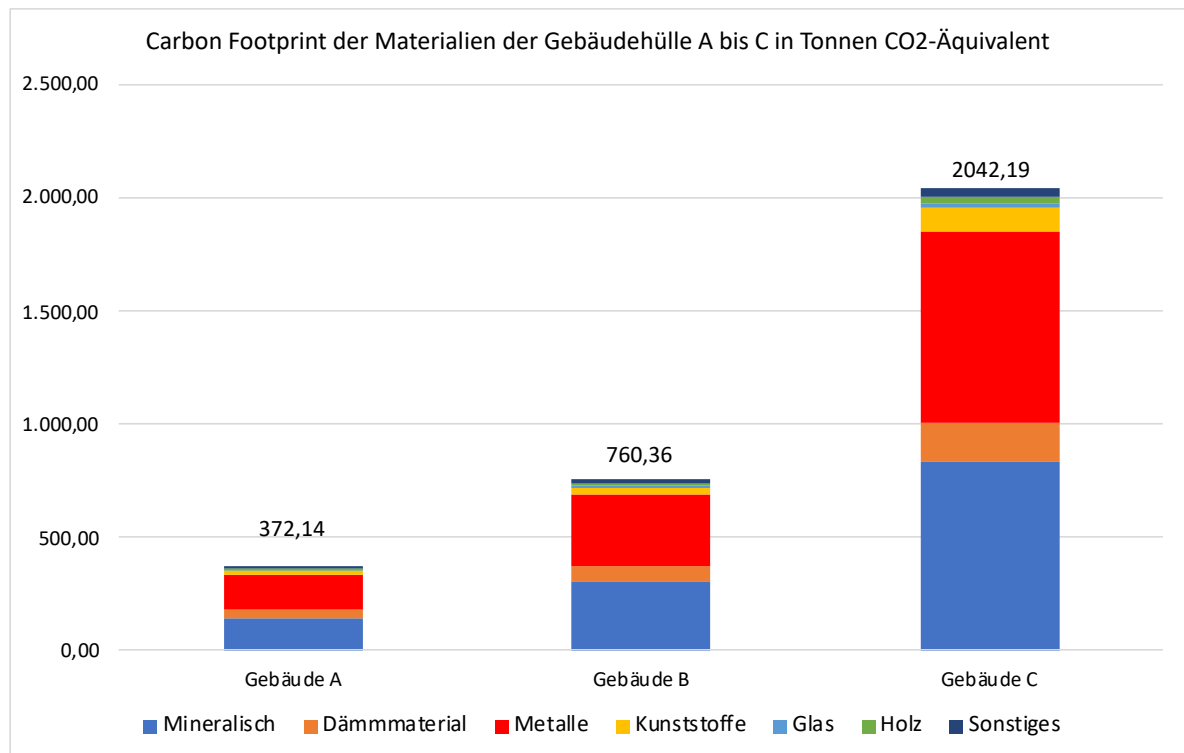
Die Umweltwirkungen des Abrisses und der Verwertung der Abbruchmengen liegen bei ca. 2,5% des Neubaus.

Abbildung 10: KRA der Materialien im Neubau der Gebäudehülle in Tonnen

Mit der Bereitstellung der Materialien für die Neubauten wären entlang der Wertschöpfungskette für diese einzelne Häuser Treibhausgasemissionen in Höhe von 372 bis 2.042 Tonnen CO₂-Äquivalent verbunden; je nachdem welches der drei Beispielgebäude der LEG betrachtet wird. Rund ein Viertel der Emissionen wäre der Herstellung von Beton zuzurechnen, rund 40% des Carbon Footprint wäre mit der Herstellung von Stahl assoziiert. Da Stahl in den hier betrachteten Gebäuden vor allem als Bewehrungsstahl verwendet wird, würde der Einsatz von Beton und Stahlbeton rund 2/3 des Carbon Footprint der Gebäude entsprechen.

Auch für den Carbon Footprint spielt der Abriss und die Verwertung im Vergleich zu einem Neubau nur eine untergeordnete Rolle. Die Größenordnung liegt bei 3 bis 4% des Neubaus.

Abbildung 11: Carbon Footprint der Materialien im Neubau der Gebäudehülle A bis C in Tonnen CO₂-Äquivalent



Die detaillierten Ergebnisse für die Gebäudehülle (Tabelle 11 bis 13 im Anhang) erhöhen sich noch leicht, wenn die Materialmengen der Haustechnik mit betrachtet werden (Tabelle 14 bis 16 im Anhang).

Während die in der Haustechnik verbauten Mengen nur 0,2% der in der Gebäudehülle verbauten Materialmengen entsprechen, stiege der Anteil der Haustechnik gegenüber der Gebäudehülle bei der Umweltbewertung je nach Umweltindikator auf 2% bis 8%. Dieser höhere Anteil der Haustechnik in der Umweltbewertung entlang der Vorleistungskette ist auf den höheren Metallanteil in der Haustechnik zurückzuführen. Aber die in der Haustechnik verbauten Materialmengen wären zu gering, um die Ergebnisse nachhaltig in eine andere Richtung zu lenken.

4.3 Ökonomischen Kosten für Rückbau und Verwertung sowie des Neubaus.

Die Fragen der Kosten von Abriss und Neubau versus Sanierung ist gerade im Vermietungssegment der LEG eine wichtige Entscheidungsgrundlage bei der Frage welche der beiden Strategieansätze verfolgt werden sollte.

Für die Kosten der Sanierung und des Neubaus wurden auf Angaben der LEG zurückgegriffen und der Schwerpunkt des Auftragnehmers lag in der Recherche von Kosten, die sich aus dem Abriss und der Verwertung ergeben.

Für das Szenario des Abbruchs der Bestandsgebäude und des Baus von Ersatzneubauten wird dabei unterschieden in die Abbruchkosten, die Kosten für die Entsorgung des Materials und die Kosten für den Neubau.

Im Schritt des Abbruchs und der Entsorgung der verschiedenen Materialien wird außerdem unterschieden in die Varianten

1. für Materialien, die direkt an der Abbruchstelle vorsortiert und direkt einem Recycling zugeführt werden können,
2. umfasst neben dem Abbruch auch den Transport zur Aufbereitungs- und Sortieranlage und die Sortierung selbst,
3. Variante 3 wiederum sind all jene Materialien, die weder direkt von der Abbruchstelle vorsortiert in ein stoffliches Recycling gehen können, noch solche Materialien, für die nach Aufbereitung und Sortierung zumindest Teilgrößen stofflich verwertet werden können, sondern deponiert werden.

Für die Berechnung wurden Daten aus dem Excel-Tool „Kostenermittlung für Rückbau- und Abbrucharbeiten. Ermittlung von Separations- und Entsorgungskosten schadstoffhaltiger Materialien und Bauteile“ genutzt, das im Rahmen des REFINA-Projekts „KMU entwickeln KMF“ entstanden ist.

Abbruchkosten

Die Abbruchkosten der Gebäude beziehen sich grundsätzlich auf den Bruttorauminhalt (BRI) [m³], der sich nach DIN 277 aus dem Volumen der Gebäude ergibt. Hierbei werden Decken, Wände und Dächer miteinbezogen. Die Kosten für den Abbruch belaufen sich laut der zugrundeliegenden Datenbank des Berechnungs-Tools auf 1,5 €/m³ BRI, eine Entkernung wird mit 3,1 €/m³ BRI angesetzt. Für die drei Beispiel-Bestandsgebäude ergeben sich nach den Grunddaten der Modelle zu Grundfläche, Etagenanzahl, Breite-/Länge-Verhältnis, Höhen von Keller, Geschossen und Dach sowie der Dachfläche (vgl. Tabelle 3) folgende BRI: 2.677 m³ für Gebäude A, 3.947 m³ für Gebäude B und 8.305 m³ für Gebäude C.

Tabelle 3: Größen zur Berechnung des BRI

	A	B	C
Grundfläche [m ²]	281	420	890
Etagen	2	3	4
Breite [m]	10	12	18
Länge [m]	28	34	50
Höhe Keller [m]	2,2	2,2	2,2
Höhe Geschosse [m]	2,8	2,8	2,8
Dachfläche [m ²]	360	539	934
Höhe Dach [m]	2,8	2,8	2,8
BRI [m ³]	2.677	3.947	8.305

Die Kosten für den Abbruch belaufen sich demnach auf

- Gebäude A: 12.314,20 €
- Gebäude B: 18.156,20 €
- Gebäude C: 38.203,00 €

Entsorgungskosten

Die Entsorgungskosten beziehen sich wiederum auf die vorliegende Masse der verschiedenen Materialfraktionen und werden wie folgt angenommen:

Die Entsorgung von Beton wird mit 8 €/t berechnet, die Entsorgung von Ziegeln ebenfalls mit 8 €/t, die Entsorgung von sonstigem mineralischem Material mit 13 €/t, die Entsorgung von Holz mit 50 €/t, die Entsorgung von Metallen mit -120 €/t und die Entsorgung von Restabfall mit 250 €/t. Metalle gehen hierbei negativ in die Berechnung ein, da diese gewinnbringend weiterverkauft werden können.

Außerdem wird innerhalb des Berechnungs-Tools unterschieden in drei verschiedene Abbruchszenarien:

1. Der **nicht selektive Abbruch**, bei dem von einer groben Vorsortierung des Materialgemischs auf der Abbruchbaustelle in die Fraktionen Beton, Ziegel, Holz und Metalle ausgegangen wird und die Bauteile des Innenausbaus nicht demontiert werden. Es wird angenommen, dass die Fraktionen Beton und Ziegel jeweils zu 40 % sortenrein und je zu 50 % als sonstiges mineralisches Material verwertet werden, 10 % werden beseitigt. Die Fraktionen Holz und Metalle werden jeweils zu 50 % sortenrein verwertet und zu 50 % beseitigt.
2. Beim **teilselektiven Abbruch** wird von einer genaueren Vorsortierung des Materialgemischs auf der Abbruchbaustelle im Vergleich zum konventionellen Abbruch in die genannten Fraktionen ausgegangen. Dabei werden Beton und Ziegel jeweils zu 75 % sortenrein und zu 21 % als sonstiges mineralisches Material verwertet. 4 % werden beseitigt. Die Fraktionen Holz und Metalle werden je zu 90 % sortenrein verwertet und zu 10 % beseitigt.
3. Im Szenario des **selektiven Abbruchs** werden die Baumaterialien bestmöglich getrennt und sortenrein verwertet oder beseitigt. Es wird keine Vermischung der Abbruchmaterialien angenommen. Die Kosten für die Entkernung werden aufgrund des höheren Demontageaufwandes mit dem Faktor 1,5 multipliziert.

Exemplarisch angewendet auf die Fraktion Beton im Beispiel-Bestandsgebäude A würden sich die Kosten für den Abbruch bei einer Masse von 667,54 t Beton und einem BRI von 2.677 m³ somit wie folgt ergeben:

Tabelle 4: Beispielhafte Gegenüberstellung der Massen und Kosten bei unterschiedlicher Durchführung des Abbruchs

	Konventioneller Abbruch		Teilselektiver Abbruch		Selektiver Abbruch	
	Masse [t]	Kosten [€]	Masse [t]	Kosten [€]	Masse [t]	Kosten [€]
Zuordnung Betonfraktion (8 €/t)	267,02	2.136,13	500,66	4.005,24	667,43	5.340,32
Zuordnung mineralische Fraktion (13 €/t)	333,77	4.339,01	140,18	1.822,38	0	0
Zuordnung Restabfallfraktion (250 €/t)	66,75	16.688,50	26,70	6.675,4	0	0

Demontage*	1,5 €/m ³	417,21	1,5 €/m ³ - 3,1 €/m ³	1.279,45	1,5 €/m ³ -4,65 €/m ³	1.710,57
Summe ohne Demontage	667,54	23.163,64	667,54	12503,02	667,54	5.340,32
Summe mit Demontage		23.580,85		13782,48		7.050,89

*Die Demontage wurde mit Bezug auf das Volumen des Betons berechnet statt auf den BRI zurückzugreifen. Hierfür wurde die Masse des Betons mit der Dichte von 2,4 t/m³ verrechnet. Dieser Ansatz wurde gewählt, um das Ergebnis weniger zu verzerren.

Aus Tabelle 4 ist ersichtlich, dass die Demontagekosten vom konventionellen hin zum selektiven Abbruch zwar zunehmen, die Gesamtkosten allerdings durch gleichzeitig sinkende Entsorgungskosten abnehmen.

Auf Grundlage der bisherigen Erkenntnisse und Überlegungen wurde für die Berechnung im vorliegenden Projekt ein teilselektiver Abbruch angenommen.

Die Zusammensetzungen der Gebäudehüllen der drei Beispiel-Bestandsgebäude sind Tabelle 5 zu entnehmen. Da das Berechnungs-Tool nur die bereits genannten sechs Fraktionen Beton, Ziegel, Sonstiges mineralisches Material, Holz, Metalle sowie Restabfall unterscheidet, werden die vorliegenden Massen diesen Fraktionen zugeteilt. Dabei fallen Beton und Bimsbeton unter die Beton-Fraktion, Vollziegel und Porenziegel in die Ziegel-Fraktion, Mörtel/Putz und Kalksandstein unter die Fraktion der Sonstigen mineralischen Materialien, Holz bleibt als solches bestehen, Aluminium und Stahl werden den Metallen zugeordnet, Mineralwolle, EPS, Schaumglas und sonstige Dämmstoffe fallen unter die Restabfall-Fraktion. Glas, Kunststoffe und Sonstige werden in der Bilanz nicht miteinbezogen, da sie weder einer der ersten fünf Fraktionen zugeordnet werden können noch als Restabfall beseitigt werden müssen. Diese Vernachlässigung wird das Ergebnis nicht nachhaltig beeinflussen, da es sich hier nur um einen geringen Volumenstrom handelt.

Tabelle 5: Bestandteile Gebäudehülle Bestandsgebäude A-C

Bestandteil Gebäudehülle	Gebäudehülle A	Gebäudehülle B	Gebäudehülle C	Kategorie
Beton	667,54	1.373,61	4.747,52	Beton
Bimsbeton	66,80	247,36		Beton
Mörtel/Putz	17,83	135,37	312,88	Sonstiges mineralisches Material
Kalksandstein		316,62	750,97	Sonstiges mineralisches Material
Vollziegel/Porenziegel bei C	606,05	271,86	1.005,77	Ziegel
Holz	12,55	20,04	12,96	Holz
Mineralwolle		0,57		Restabfall

EPS		0,99	1,32	Restabfall
Sonstige Dämmstoffe/ Schaumglas bei C	0,45	1,89	12,81	Restabfall
Glas	0,47	1,06	2,01	-
Stahl	43,87	91,62	492,86	Metall
Aluminium		0,11	0,16	Metall
Kunststoffe		0,66	1,28	-
Sonstiges			4,86	-
Summe	1.414,54	2.461,76	7.345,42	

Es ergibt sich, dass bei teilselektivem Abbruch der Gebäude für die Entsorgung folgende Kosten entstehen:

- Gebäude A: 22.687,08 €
- Gebäude B: 35.980,29 €
- Gebäude C: 89.108,21 €

Neubaukosten

Die Kosten für die Errichtung des jeweiligen Ersatzneubaus wurden in einem ersten Ansatz mit 3000 €/m² Wohnfläche angenommen. Darin sind auch Kosten enthalten, die nicht unmittelbar mit Materialkosten für die Gebäudehülle oder Haustechnik in Verbindung stehen. Dies können z.B. Kosten für Außenarbeiten oder für die Herstellung von entsprechenden Parkflächen für die Nutzer des Gebäudes sein. Auch für die Sanierung wurden Gesamtkosten der untersuchten Sanierungsprojekte pro m² Wohnfläche verwendet, auch wenn hier in den Sanierungsprojekten ebenfalls Kostenanteile enthalten sind, die mit der energetischen Modernisierung nicht zusammenhängen.

- Gebäude A: Wohnfläche 380 m² * 3000 € = 1,14 Mio. €
- Gebäude B: Wohnfläche 852 m² * 3000 € = 2,56 Mio. €
- Gebäude C: Wohnfläche 2405 m² * 3000 € = 7,21 Mio. €

Zusammen mit den Abriss- und Entsorgungskosten der Bestandgebäudes würde dies überschlägige Kosten von

- Gebäude A: 1,14 Mio. € + 12.314,20 € + 22.887,08 € = 1,18 Mio. €
- Gebäude B: 2,56 Mio. € + 18.156,20 € + 35.980,29 € = 2,61 Mio. €
- Gebäude C: 7,21 Mio. € + 38.203,00 € + 89.108,21 € = 7,34 Mio. €

ergeben.

5 Modellierung einer energetischen Sanierung von LEG-Bestandsgebäuden

Die Sanierung der drei beispielhaften Bestandsgebäude wird auf Grundlage von konkreten Sanierungsprojekten der LEG modelliert. Dieser Ansatz wurde aus folgenden Überlegungen herausgewählt:

- Die Modellierung spiegelt den tatsächlichen Umfang der Sanierung im Gebäudebestand der LEG gut wider.
- Daraus abgeleitet kann die energetische Qualität der sanierten Bestandsgebäude gut auf die modellierten Gebäude übertragen werden.
- Und die ökonomischen Kosten der tatsächlichen Sanierungsprojekte lassen Rückschlüsse über durchschnittliche Sanierungskosten pro m² Wohnfläche zu, die so auf die drei Muster-Gebäude übertragen werden können.

Das Bestandsgebäude des Zeitraums der Bauperiode 1949-1958 wurde anhand zweier Sanierungsprojekte in Düsseldorf modelliert; für den Zeitraum 1959-1968 wurden die Daten von jeweils einem Sanierungsprojekt in Essen und Bielefeld ausgewertet und für die dritte Bauperiode (1969 – 1978) jeweils ein Gebäude in Dortmund und Castrop-Rauxel verwendet. Alle Sanierungen fanden innerhalb der letzten 5 Jahre statt.

Während der energetisch relevante Teil der Sanierung der beiden Gebäude in Düsseldorf sich auf die Dämmung der Fassade, der Kellerdecke und dem Austausch der Außentüren beschränkte, waren die Sanierungen in den übrigen Objekten umfangreicher und schlossen sowohl den Austausch der Fenster als auch bei drei der vier Projekte eine Modernisierung des Daches mit ein. Eine Dämmung des Daches bzw. der obersten Decken wurde in allen vier untersuchten Sanierungen der beiden jüngeren Bauperioden durchgeführt.

In allen untersuchten Sanierungsprojekten wurden ähnlichen Dämmmaterialien in ähnlichen Schichtdicken verbaut. Diese Angaben wurden in der Modellierung der hypothetischen Sanierung der drei Beispielgebäude übertragen und berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass bei einem Fensteraustausch als neue Fenster zweifach verglasten Niedrigenergiefenster verbaut wurden, die mit Isoliergas einen besseren U-Wert erreichen als herkömmliche Doppelverglasungsfenster mit einer Luft-Isolierung zwischen den beiden Fensterscheiben. Sowohl bei den alten wie neuen Fenstern gehen wir von PVC-Fenstern aus.

Die bei der Sanierung anfallenden Abfallmengen wie z.B. ausgebaute Fenster oder Türen wurden analog zum Abrissmodell ebenfalls ökologisch bewertet und müssen mit der Umweltwirkung der in der Sanierung verbauten neuen Materialien zusammen bewertet werden. Es werden also sowohl beim Szenario Neubau wie auch beim Szenario Sanierung die entstehenden Abfallmengen und deren Verwertung mitberücksichtigt.

Wenig überraschend sind die Materialbedarfe und Abfallmengen, die durch Sanierung entstehen (Tabelle 6), deutlich geringer bei einem kompletten Rückbau der Bestandsgebäude und dem anschließenden Neubau (siehe vorheriges Kapitel). Entsprechend fallen auch Umweltbelastungen, gemessen mit den drei Indikatoren KRA, KEA und Carbon Footprint, im Sanierungsszenario deutlich niedriger aus (Abbildung 12).

Die Sanierungen selbst sind also nur mit zusätzlichen Materialbedarfen im niedrigen Tonnenbereich verbunden, ebenso die durch Austausch entstehenden Abfallmengen. Bei Gebäude B wird für die modellierte Dachsanierung auch der Austausch der Dachziegel und Dachsparren unterstellt, während im größeren Gebäude C, dass allerdings kein Steil- sondern ein Flachdach aufweist, bei der Dachsanierung in erster Linie die Dachabdeckung erneuert wird. Dieses Material ist in der Kategorie „Sonstiges“ verortet. Daher ist der Materialaufwand insgesamt in Gebäude B höher, obwohl das Gebäudevolumen des Gebäudes C größer ist und dementsprechend auch mehr Dämmmaterial verbaut wird.

Tabelle 6: Materialbedarf für die Sanierung und Abfallmengen aus dem Austausch von Teilen der Gebäudehüllen A bis C in Tonnen

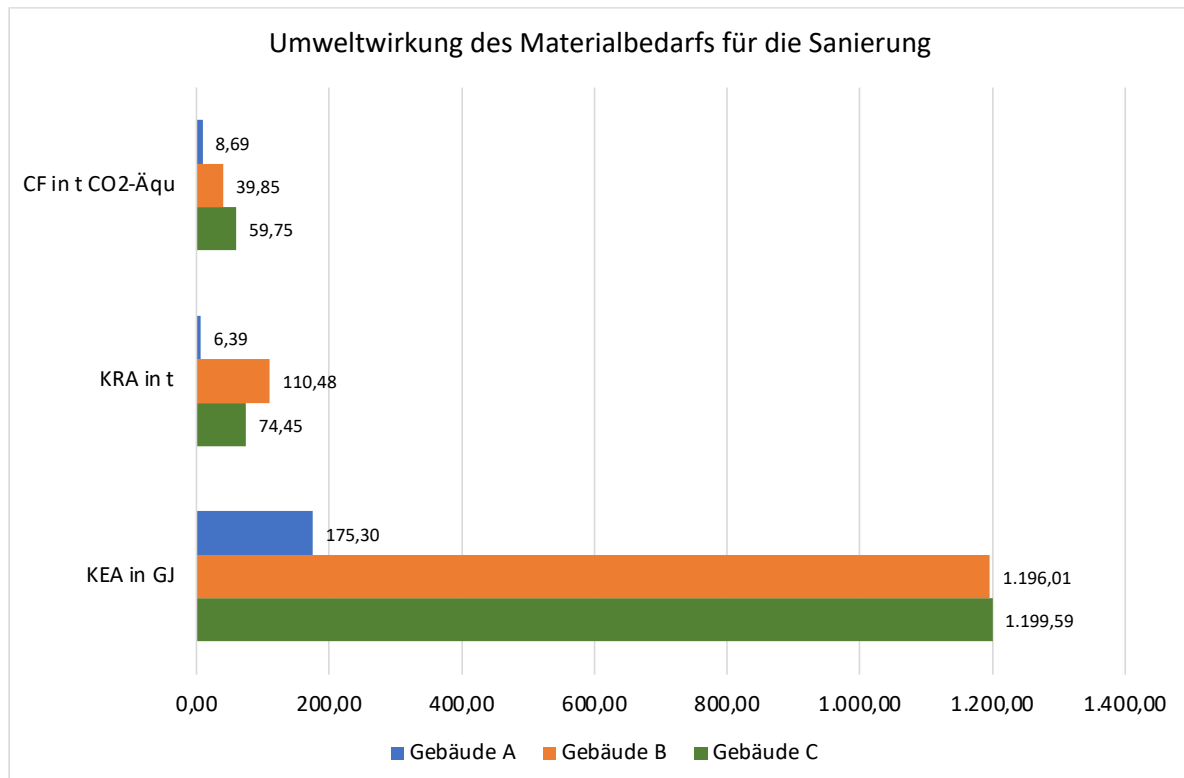
Gebäudehülle Neubau	Gebäude A		Gebäude B		Gebäude C	
	Sanierung	Abfall	Sanierung	Abfall	Sanierung	Abfall
Beton						
Mörtel/Putz						
Vollziegel			24,24	24,24		
Holz	0,60	0,60	15,44	15,44	4,27	4,27
Gipskarton						
Mineralwolle						
XPS						
EPS	1,42		3,78	0,99	6,23	0,92
Sonstige Dämmstoffe						
Stahl	0,02	0,02	0,67	0,67	1,35	1,35
Aluminium					0,22	0,22
Zink						
Glas			0,95	0,95	2,07	2,07
Kunststoff gesamt			0,66	0,66	1,28	1,28
Sonstige					4,86	4,86
Summe	2,03	0,62	45,75	42,95	20,29	14,98

Aufgrund der wenigen Materialkategorien und geringen Mengen wird in Abbildung 12 nur die Summenwerte aller in Tabelle 6 gelisteten Materialien aufgezeigt.

Der KEA in Gebäude A und C wird überwiegend durch das Dämmmaterial EPS bestimmt, während in Gebäude B der höhere Holzanteil mit seinem energetischen Aufwand für die Trocknung sich im Ergebnis des KEA niederschlägt. Für den Carbon Footprint wiederum spielt Holz nur eine untergeordnete Rolle. Hier sind vor allem

EPS als Dämmstoff sowie die Herstellungsprozesse von Glas, Aluminium und Stahl von Relevanz, die in neue Fenster und Türen verbaut sind. Daher ist der Carbon Footprint von Gebäude C auch höher als für Gebäude B, obwohl die Gesamtmenge an Materialien, die in Gebäude C im Zuge der Sanierung verbaut wurde, nicht halb so hoch war. Allerdings sind hier vor allem Materialien beinhaltet, deren Herstellung mit hohen THG-Emissionen verbunden sind.

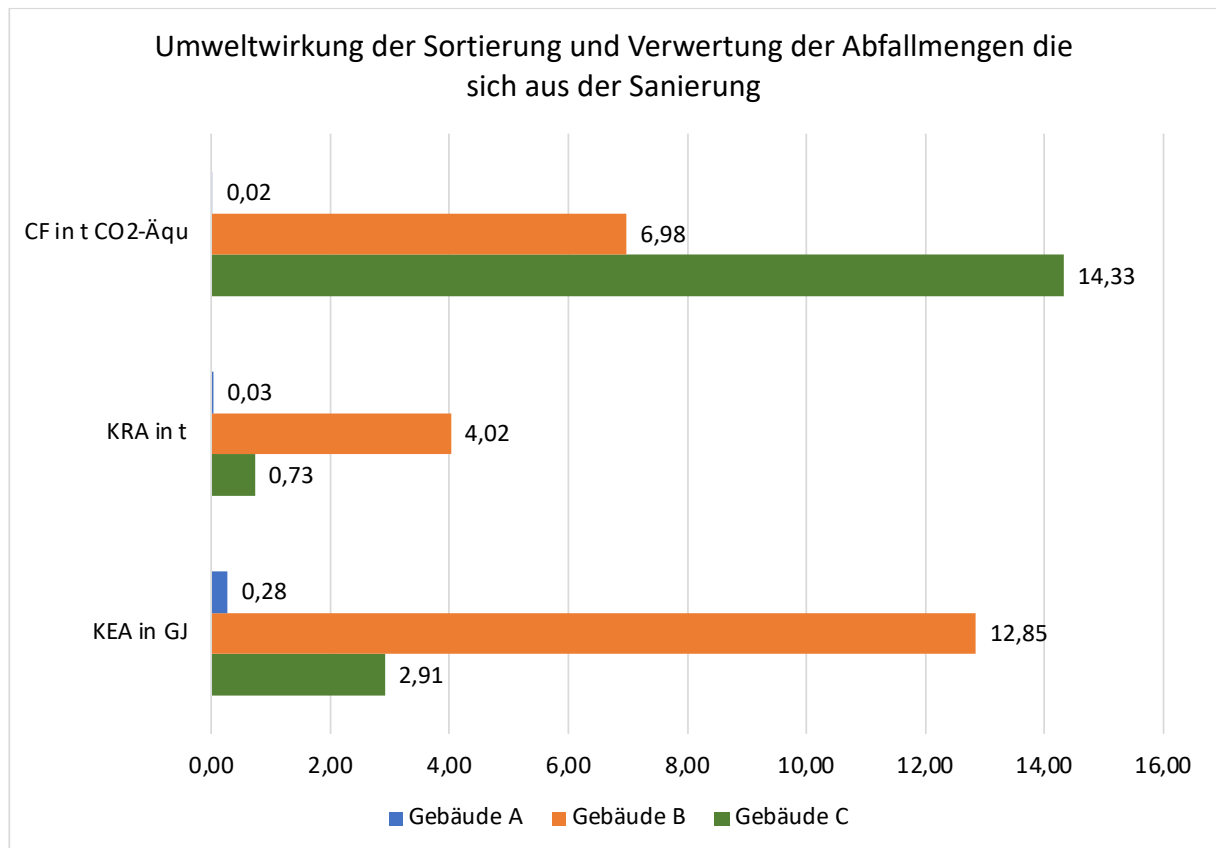
Abbildung 12: Umweltwirkung des Materialbedarfs für die Sanierung der Beispielgebäude



Durch die Sortierung und Verwertung der Abfallmengen, die sich aus der Sanierung ergeben, entstehen ebenfalls Umweltwirkungen, die in Abbildung 12 wiederum als Summe aller Abfallkategorien für die drei modellierten Gebäude dargestellt sind. Die geringen Mengen an Holz- und Stahlabfällen aus Gebäude A, die sich lediglich aus dem Austausch der Türen ableiten, verursachen innerhalb der in dieser Studie gewählten Systemgrenzen nur sehr geringe Umweltwirkungen. Im Abrissmodell wird davon ausgegangen, dass Türen und Fenster vollständig ausgebaut werden. Eine anschließende thermische Verwertung von Holztüren liegt dann jedoch außerhalb der aus ecoinvent abgeleiteten Systemgrenzen.

Der Unterschied des Carbon Footprints von Gebäude A zu Gebäude B bzw. C ist vor allem durch die Dachabdeckung begründet. Dem in Gebäude C vorliegenden Flachdach wird in der Modellierung unterstellt, dass die bitumenhaltigen Dachbahnen nach Abbruch thermisch verwertet werden, was mit einem hohen Carbon Footprint verbunden ist. In Gebäude B wird der Carbon Footprint vor allem durch die Beseitigung der dünnen Dämmschicht erklärt, die im Rahmen der Neudämmung als nicht rezyklierbarer Abfall anfällt.

Abbildung 13: Umweltwirkung der Sortierung und Verwertung der Abfallmengen die sich aus der Sanierung der Beispielgebäude ergibt



5.1 Ökonomischen Kosten für Sanierung

Um die anfallenden Sanierungskosten der jeweiligen Gebäude in die Kostenrechnung miteinbeziehen zu können, wurden die von der LEG zur Verfügung gestellten Daten zu bereits durchgeführten Modernisierungen auf ihre Sanierungskosten und -maßnahmen hin analysiert, um einen aussagekräftigen Preis pro Fläche zu erhalten.

Für Gebäude des Typs A wurden zwei Projekte in Düsseldorf in der Oberrather Straße verglichen, bei denen die Sanierungskosten pro Quadratmeter Wohnfläche bei 383 €/m² bzw. 355 €/m² lagen. Da sich die Projekte in den vorgenommenen Sanierungsmaßnahmen und den Kosten stark ähneln, wird hier ein Mittelwert von 369 €/m² für weitere Berechnungen angenommen. Bezogen auf die Gesamtwohnfläche von 380 m² ergeben sich somit für Gebäudetyp A Sanierungskosten in Höhe von 140.220 €.

Analysiert man die beiden vorliegenden Projekte in Essen und Bielefeld, die dem Typ B zugeordnet werden können liegen folgende Daten vor: in Essen beliefen sich die Sanierungskosten auf 330 €/m², wobei hier das Dach umfassend saniert und gedämmt wurde, während in Bielefeld das Dach nicht saniert wurde, dafür aber ein Austausch der Fenster stattfand. Die Kosten für die Sanierung in Bielefeld beliefen sich auf 348 €/m². Da für das modellierte Beispielgebäude B sowohl eine Sanierung und Dämmung des Dachs als auch der Austausch der Fenster im Rahmen der energetischen Sanierung vorgesehen sind, wird für die weitergehende Berechnung wie folgt vorgegangen: dem Projekt in Bielefeld werden die Gesamtkosten für die

Erneuerung der Fenster in Höhe von 37.246 € entnommen. Diese Gesamtkosten, bezogen auf die Wohnfläche des Bielefelder Projekt, ergeben Kosten von 70,90 €/m². Um die Kosten für Dachsanierung und Fenstersanierung zu kombinieren, werden diese Kosten für die Fenstererneuerung pro Fläche auf die Fläche des Projektes in Essen bezogen, wodurch sich die Sanierungskosten in Summe zu 330 €/m² + 71 €/m² = 401 €/m² Wohnfläche ergeben. In diesem Wert sind somit gleichsam die Kosten für die Dachsanierung, als auch der Aufwand für die Erneuerung der Fenster enthalten. Für das Beispielgebäude Typ B mit einer Wohnfläche von 852 m² betragen die Sanierungskosten somit insgesamt 341.652 €.

Bei Gebäuden des Clusters C wurden zwei Sanierungsprojekte der LEG in Dortmund und Castrop-Rauxel analysiert. Beim Vergleich der Sanierungskosten pro Fläche wurde hier eine große Diskrepanz von 842 €/m² in Castrop-Rauxel und 442 €/m² in Dortmund festgestellt. Um hier einen aussagekräftigen Wert für die weitere Berechnung zu erhalten, wurden die Sanierungsmaßnahmen der beiden Projekte verglichen. Dabei fiel auf, dass in Castrop-Rauxel in den Kostenbereichen der Fassadenarbeiten, Wärmeversorgungsanlagen/Heizung, Elektro und Außenanlagen teils zusätzliche Positionen und teils höhere prozentuale Anteile aufgeführt wurden. Besonders hervorzuheben sind dabei:

- Die Bergschäden in der Fassade in Castrop-Rauxel, die durch Rissverpressung behoben wurden, was mit Mehrkosten von geschätzten 9.000 € verbunden war.
- Die Nachisolierung von wasserführenden Leitungen im Keller mit Mehrkosten von rund 2.500€.
- Eine umfassendere Erneuerung und Modernisierung der Elektronik wie z.B. den Einbau von Sprechanlagen, was mit prozentualen und tatsächlichen Mehrkosten von 9.500 € im Vergleich zu 7.200 € in Dortmund einherging sowie
- Prozentuale Mehrkosten für das Anlegen der Außenanlage.

Durch diese und weitere Positionen lässt sich der große Unterschied zwischen den Sanierungskosten pro Fläche an den beiden Standorten erklären. Für die weiterführenden Berechnungen wurde auf dieser Grundlage ein Mittelwert der Sanierungsbeispiele gebildet, der sich damit auf 642 €/m² beläuft. Diese Annahme erscheint sinnvoll, da sie neben den anfallenden Grundkosten auch einen Teil von unvorhergesehenen Mehrkosten mitabbilden kann. Mit einer vorliegenden Gesamt-Wohnfläche von 2.405 m² bei Gebäudetyp C ergeben sich die Gesamtkosten für die energetische Sanierung also zu 1.544.010 €.

Tabelle 7: Übersicht anfallende Sanierungskosten

Beispielgebäude Typ	Sanierungskosten [€/m ²]	Wohnfläche [m ²]	Gesamtkosten der Sanierung [€]
A	369	380	140.220
B	401	852	341.652
C	642	2.405	1.544.010

6 Vergleich und ökologische Bewertung von Sanierung versus Rück- und Neubau unter Berücksichtigung der Nutzungsphase

Aus den vorherigen beiden Kapiteln wird deutlich, dass die Sanierung hinsichtlich der Rohstoffmengen, der damit verbundenen Umweltwirkungen als auch hinsichtlich der damit verbundenen Kosten deutlich besser abschneidet als der Abriss der Bestandsgebäude und anschließendem Neubau.

Aber wie sieht es um die energetische Qualität der beiden möglichen Arten von Gebäude aus; dem sanierten Gebäude und dem Neubau? Dazu soll in diesem Kapitel eine Nutzungsphase über 50 Jahre (bis zum Jahr 2070) simuliert und analysiert werden. Damit soll die Frage beantwortet werden, ob die Neubauten, die am Start der unterstellten Nutzungsphase mit einem deutlich höheren ökologischen Fußabdruck beginnen, bei den Indikatoren KEA und CO₂-Emissionen im Verlauf dieser 50 Jahren aufgrund der ggf. besseren energetischen Qualität ihrer Gebäudehülle bzw. der ökologischeren Technologie zur Bereitstellung von Wärme und Warmwasser ihren Startnachteil aufholen und die sanierten Gebäude ggf. sogar überholen können.

Dazu ist einschränkend folgendes zu beachten:

- In diesem Projekt wurde keine energetische Berechnung/Modellierung anhand der U-Werten von Bauteilen o.ä. durchgeführt.
- Vielmehr wurden der Primär- und Endenergiebedarf von konkreten Neubau- und Sanierungsprojekten der LEG verwendet.
- Es war nicht Ziel der Analysen unterschiedlichen Technologien der Bereitstellung von Wärme und Warmwasser miteinander zu vergleichen.
- Allerdings wurden zwei Szenarien der Nutzungsphase gerechnet: einmal die Fortschreibung des derzeitigen Status Quo bis 2070. Das heißt für Gebäude, die derzeit ihren Wärme- und Warmwasserbedarf mit Erdgas oder Fernwärme abdecken, dass sie dies in Szenario 1 auch noch im Jahr 2070 tun werden.
- Lediglich beim Strombedarf wurde der abiotische Primärenergiefaktor ab 2035 deutlich auf 0,4 gesenkt (derzeit 1,8) und ab 2050 auf nahezu null gesetzt, um so den immer höheren Anteil an erneuerbaren Energien im deutschen Strom-Mix und ab spätestens 2050 100% erneuerbaren Strom abzubilden.
- Im zweiten Szenario wird hingegen unterstellt, dass der Wärme- und Warmwasserbedarf nur noch bis zum Jahr 2036 mit Erdgas betrieben wird und die Gebäude anschließend auf Luft-Wasser-Wärmepumpen umgestellt werden. Die damit verbundenen Materialbedarfe und Abfallmengen für Ein- und Ausbau wurden berücksichtigt und die neuen Emissions- und Primärenergiefaktoren anschließend angepasst.
- Gebäude mit Fernwärme werden in den Szenarien 1 und 2 weiterhin mit Fernwärme versorgt. Diese wird jedoch „grüner“, sei es in Form von Fernwärme auf Basis von Biomasse oder Nutzung von Abwasserwärme o.ä.
- Weitere technischen Effizienzgewinne in der Zukunft oder Anpassungen der Heiz- und Warmwassertechnologie werden nicht untersucht.

- Auch weitere mögliche zukünftige Regularien wie z.B. verpflichtenden Photovoltaik oder Solarthermie auch auf Dächern von Bestandsgebäuden wurden nicht auf ihre Auswirkungen hinsichtlich der Ergebnisse untersucht.
- Weiterhin gilt die Annahme, dass alle Bauteile, auch im sanierten Gebäude, noch eine Restlebensdauer von 50 Jahren haben und innerhalb des Betrachtungszeitraums nicht ausgetauscht werden müssen.⁴ Diese ist eine sehr vereinfachende Annahme, die nicht sehr realistisch ist. Vor allem für Gebäude A, bei der keine aktuelle Dachsanierung modelliert wurde.

6.1 Modellannahmen für die Extrapolation der Nutzungsphase

Die Annahmen, die diesen Berechnungen zugrunde liegen, sind, dass die im Projekt modellierten Beispielhäuser in ihrer energetischen Qualität in etwa den Gebäuden entsprechen, für die konkrete Angaben aus verschiedenen Sanierungsprojekten der LEG vorliegen und die sowohl vor als auch nach der Sanierung ähnliche Werte aufweisen und somit auf die Beispielhäuser übertragbar sind. Ebenso, dass die energetische Qualität unserer modellierten Neubauten die Werte widerspiegeln, die einem konkreten Neubauprojekt der LEG entnommen wurden. Hierzu wurden die Materialbestandteile und Dicken der von uns modellierten Bauteilen mit den Bauteillisten des LEG-Neubauprojektes abgeglichen und die Heiztechnik im modellierten Neubau daher extra noch einmal mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe angepasst.

Trotzdem ist einschränkend deutlich zu machen, dass der Endenergiebedarf eines Gebäudes stark vom Grundriss, der geographischen Ausrichtung, Anzahl und Position der Fenster und ähnlichem abhängt. Diese verschiedenen Faktoren können in modellierten Gebäudetypen, die als Repräsentanten des Gebäudebestandes einer ganzen Dekade dienen, nicht berücksichtigt werden, weshalb an dieser Stelle die energetische Qualität des Gebäudes in Form des konkreten Endenergiebedarfes immer nur Näherungen darstellen kann, wenn diese lokalen Faktoren nicht konkret für das modellierte Gebäude definiert sind.

Bei den Sanierungsprojekten der LEG ist auffällig, dass diese nach der Sanierung hinsichtlich ihres Endenergiebedarfes keine sehr breite Spannbreite aufwiesen und zumeist im Bereich von 90 – 110 kWh/m²a liegen. Allerdings ist auch ersichtlich, bei welchen Gebäuden eine Dachsanierung vorgenommen wurde (und dadurch eher bei 90 kWh/m²a liegen) und bei welchen nicht.

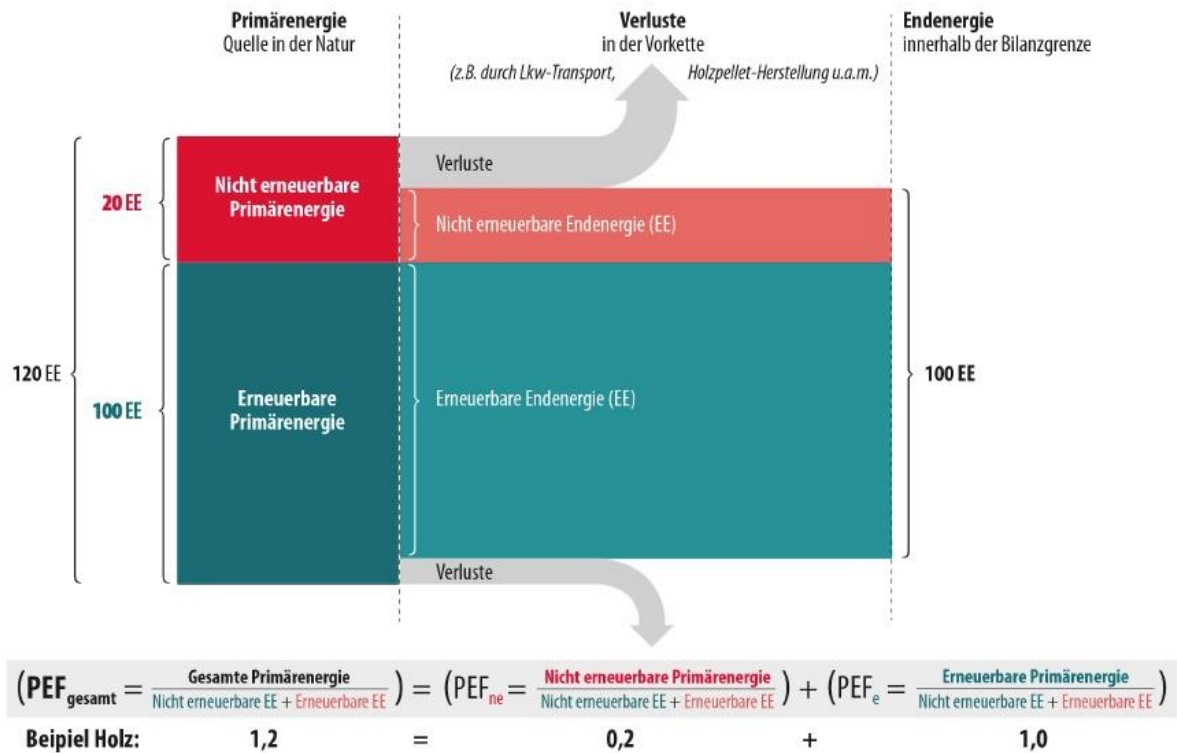
Der große Unterschied besteht jedoch hinsichtlich des Primärenergiebedarfes. Dieser wird auf Grundlage des Endenergiebedarfes berechnet, indem der Endenergiebedarf mit dem Primärenergiefaktor (oder anteilig mit verschiedenen Faktoren bei verschiedenen Energieträgern) multipliziert wird. Der Primärenergiefaktor ist als Quotient aus Primärenergie und Endenergie ein Indikator für die Verluste, die bei der Gewinnung bzw. Erzeugung, Verteilung und Speicherung bis hin zur Bereitstellung eines Energieträgers anfallen. Der Primärenergiefaktor wird unterschieden in seinen nichterneuerbaren und erneuerbaren Anteil. Bildet man den Primärenergiebedarf

⁴ Mit Ausnahme der Umstellung von Erdgas auf Luft-Wasser-Wärmepumpe im Jahr 2035.

eines Gebäudes aus dem Endenergiebedarf, muss jeder verwendete Energieträger mit dem entsprechenden nichterneuerbaren Primärenergiefaktor multipliziert werden. Bei einer Pelletheizung würde der Endenergiebedarf, der durch die Pelletheizung gedeckt wird, mit dem nicht-erneuerbaren Anteil des Primärenergie-Faktors in Höhe von 0,2 multipliziert (siehe Tabelle 8). Bei Luft-Wasser-Wärmepumpen wird der Stromverbrauch mit dem Primärenergiefaktor von Strom multipliziert (aktuell 1,8). Für Fernwärme besteht allerdings das Problem, dass für die primärenergetische Bewertung die Methode der Stromgutschriften verwendet werden darf und wird. Diese Allokationsmethode führt im Vergleich zu anderen Allokationsmethoden häufig zu sehr guten Ergebnissen hinsichtlich der fossilen Primärenergie des Wärmeanteils und kann u.U. sogar negativ sein.

Ein niedriger Primärenergiefaktor für Fernwärme bedeutet aber nicht unbedingt, dass damit auch niedrige Treibhausgasemissionen verbunden sind. Daher sind die konkreten CO₂-Emissionen der Fernwärme sehr stark von der konkreten Höhe der Stromgutschrift und des spezifischen Brennstoffeinsatzes abhängig und müssen anlagenspezifisch betrachtet werden. In dieser Studie wird daher mit einem durchschnittlichen Emissionsfaktor für Fernwärme von 243 g/kWh gerechnet, der sich im Laufe der Fortschreibung bis 2050 verringert. Und zwar auf 105 g/kWh im Jahr 2035 und 30 g/kWh im Jahr 2050. Diese abnehmenden Faktoren bis zum Jahr 2050 spiegeln eine zu erwartende weitreichende Abkehr von fossilen Energieträgern bei der Erzeugung von Fernwärme wider. Wichtiger werden stattdessen alternative Wärmequellen wie gewerbliche Abwärme, Solarthermie, Abwasserwärme, Flusswasserwärme, oberflächennahe und tiefe Geothermie sowie in geringerem Umfang auch die Nutzung von Biomasse zur Wärmeerzeugung.

Abbildung 14: Schematische Definition des Primärenergiefaktors PEF am Beispiel des Energieträgers Holz⁵



Die beiden Energiekennzahlen haben unterschiedlichen Aussagen: während der Endenergiebedarf etwas über die Energieeffizienz der Heiztechnik und der Gebäudehülle aussagt, ist der Primärenergiebedarf vor allem hinsichtlich der CO₂-Effizienz eines Gebäudes wichtig. Daher wird auch nur der nicht-erneuerbare Anteil des Primärenergiefaktors in der Berechnung verwendet. Zudem ist die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Heizsysteme mit unterschiedlichen Energieträgern nur dann gegeben, wenn jeweils für jeden Energieträger die Energieverluste aus den Verbrennungsprozessen berücksichtigt werden, was in einem Vergleich z.B. von Strom (bzw. dem Anteil aus thermischen Verfahren) und Erdgas auf der Ebenen der Endenergieverbrauchs nicht möglich wäre.

Die Unterschiede zwischen Primärenergie- und Endenergiebedarf führen dazu, dass zwei Gebäude hinsichtlich ihres Endenergiebedarfes sehr ähnliche Werte haben können; die Gebäudehülle also eine ähnliche Qualität aufweist (und dadurch auch in der gleichen Energieeffizienzklasse von Gebäuden eingeordnet werden), aber bei unterschiedlichen Energieträgern in ihrem Primärenergiebedarf sehr unterschiedlich sein kann. Genau dies ist in den untersuchten Sanierungsprojektes der LEG zu beobachten: Gebäude, die ihren Wärme- und Warmwasserbedarf überwiegend mit Fernwärme decken können, haben dank der Stromgutschriften niedrigere Primärenergiebedarfe. Bei Gebäude, deren Energieträger für den Wärme- und Warmwasserbedarf Erdgas oder eine Mischung aus Erdgas und Strom sind, haben hingegen steigende

⁵ Quelle: Wuppertal Institut (2015): Konsistenz und Aussagefähigkeit der Primärenergie-Faktoren für Endenergieträger im Rahmen der EnEV. Diskussionspapier unter Mitarbeit von Dietmar Schüwer, Thomas Hanke und Hans-Jochen Luhmann. Wuppertal, Dezember 2015.

Primärenergiebedarf im Vergleich zum Endenergiebedarf, da hier ein Primärenergiefaktor von >1 zum Einsatz kommt (Tabelle 8).

Tabelle 8: Tabellierte Primärenergiefaktoren aus DIN V 18599-1 (Quelle: Wuppertal Institut 2015)

Energieträger ^{a)}		Primärenergiefaktoren PEF	
		gesamt	nicht erneuerbar
Fossile Brennstoffe	Heizöl EL	1,1	1,1
	Erdgas H	1,1	1,1
	Flüssiggas	1,1	1,1
	Steinkohle	1,1	1,1
	Braunkohle	1,2	1,2
Biogene Brennstoffe	Biogas	1,5	0,5
	Bioöl	1,5	0,5
	Holz	1,2	0,2
Nah-/Fernwärme aus KWK ^{b)}	fossiler Brennstoff	0,7	0,7
	erneuerbarer Brennstoff	0,7	0
Nah-/Fernwärme aus Heizwerken	fossiler Brennstoff	1,3	1,3
	erneuerbarer Brennstoff	1,3	0,1
Strom	allgemeiner Strommix	2,8	2,4 (ab 2016: 1,8) ^{c)}
	Verdrängungsstrommix	2,8	2,8
Umweltenergie	Solarenergie	1	0
	Erdwärme, Geothermie	1	0
	Umgebungswärme	1	0
	Umgebungskälte	1	0
Abwärme innerhalb des Gebäudes	aus Prozessen ^{d)}	1	0

a) Bezugsgröße Endenergie: Heizwert H_i
b) Angaben sind typisch für durchschnittliche Nah-/Fernwärme mit einem Anteil der KWK von 70 %.
c) Klammerwert für 2016 ist nicht Bestandteil der DIN V 18599, sondern abweichend davon in der EnEV 2014 definiert.
d) definiert in DIN V 18599 Abschnitt 3.1.32 (S. 15)

Unterschiede der beiden Szenarien

In beiden Szenarien wurden für Gebäude B und C jeweils zwei verschiedenen Varianten der Wärme- und Warmwasserbereitstellung gerechnet. Einmal wurde unterstellt, dass diese komplett über Fernwärme erfolgt (Gebäude C) oder über eine Kombination aus Fernwärme und geringem Anteil Strom (Gebäude B). In der zweiten

Variante wird angenommen, dass die Bereitstellung von Wärme und Warmwasser über Erdgas erfolgt (mit einem Mix aus überwiegend Erdgas und geringem Anteil Strom). Dies spiegelt somit auch zwei der wichtigsten Energieträger für den Wärmebedarf im Gebäudebestand der LEG wider (Fernwärme und Erdgas).

In **Szenario 1** bleibt dieser Brennstoffmix bis zum Jahr 2070 erhalten. Allerdings mit abnehmenden Emissionsfaktoren für Fernwärme und Strom (hier auch abnehmenden Primärenergiefaktoren). Diese betrifft somit vor allem die Extrapolation von Berechnungen der Neubauten und der sanierten Gebäude, für die eine Bereitstellung von Wärme und Warmwasser über Fernwärme erfolgt. In der Variante „Erdgas“ ist die Entwicklung hingegen linear, da sowohl der Primärenergie- wie auch Emissionsfaktor für Erdgas unverändert bleibt. Im **Szenario 2** wird hingegen unterstellt, dass für die Variante „Erdgas“ zur Bereitstellung des Heiz- und Warmwasserbedarfes **ab 2036** ein Umstieg auf Luft-Wasser-Wärmepumpen erfolgt. Dazu wurde der neue Endenergiebedarf ab 2036 bei Nutzung einer Wärmepumpe anhand des Nutzenergiebedarfes und einer Jahresarbeitszahl (JAZ) von 2,6 bei Bestandsgebäuden abgeschätzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Nutzenergiebedarf bei Gebäuden mit weniger als 8 Wohneinheiten (also Gebäude A) ca. 55 W/m² beträgt und bei Gebäuden mit 8 und mehr Wohneinheiten ca. 50 W/m². Weiterhin wird unterstellt, dass die alten Heizkörper weiterhin auch mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe verwendet werden können und keine weiteren Anpassungen wie z.B. durch Einbau von Fußbodenheizungen mit niedrigerer Vorlauftemperatur notwendig sind.

Für die Bestimmung des Endenergiebedarfes wurden konkreten Sanierungsprojekte genutzt, die teilweise aus mehreren Gebäuden bestanden, die allerdings gemeinsam saniert wurden und dementsprechend in Summe in den Daten der LEG geführt wurden. Die einzelnen Gebäude eines gemeinsamen Sanierungsprojektes haben zum Teil leicht abweichende End- und Primärenergiewerte, weshalb hier jeweils der Mittelwert gebildet wurde.

Die beiden Sanierungsprojekte, die als Muster für Gebäude B verwendet wurden (Essen und Bielefeld), unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich der eingesetzten Energieträger, sondern auch hinsichtlich des Sanierungsaufwandes und der daraus abzuleitenden energetischen Qualität. Da im Sanierungsszenario für Gebäude B eher eine umfangreiche Sanierung unterstellt wurde, die eher dem Sanierungsprojektes in Essen entspricht, wurden für Gebäude B der Endenergiebedarf des Sanierungsprojektes in Essen verwendet und der Primärenergiebedarf bei einem Energieträgereinsatz aus Erdgas und Strom über die Primärenergiefaktoren angepasst.

Tabelle 9: Ausgewertet Sanierungs- und Neubauprojekte und deren End- bzw. Primärenergiebedarf in kWh/m² Nutzfläche und Jahr für den Start der Extrapolation im Jahr 2020

Objekt	Sanierungsumfang	Endenergiebedarf (Mittelwert)	Primärenergiebedarf (Mittelwert)	Energieträger
Sanierung				
Düsseldorf (Bsp. für Gebäude A)	Dämmung Fassade und Keller, Austausch Türen	117,65	133,15	Erdgas
Essen (Bsp. für Gebäude B)	Dämmung Fassade und Keller, Dachsanierung und Dämmung	91,90	58,03	Fernwärme, Strom
Bielefeld (Bsp. für Gebäude B)	Dämmung Fassaden, Austausch Fenster	118,00	132,00	Erdgas, Strom
Dortmund (Bsp. für Gebäude C)	Dämmung Fassade und Keller, Dachsanierung und Dämmung, Fensteraustausch	99,50	13,00	Fernwärme
Castrop-Rauxel (Bsp. für Gebäude C)	Dämmung Fassade und Keller, Dachsanierung und Dämmung, Fensteraustausch	101,77	123,73	Erdgas, Strom
Neubau				
Gebäude A		24,54	44,16	Luft-Wasser-Wärmepumpe
Gebäude B - C		22,30	40,14	Luft-Wasser-Wärmepumpe

Aus den Energieausweisen der sanierten Gebäude wird nicht ersichtlich wie hoch der jeweilige Anteil von Fernwärme und Strom bzw. Erdgas und Strom am jeweiligen Endenergieverbrauch ist. Allerdings kann über den Unterschied zwischen End- und Primärenergiebedarf und den Primärenergiefaktoren der einzelnen Energieträger das Verhältnis von Strom zu Fernwärme bzw. Erdgas abgeleitet werden. Und damit kann der Stromanteil mit jeweils unterschiedlichen Primärenergiefaktoren in der Zukunft (0,4 ab 2036, 0,1 ab 2051) angepasst werden. Die Primärenergiefaktoren für fossile Brennstoffe und Strom sind über Pauschalwerte in der DIN-Norm DIN V 18599-1 festgelegt. Bei Fernwärme darf nur dann mit pauschalisierten Werten gearbeitet werden, wenn es sich um Fernwärmenetze handelt, die entweder einen Anteil von Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen von über 70 % aufweisen oder bei Fernwärme aus Heizwerken, die ausschließlich mit erneuerbaren oder fossilen Brennstoffen betrieben werden. Im Fall des Dortmunder Sanierungsprojektes ist dies offensichtlich der Fall (oder die Stromgutschriften sind außergewöhnlich hoch). Hier scheint es sich um ein Fernwärmenetz zu handeln, dass an ein Heizwerk mit erneuerbaren Brennstoffen angeschlossen ist, weshalb ein Primärenergiefaktor von 0,1 angesetzt werden kann. Der geringe Aufschlag wird vermutlich auf geringe Mengen an Betriebsstrom zurückzuführen sein.

Aus diesen Überlegungen heraus wurden die Extrapolationen mit folgenden Primär- und Endenergiewerten gerechnet:

Tabelle 10: Verwendete Energiebedarfswerte in kWh/m²a für die Extrapolation des Status Quo bis 2070 (Szenario 1)

Objekt	Endenergiebedarf	Primärenergiebedarf Bis 2035	Primärenergiebedarf 2036 - 2050	Primärenergiebedarf ab 2051
Sanierung				
Gebäude A (Erdgas)	117,65	133,15	133,15	133,15
Gebäude B (Fernwärme/Strom)	91,90	57,79	36,00	31,33
Gebäude B (Erdgas/Strom)	91,90	102,81	99,37	98,64
Gebäude C (Fernwärme)	99,50	13,00	13,00	13,00
Gebäude C (Erdgas/Strom)	101,77	123,36	100,53	95,64
Neubau				
Gebäude A	24,54	44,16	9,82	2,54
Gebäude B - C	22,30	40,14	8,92	2,23

Tabelle 11: Verwendete Energiebedarfswerte kWh/m²a für die Extrapolation des Status Quo bis 2070 (Szenario 2)

Objekt	Endenergiebedarf (bis 2035)	Primärenergiebedarf Bis 2035	Endenergiebedarf (ab 2036)	Primärenergiebedarf 2036 - 2050	Primärenergiebedarf ab 2051
Sanierung					
Gebäude A (Erdgas, Umstieg WP 2036)	117,65	133,15	36,36	14,54	3,64
Gebäude B (Fernwärme/Strom)	91,90	57,79	91,90	36,00	31,33
Gebäude B (Erdgas/Strom, Umstieg WP 2036)	91,90	102,81	33,36	13,22	3,31
Gebäude C (Fernwärme)	99,50	13,00	99,50	13,00	13,00
Gebäude C (Erdgas/Strom, Umstieg WP 2036)	101,77	123,36	33,36	13,22	3,31
Neubau					
Gebäude A	24,54	44,16	24,54	9,82	2,54
Gebäude B - C	22,30	40,14	22,30	8,92	2,23

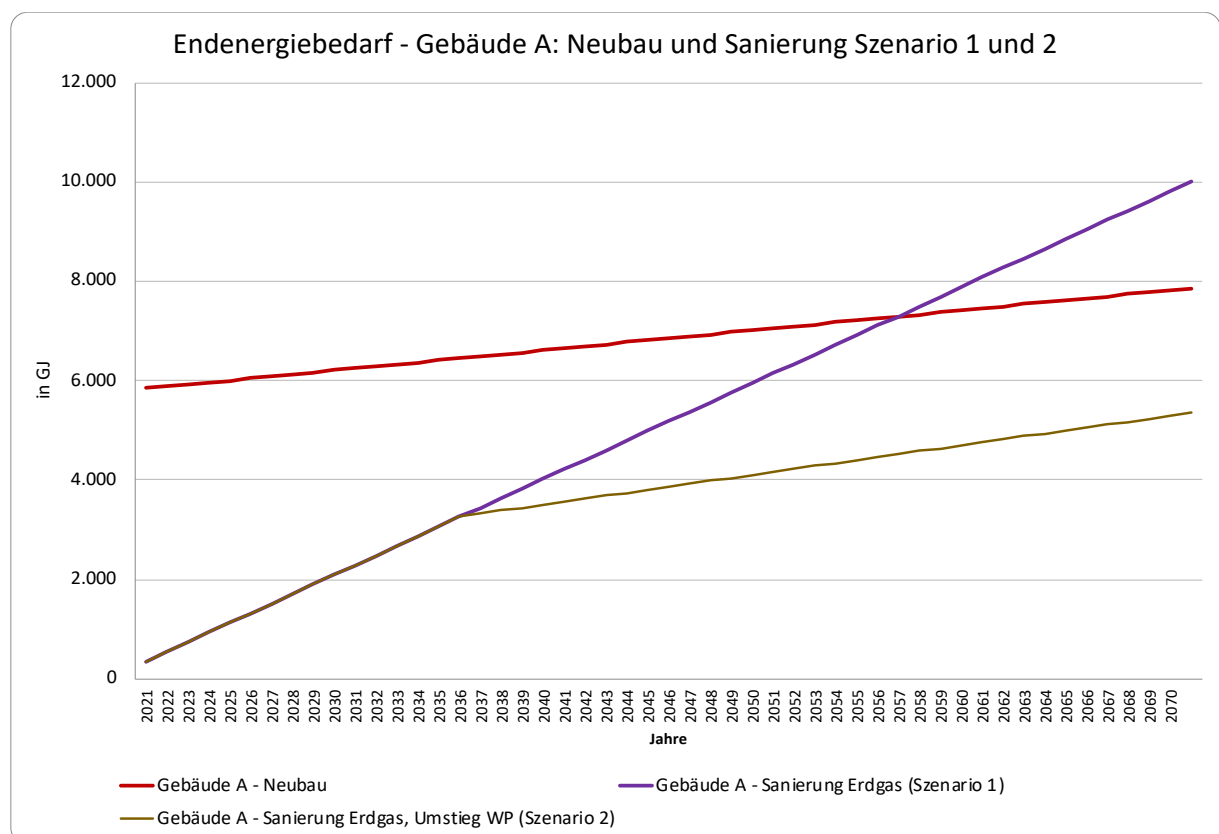
Wie man den Tabellen 10 und 11 entnehmen kann, ist der End- und Primärenergiewert des Neubaus deutlich niedriger als die der sanierten Gebäude B und C. Dies liegt u.a. daran, dass im Neubau direkt eine Luft-Wasser-Wärmepumpe als Wärmequelle vorgesehen ist, die durch ihre hohe Effizienz (angenommen JAZ=3,9) einen

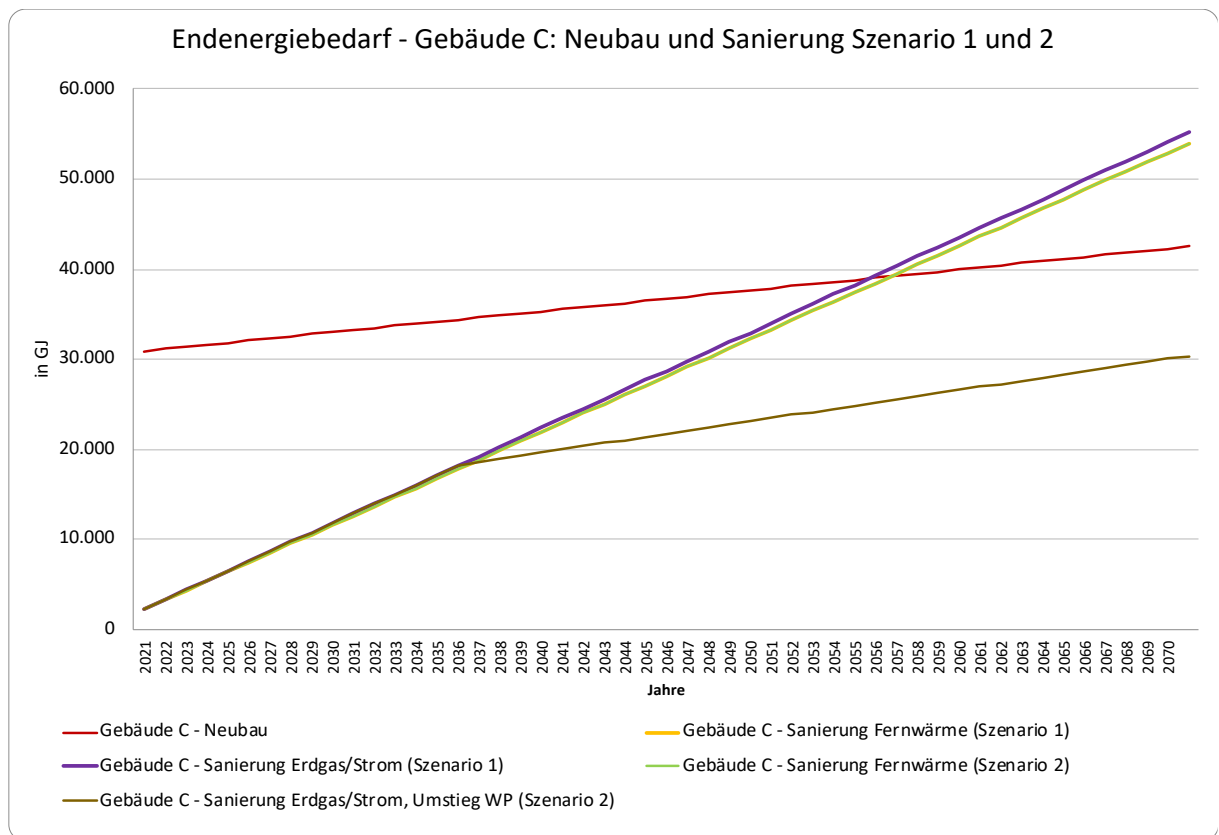
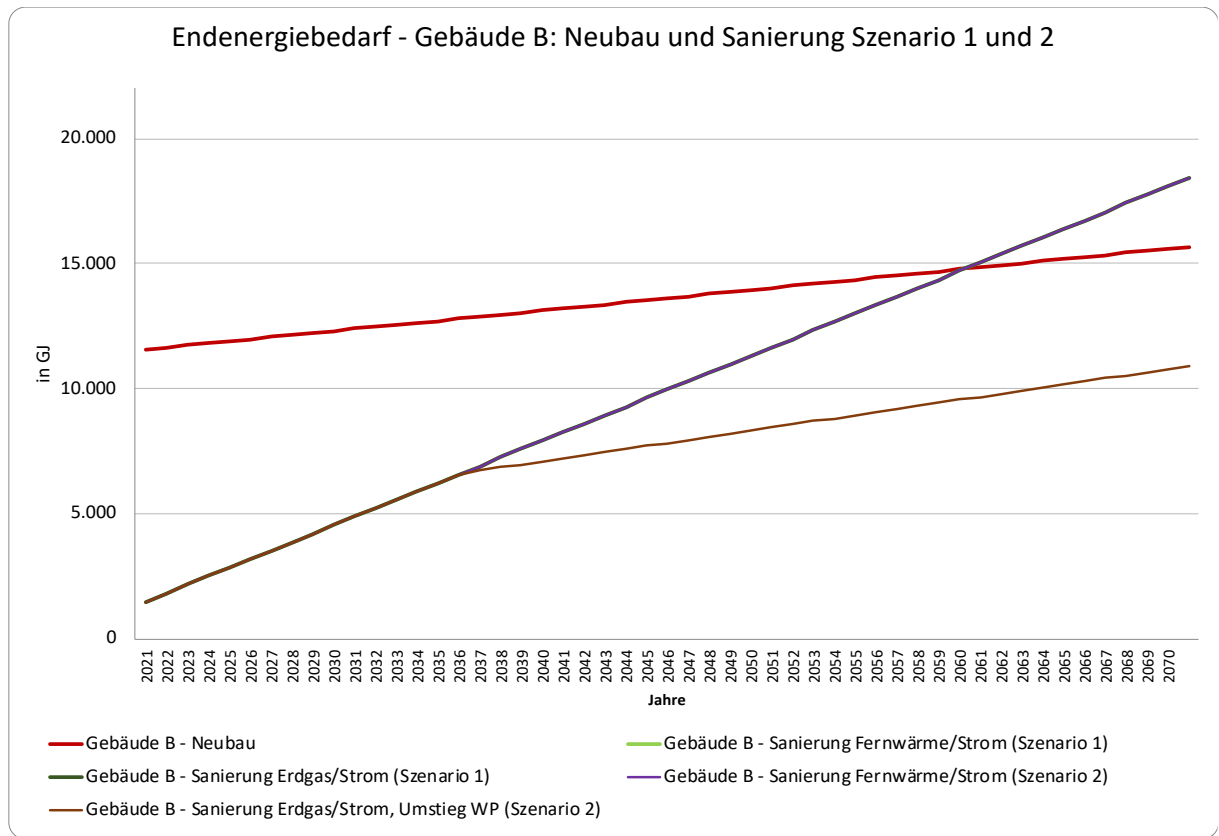
niedrigen Endenergiebedarf verursacht und zukünftig von sinkenden Primärenergiefaktoren für Strom profitiert und somit auch hinsichtlich der Primärenergiebedarfs sehr niedrige Werte erreicht. In Tabelle 11 wird deutlich, dass sich bei einem antizipierten Umstieg auf Wärmepumpe und der gleichzeitig stattfindenden Abkehr von fossilen Brennstoffen sowohl bei der Fernwärme- wie der Stromerzeugung die Primärenergiebedarfe pro m² Fläche und Jahr für die sanierten Gebäude angleichen, aber immer noch Unterschiede zwischen Neubau und sanierten Gebäude hinsichtlich der Energieeffizienz der Nutzungsphase bestehen.

Vergleich des Energieverbrauchs bis 2070

Zunächst soll dargestellt werden, wie sich der Primär- und Endenergiebedarf der beiden Alternativen „Abriss/Neubau“ und „Sanierung“ unter Einbeziehung der Nutzungsphase bis zum Jahr 2070 entwickelt. Und zwar für verschiedene Technologie der Wärme- und Warmwasserbereitstellung und zwei verschiedenen Szenarien.

Abbildung 15 a-c: Extrapolation Endenergieverbrauch unter Einbeziehung der Nutzungsphase für Gebäude A - C



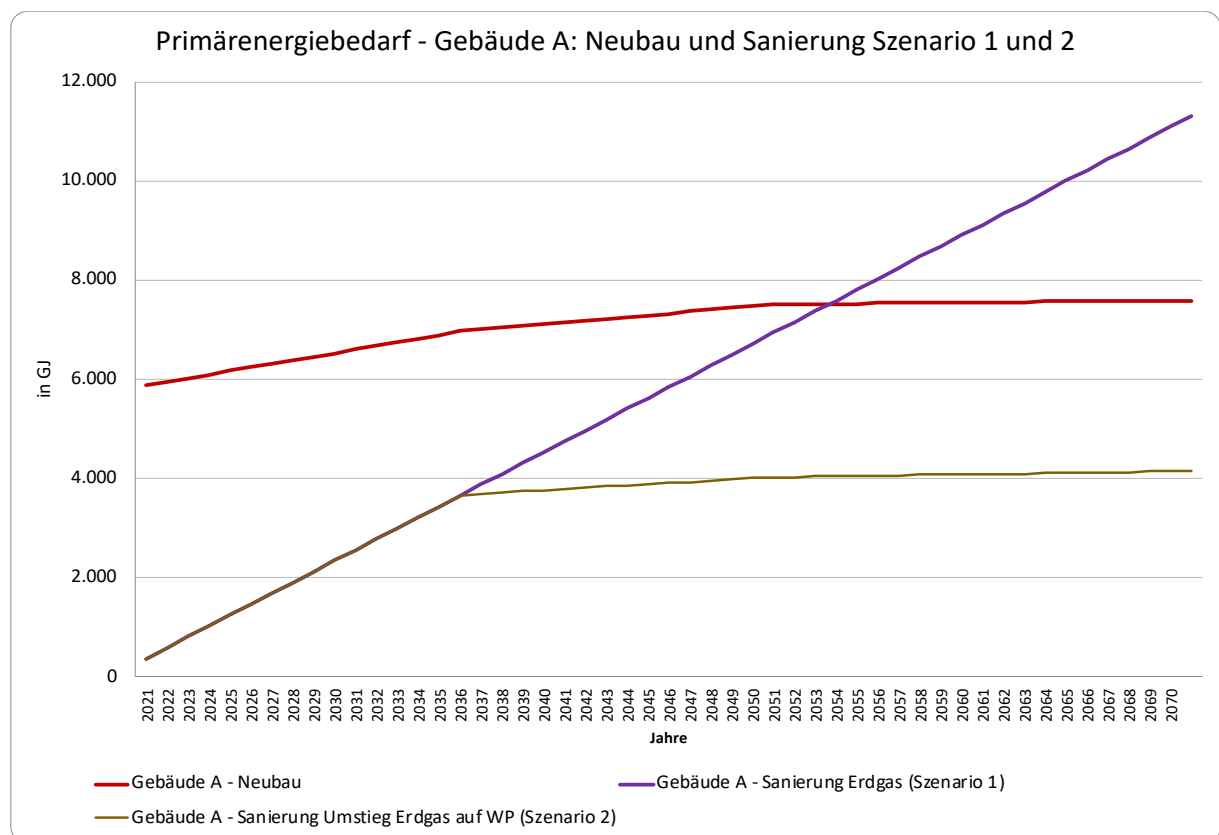


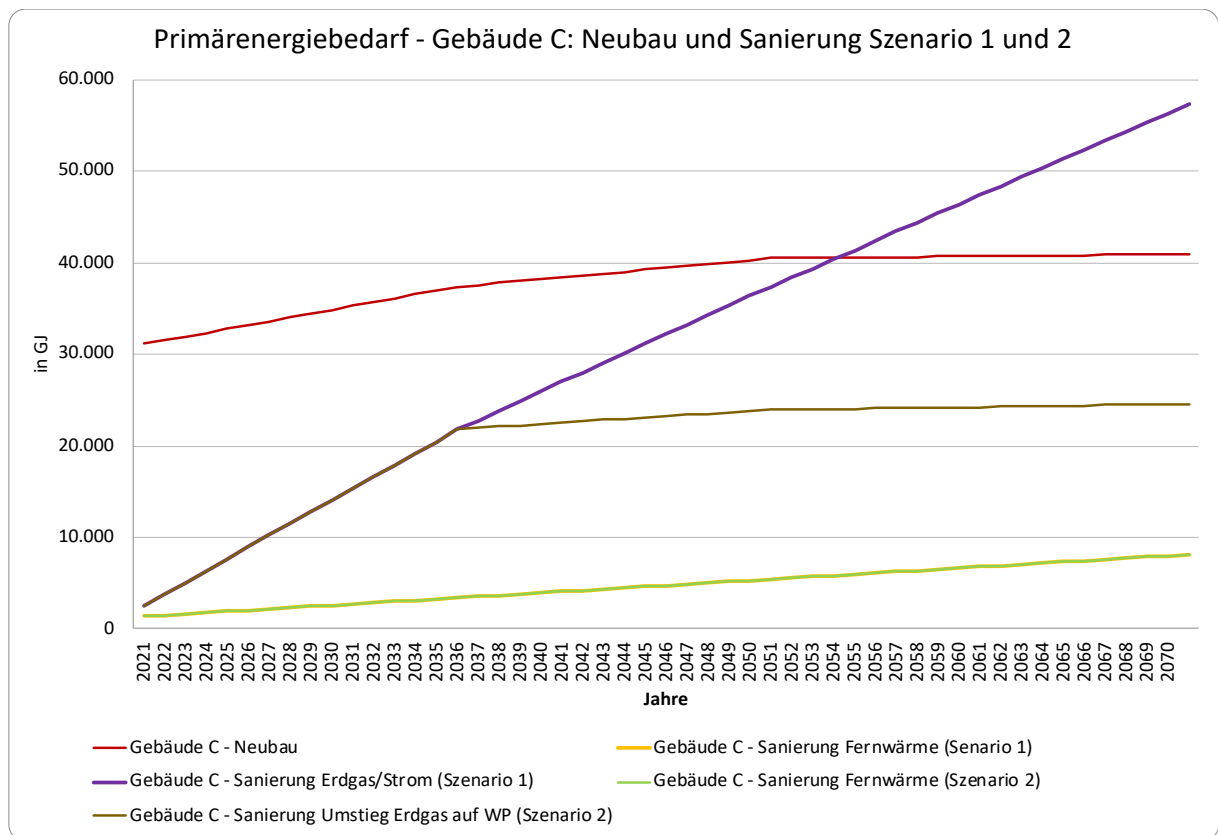
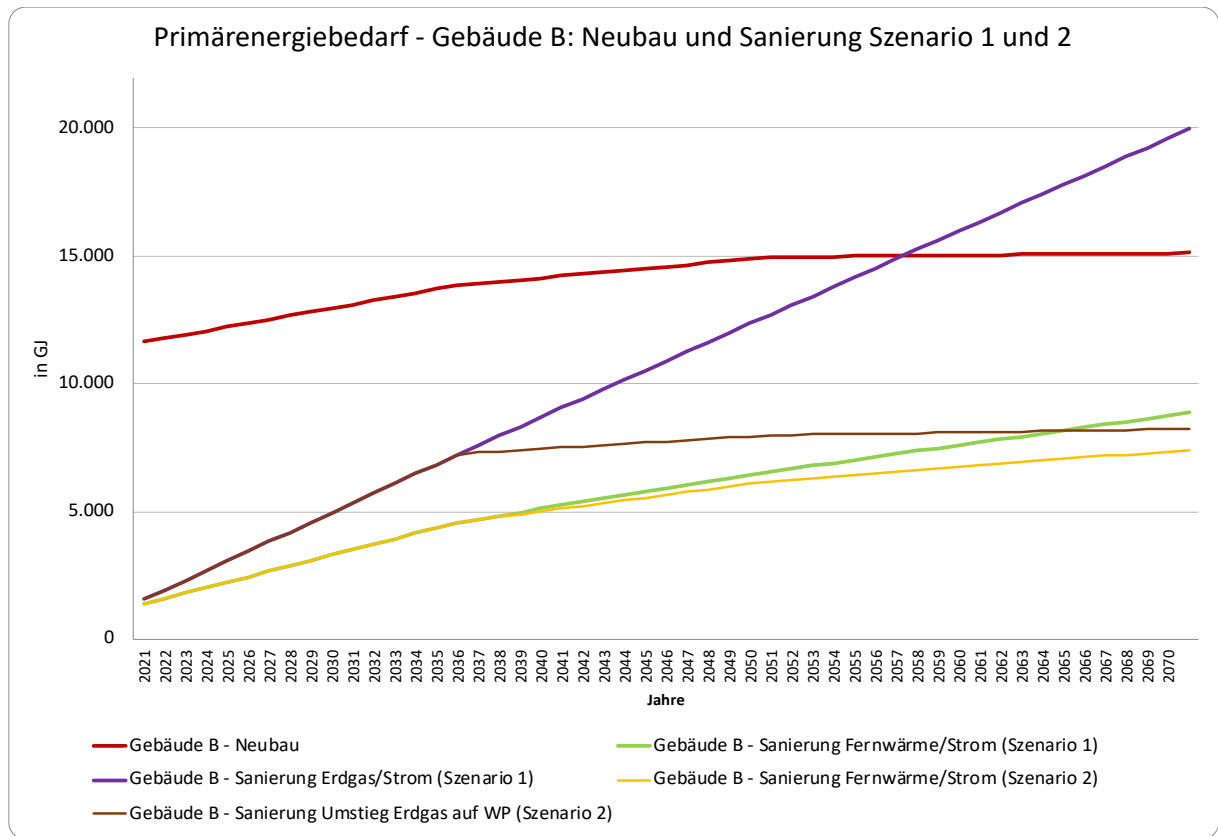
Die unterschiedlichen Startpunkte der Kurven ergeben sich aus dem KEA für den Abriss, Neubau und die Sanierung. Der End- bzw. Primärenergiebedarf der Nutzungsphase wurde von jährlichen kWh in GJ umgerechnet und dem Ausgangswert aus Abriss/Abfallaufbereitung/Neubau bzw. Sanierung/Abfallaufbereitung

hinguzerechnet. Teilweise verlaufen die Kurven von Endenergiebedarfe bzw. Szenario 1 und 2 parallel, so dass nicht alle Linien der Legenden in den Diagrammen zu sehen sind, weil sie sich überlagern (so z.B. bei Gebäude B, bei der sich die beiden Szenario-Verläufe für Sanierung mit Fernwärme als auch mit im Szenario 1 Erdgas sich hinsichtlich den Endenergiebedarfes nicht unterscheiden).

Aufgrund des niedrigen Endenergiebedarfs der Neubauten überholen die sanierten Gebäude in Szenario 1 trotz günstigem Startpunkt am Ende der 2050er Jahre die Neubauten und haben ab diesem Zeitpunkt einen höheren Gesamtenergiebedarf (Abbildung 15 a-c). Lediglich bei einem Umstieg von Erdgas auf Wärmepumpe (Szenario 2) flacht die Kurve der Nutzungsphase für das sanierten Gebäude hinreichend stark ab, so dass diese bis 2070 in ihrer gesamten Energiebilanz noch positiver abschneiden als Neubauten. Aber bei einem Einsatz von Wärmepumpen bei sanierten Gebäuden kommt es zu einer langsamen Konvergenz der beiden Kurvenverläufe, da der Endenergiebedarf der Neubauten niedriger ist als der sanierten Gebäude, obwohl in beiden Gebäuden Wärmepumpen zum Einsatz kommen. Dies liegt an der qualitativ besseren Gebäudehülle der Neubauten gegenüber sanierten Bestandsgebäuden.

Abbildung 16 a-c: Extrapolation Primärenergieverbrauch unter Einbeziehung der Nutzungsphase für Gebäude A - C





Bei der Fortschreibung des Primärenergiebedarfes gibt es hingegen unterschiedliche Verläufe, je nachdem ob Wärmepumpen, Fernwärme oder Erdgas für den Wärme- und Warmwasserbedarf verwendet werden. Ist Erdgas der (Haupt-)Energieträger

verlieren sanierte Gebäude ihren Startvorteile, den sie aufgrund der geringeren Rohstoffbedarfe durch Sanierung im Vergleich zu Neubauten aufweisen, kontinuierlich und werden wie auch bei Endenergiebedarf im Laufe der 2050 Jahren für alle drei untersuchten Gebäude vom entsprechenden Neubau eingeholt. Ist hingegen Fernwärme der (Haupt-)Energieträgern, haben sanierte Gebäude auch im Jahr 2070 noch deutliche Vorsprünge hinsichtlich des gesamten kumulierten Primärenergieverbrauchs. In Szenario 2 bleibt auch das sanierte Gebäude, welches zunächst mit Erdgas den Wärmebedarf gedeckt hat, unterhalb des Kurvenverlaufs der Neubauten, wenn Mitte des nächsten Jahrzehntes die Wärmeversorgung auf Wärmepumpe umgerüstet wird. Zudem sieht man in den Abbildungen 16 a-c die sinkenden Primärenergiefaktoren für Fernwärme und Strom.

Vergleich der Treibhausgasemissionen bis 2070

Die unterschiedlichen Kurvenverläufe der energetischen Kennzahlen in Verbindung zu unterschiedlichen Emissionsfaktoren der verschiedenen Wärmequellen und im Zeitverlauf haben entsprechenden Auswirkungen wie sich die beiden Alternativen „Abriss/Neubau“ versus „Sanierung“ hinsichtlich des gesamten Carbon Footprint verhalten. Wie auch bei den Energiekennzahlen starten die sanierten Gebäude mit einem großen Startvorteil, da der Carbon Footprint der für Sanierung notwendigen Materialien deutlich geringer ist als der Footprint der Materialmengen, die für den Neubau notwendig wären.

In Tabelle 12 sind die verwendeten Emissionsfaktoren aufgeführt. Für Fernwärme können die realen Emissionsfaktoren jedoch sehr unterschiedlich sein und hängen stark von den realen Brennstoffeinsatz der einzelnen Anlagen und der Höhe der Stromgutschriften ab. Die Werte spiegeln einen Durchschnittswert für Deutschland wider. In vielen älteren Studien werden auch noch deutlich höhere Emissionsfaktoren für den Strom-Mix in Deutschland aufgeführt (ca. 500 g/kWh). Aber aktuelle (geschätzte) Zahlen des UBA⁶, die den mittlerweile recht hohen Anteil erneuerbarer Energie im deutschen Strom-Mix berücksichtigen⁷, kommen hier zu deutlich niedrigeren Emissionsfaktoren.

Tabelle 12: Verwendete Emissionsfaktoren in g CO₂-Äquivalenten/kWh für die Extrapolation des Status Quo bis 2070

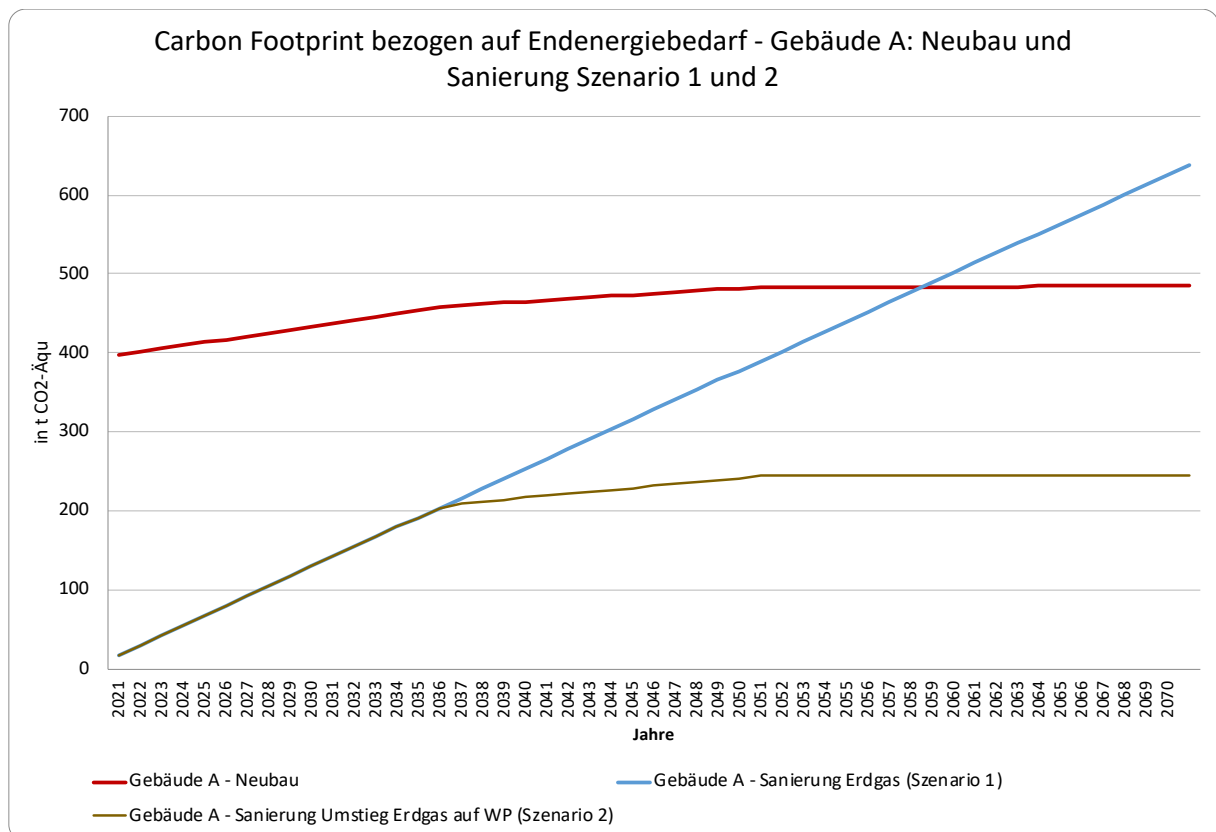
Energieträger	Bis 2035	2036 - 2050	ab 2051
Strom	366	150	5
Fernwärme	243	105	30
Erdgas	231	231	231

⁶ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix>

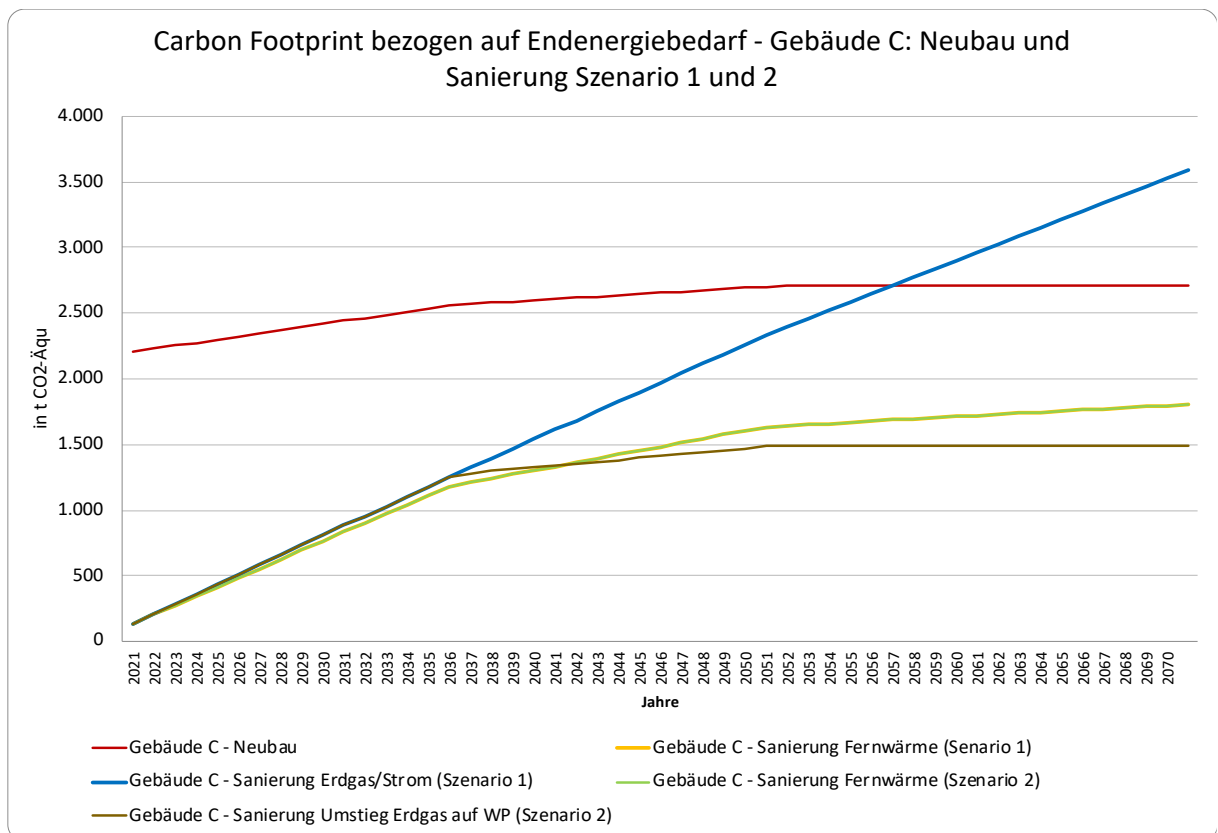
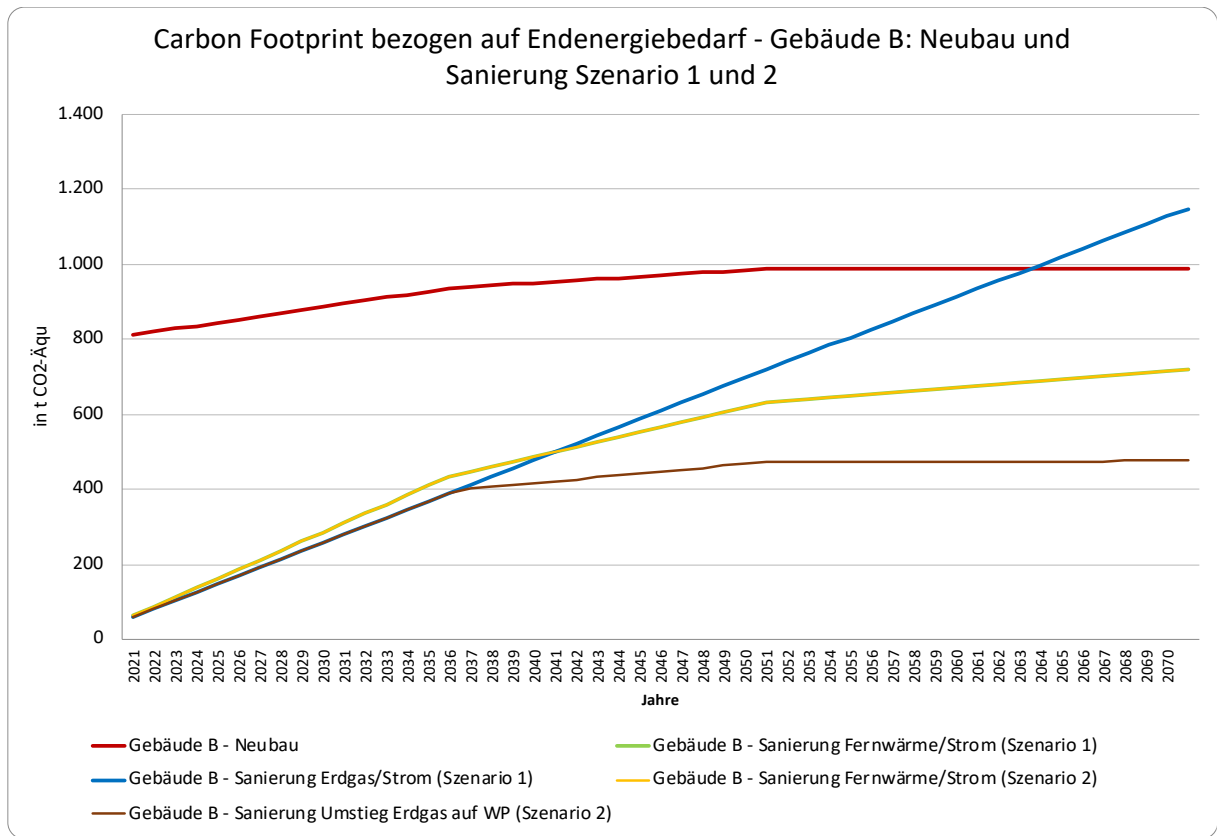
⁷ Wobei im starken Absinken hier möglicherweise auch Corona-bedingte Einflüsse zur Geltung kommen.

Die abnehmenden Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme sind geschätzt und von den angenommenen Rückgängen der Primärenergiefaktoren abgeleitet (Erdgas) bzw. aus den Untersuchungen des Fraunhofer ISE⁸ abgeleitet.

Abbildung 17 a-c: Extrapolation des Treibhausgasemissionen des Endenergiebedarfes unter Einbeziehung der Nutzungsphase für Gebäude A - C



⁸ <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf>



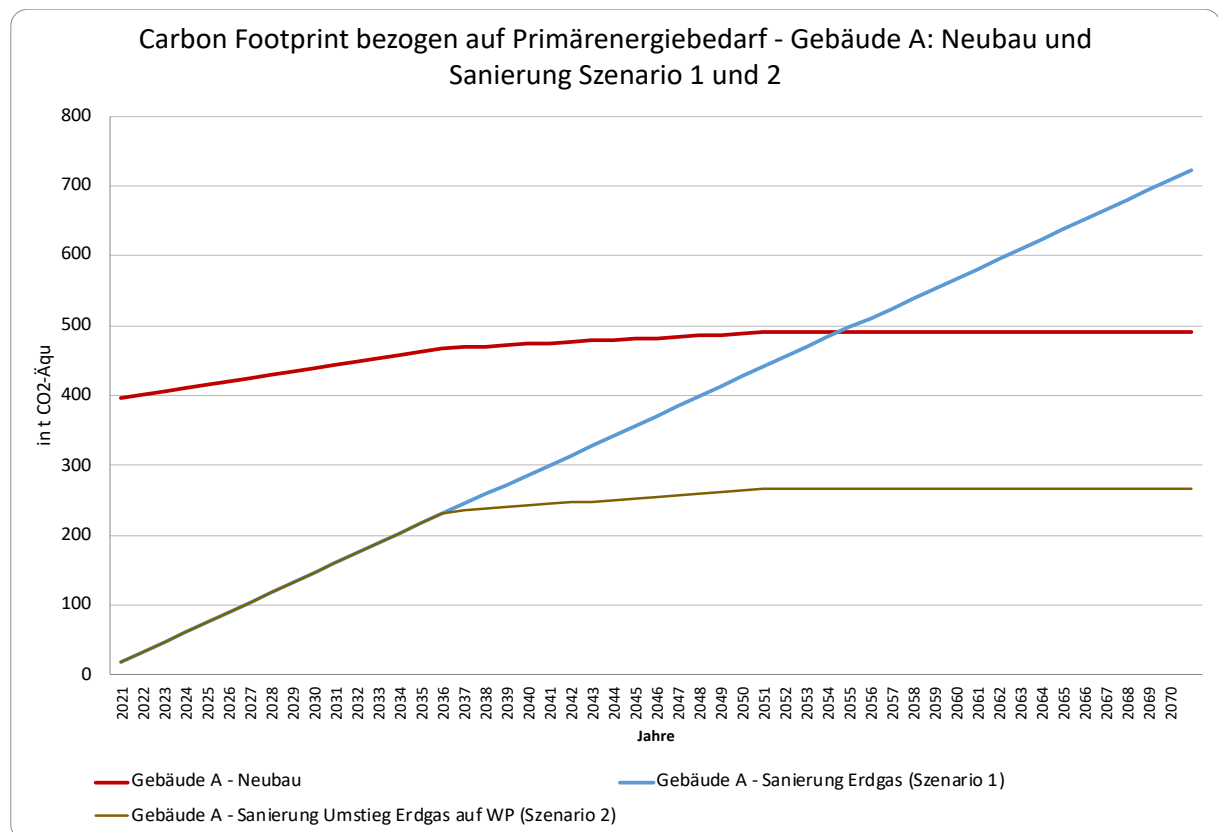
In den Abbildungen 17 a-c wird ersichtlich, dass der Abriss und Neubau von Gebäuden mit hohen Treibhausgasemissionen verbunden ist und beim Einsatz von effizienten Technologien zur Wärmeerzeugung, wie z.B. Wärmepumpen, selbst heute schon

ca. dem Hundertfachen der Treibhausgasemissionen entspricht, die sich aus der Nutzungsphase ergeben. Mit anderen Worten: Neubauten mit Wärmepumpen könnten 100 Jahre beheizt werden, bevor die CO₂-Bilanz der Wärme- und Warmwassererzeugung in der Nutzungsphase dem Carbon Footprint entspricht, der durch den Abriss, die Aufbereitung der Abfälle und dem anschließenden Neubau entspricht.

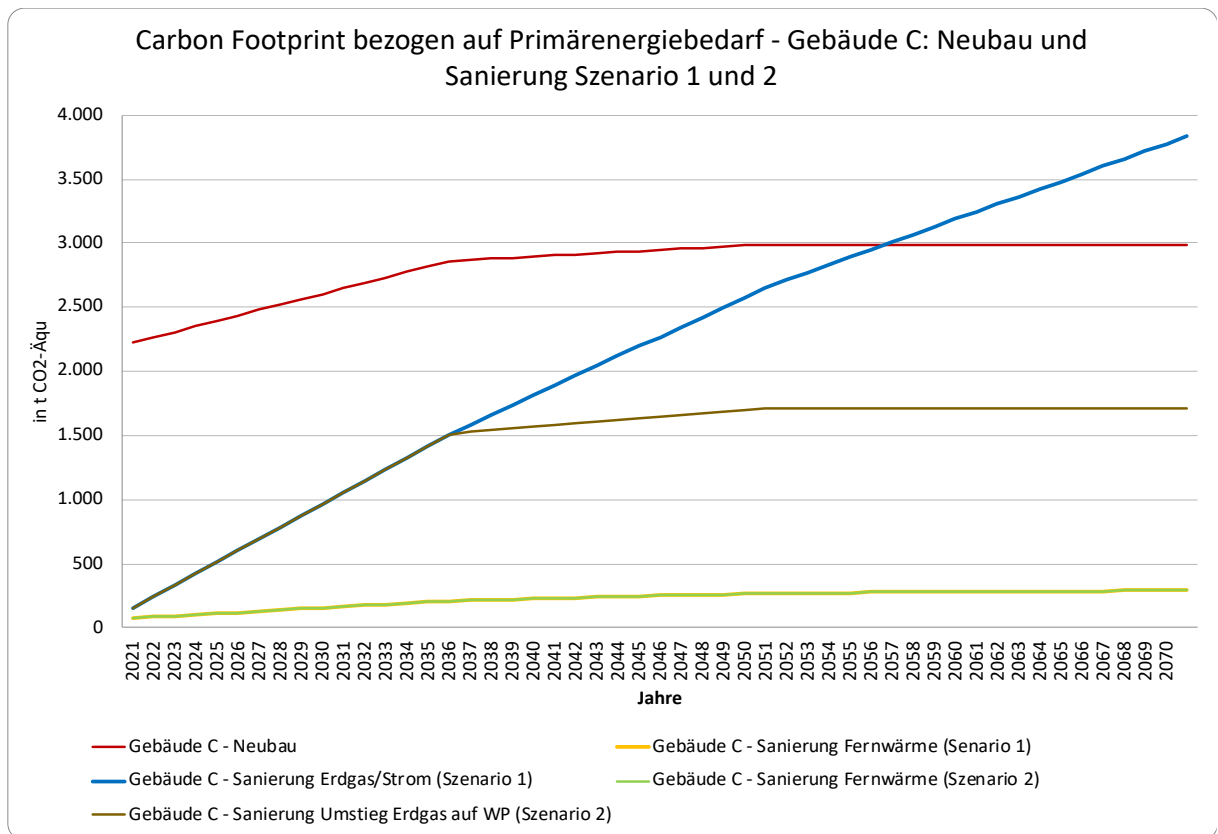
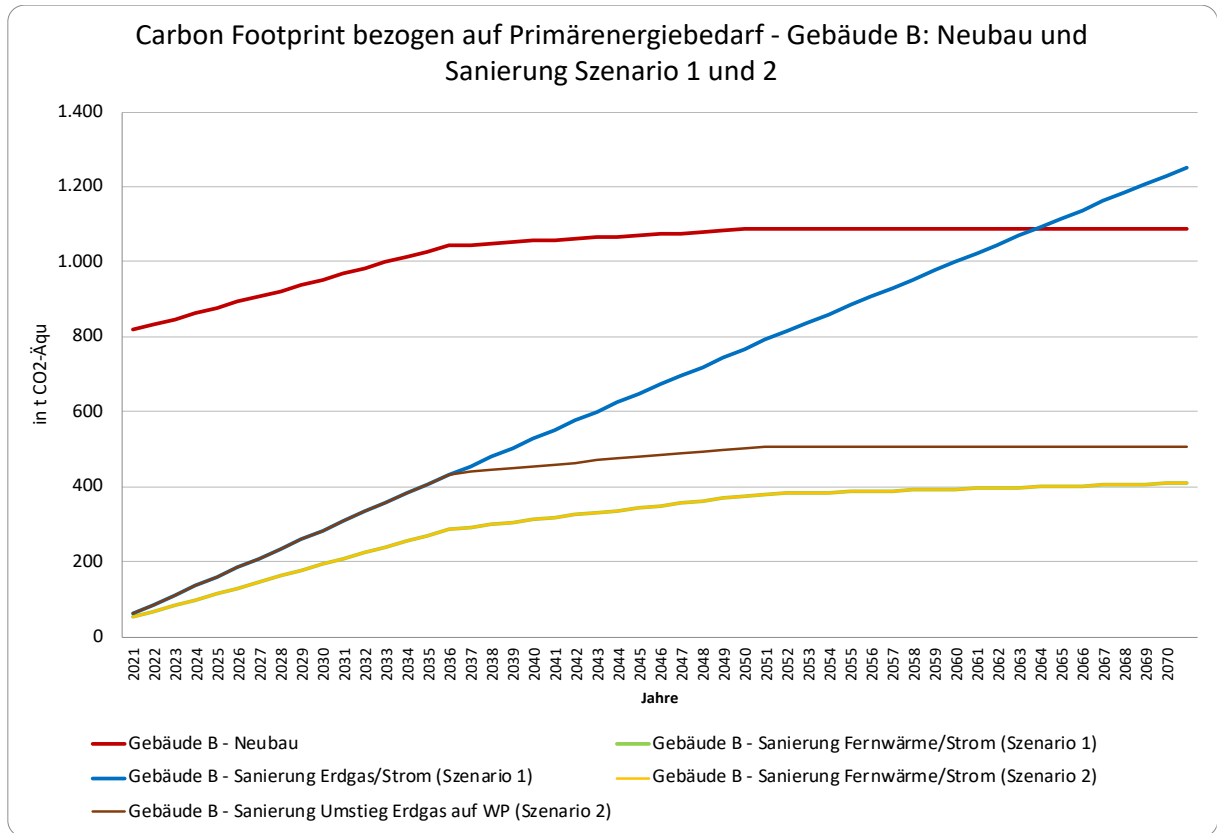
Würde allerdings im gesamten Betrachtungszeitraum Erdgas zur Erzeugung von Wärme und Warmwasser verwendet, würden sanierte Gebäude auch bei der CO₂-Bilanz die Neubauten irgendwann einholen. Dies geschieht etwas später als bei energetischer Betrachtung, da die Emissionsfaktoren für Strom zunächst größer sind als für Erdgas und in unseren Annahmen sich dieses Verhältnis erst ab 2036 ändert (siehe Tabelle 12)⁹.

Die Extrapolation des Carbon Footprint des Primärenergiebedarfes zeigt grundsätzlich sehr ähnliche Verläufe. Allerdings sind die Kurven bei abnehmenden Primärenergiefaktoren und gleichzeitig sinkenden Emissionsfaktoren ausgeprägter als bei den Kurvenverläufen der Treibhausgasemissionen des Endenergiebedarfes.

Abbildung 18 a-c: Extrapolation des Treibhausgasemissionen des Primärenergiebedarfes unter Einbeziehung der Nutzungsphase für Gebäude A - C



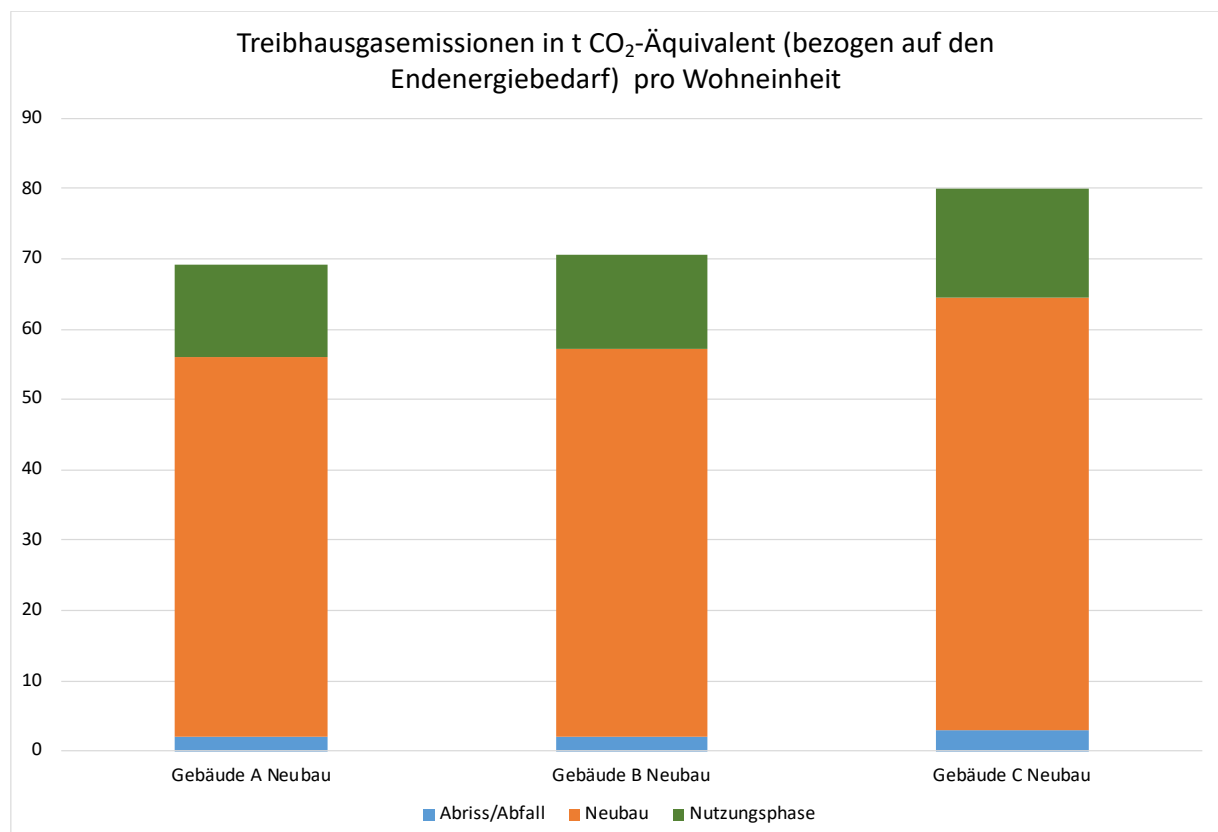
⁹ Dies ist allerdings der Methodik der Modellierung geschuldet, die keine jährlich gleitenden Emissionsfaktoren vorsieht, sondern lediglich 2035 und 2050 die Emissionsfaktoren anpasst. Sollten jedoch die sehr ambitionierten Ziele der neuen Bundesregierung umgesetzt werden, würde der Anteil der Erneuerbaren Energie jährlich steigen und damit der Emissionsfaktor für Strom vermutlich noch in den 2020er Jahren unter den Wert für Erdgas sinken. In diesem Sinn ist der hier modellierte Verlauf der Nutzungsphase aufgrund der gewählten Methodik eher konservativ.

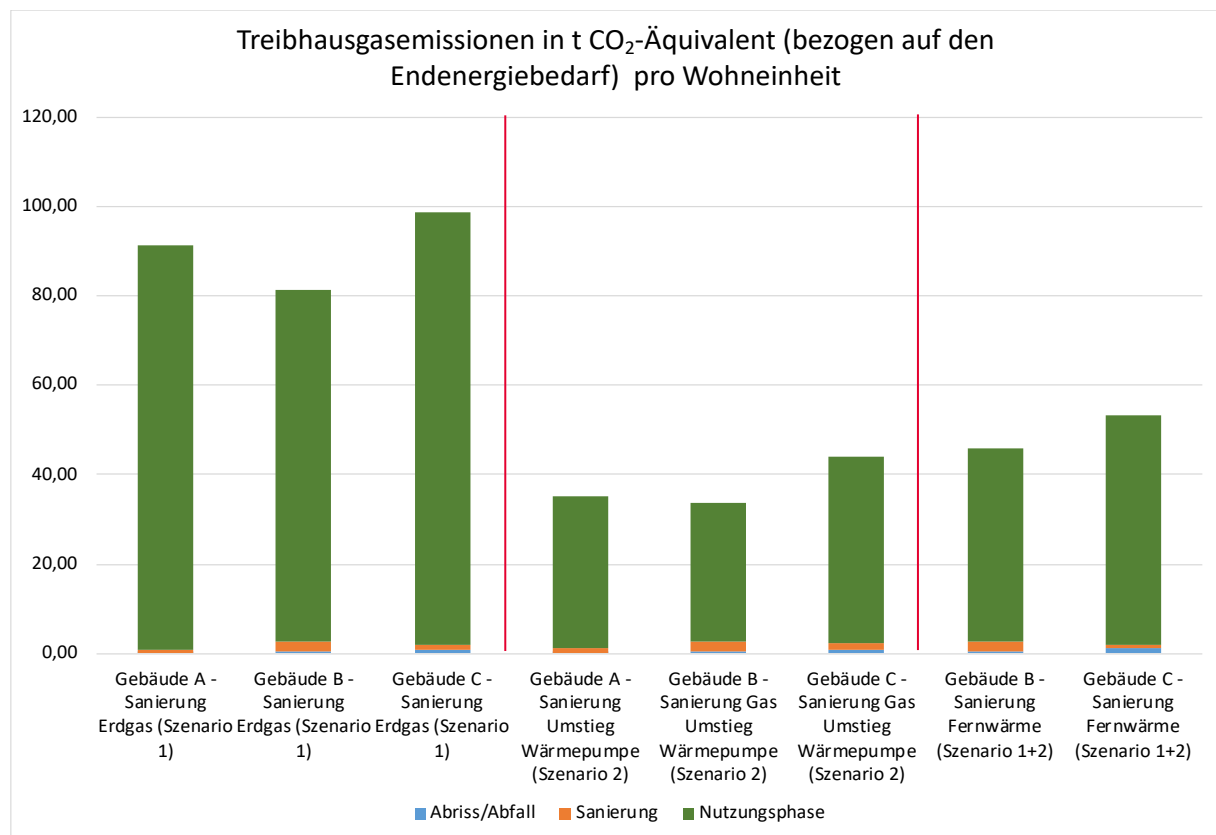


Werden diese Gesamtbetrachtung der Treibhausgasemissionen entlang des Lebenszyklus von Errichtung, Nutzung, Abbruch, Abfallaufbereitung- und Verwertung auf Kennwerte pro Wohneinheiten normiert, zeigt sich, dass die Größenordnungen zwischen den drei Gebäudetypen nicht sehr auseinander liegen. Die Unterschiede liegen zum einen darin, dass die Wohnfläche pro Wohnung in den neueren Bestandsgebäuden (und damit auch im simulierten (Ersatz-)Neubau) etwas höher sind als bei Gebäude A und B. Die höheren Werte für Gebäude A im Vergleich zu Gebäude B sind bei den sanierten Gebäuden auf die schlechtere Qualität der Gebäudehülle zurückzuführen. Im Neubau hebt sich der tendenziell höhere Heizbedarf pro m² bei Gebäude A mit der niedrigeren Wohnfläche gegenseitig auf, so dass die Werte für Gebäude A und B pro Wohneinheit nahezu identisch sind.

Für die sanierte Gebäude (Abbildung 19 b) fällt auf, dass die Emissionen fast vollständig aus der Nutzungsphase stammen und sich halbieren lassen, wenn die Wärme- und Warmwassererzeugung nicht mit Erdgas sondern Fernwärme oder Wärmepumpe erfolgt.

Abbildung 19 a-b: Treibhausgasemission des Endenergiebedarfes umgerechnet auf Wohneinheiten in t CO₂-Äquivalente

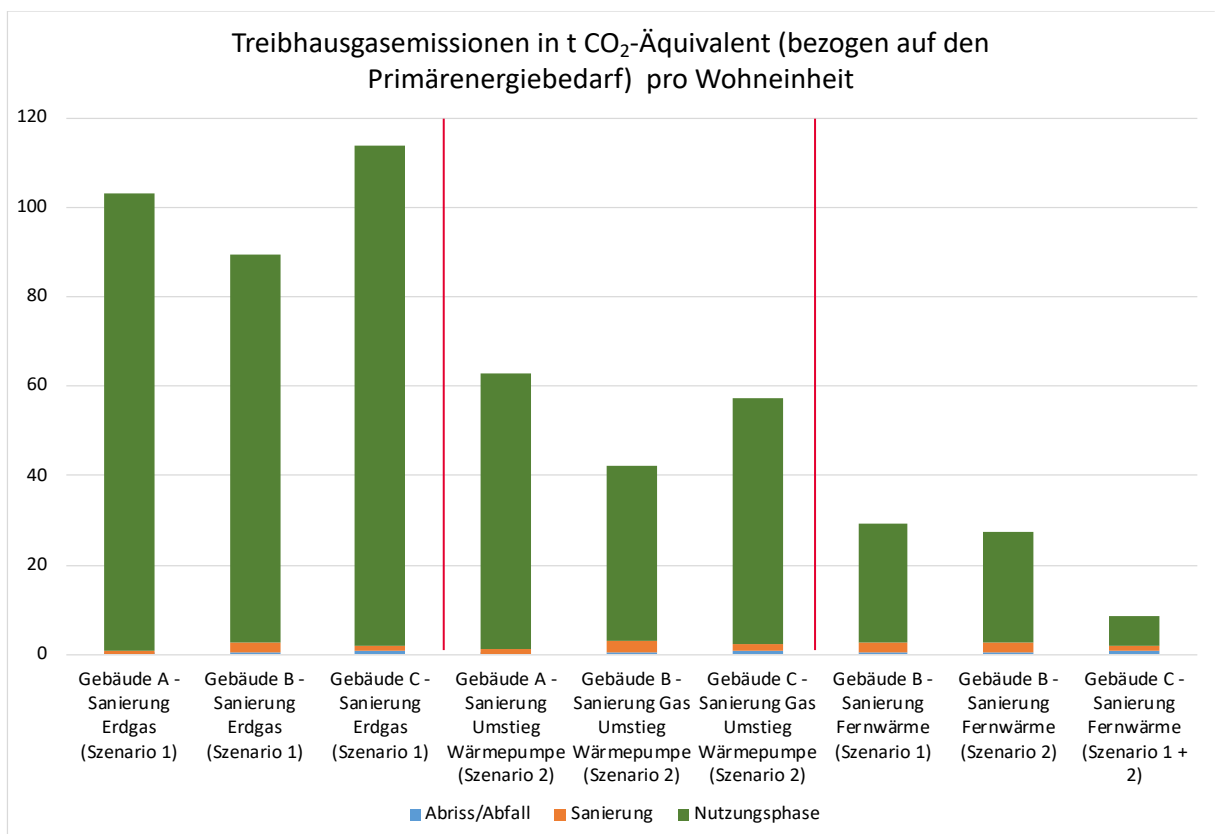
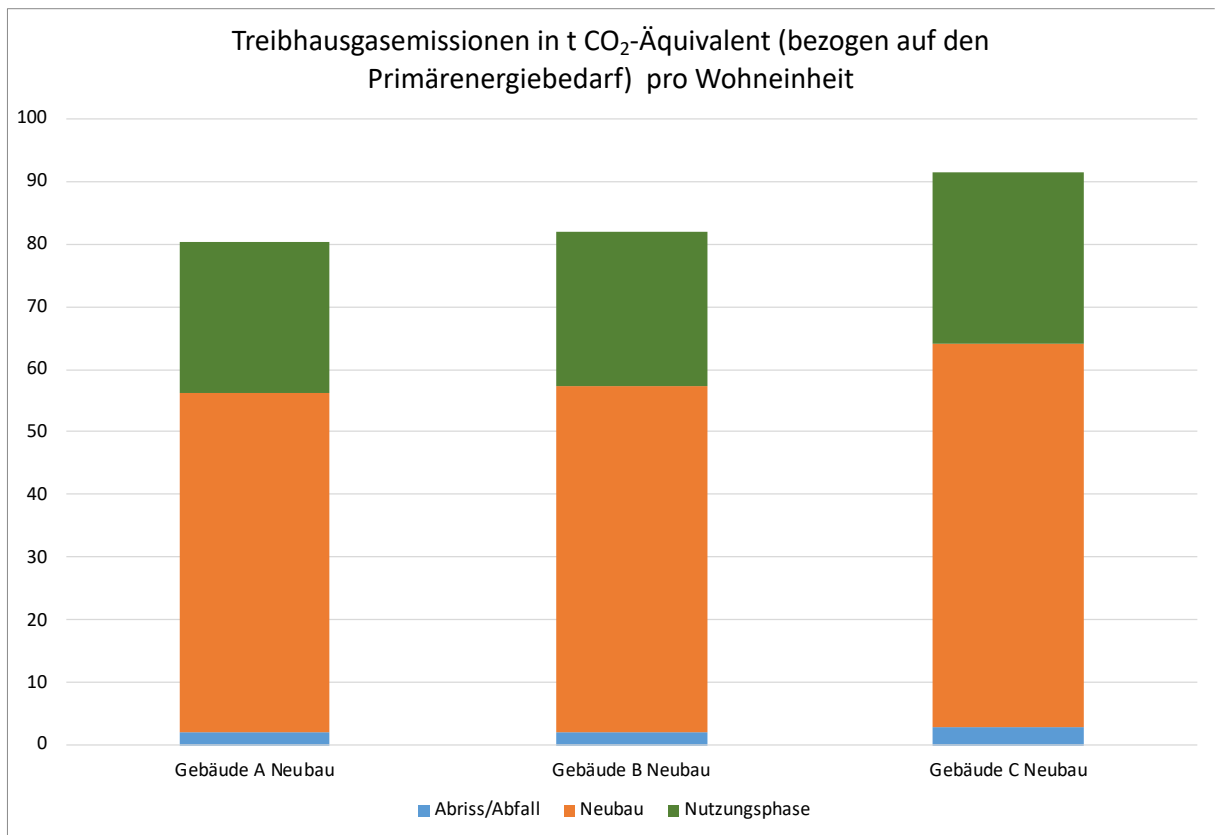




Werden die Emissionsfaktoren auf den Primärenergiebedarf bezogen (Abbildung 20 a-b), verändern sich die Werte für die drei Neubauten nur sehr geringfügig und sind etwas höher pro Wohneinheit. Dies liegt daran, dass in der Modellierung über die drei Phasen 1) bis 2035, 2) 2036 – 2050 und 3) ab 2051 noch im Jahr 2035 mit recht hohen CO₂-Emissionen im Strom-Mix gerechnet wird, die erst ab 2036 deutlich sinken. Das Gleiche trifft auf den Primärenergiefaktor für Strom zu, der in den Berechnungen im Jahr 2050 immer noch bei 0,9 liegt und erst anschließend auf 0,1 sinkt. Ein jährlich gleichmäßig gleitender Rückgang der Emissions- und Primärfaktoren würden die Balkendiagramme gegenfalls etwas anders erscheinen lassen.

Bei der Darstellung der verschiedenen Technologien der sanierten Gebäude fällt im Vergleich zum Carbon Footprint des Endenergiebedarfes auf, dass Fernwärme gegenüber der mit Strom betriebenen Wärmepumpe den Vorteil hat, dass in den hier gewählten Annahmen, die Fernwärme schon ab dem Jahr 2036 nur ein Drittel des Emissionsfaktors aufweist und direkt von 2020 an von niedrigen Primärenergiefaktoren profitiert.

Abbildung 20 a-b: Treibhausgasemission des Primärenergiebedarfes umgerechnet auf Wohneinheiten in t CO₂-Äquivalente



7 Einordnung der Ergebnisse aus AP4 in politische-regulatorische Rahmenbedingungen

Die in den vorherigen Arbeitspaketen erarbeitete Datengrundlage und Modellierung zeigt die ökologische Vorteilhaftigkeit der Sanierung im Vergleich zum Neubau zumindest mit Blick auf die hier konkret betrachteten Fallbeispiele.

Vor diesem Hintergrund soll im Folgenden dargestellt werden, welche Entwicklungen auf der politisch-regulatorischen Ebene darüber hinaus dazu beitragen könnten, zusätzliche Impulse für die Sanierung zu geben.

Die folgenden Ausführungen basieren im Kern auf der Beteiligung des Wuppertal Instituts an der wissenschaftlichen Begleitforschung zu verschiedenen Vorhaben, u.a. die Begleitung des Green Deals durch die Europäische Umweltagentur im Rahmen des European Topic Center Waste and Materials in a Green Economy bzw. der Begleitung des Programms Ressourceneffizienz (ProgRess III). Einschränkend ist dabei natürlich zu betonen, dass Einschätzungen zum Beispiel zur Fortentwicklung von ProgRess zentral von tagesaktuellen politischen Entwicklungen beeinflusst werden können, die sich jeglicher Vorhersage entziehen – wie z.B. aktuell die Entwicklung der Koalitionsverhandlungen für die nächste deutsche Bundesregierung.

Im Folgenden sollen zwei Regulierungsebenen unterschieden werden:

- Zum einen die europäische Ebene mit der Renovation Wave, der Umsetzung des Circular Economy Action Plans oder den Auswirkungen der EU Taxonomy;
- zum anderen die nationale Ebene mit dem weiteren Umsetzungsprozess des Kreislaufwirtschaftsgesetzes oder einer möglichen nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie.

7.1 EU-Ebene

Die Europäische Kommission hat mit dem Green Deal ihre strategische Agenda vorgelegt, die im Kern die langfristige Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Europa sicherstellen soll. Die Vorgabe einer Klimaneutralität und das entsprechende Fit for 55 Programm basieren auf der Grundannahme, dass eine ambitionierte Klima- und Umweltpolitik die Grundlage bilden wird für zukünftige Exportchancen und Kostenvorteile, z.B. durch die Steigerung der Energieeffizienz oder den Ausbau erneuerbarer Energien.

Die Verbindung von Innovations-, Industrie- und Umweltpolitik zeigt sich insbesondere im Circular Economy Action Plan, der im März 2020 als eine der ersten konkreten Umsetzungsstrategien vorgestellt wurde. Die treibende Kraft ist hier der Vize-Präsident der Kommission, Franz Timmermans, der schon in der vorherigen EU-Kommission unter Juncker die Zuständigkeit für den ersten Aktionsplan Kreislaufwirtschaft bei der Generaldirektion Wirtschaft verortete und seitdem insbesondere auf die Reindustrialisierung Europas, die Regionalisierung von Wertschöpfungsketten und die Schaffung neuer Arbeitsplätze in einer Circular Economy abzielt.

Mit dieser strategischen Ausrichtung verbunden ist die Gestaltung politischer Instrumente, die anders als klassische Umweltpolitik nicht in erster Linie auf Gefahrenabwehr abzielt, sondern verstärkt auf Marktentwicklungen und Innovationsprozesse – das jedoch mit teilweise harten Markteingriffen und regulatorischen Vorgaben.

Im Rahmen des EU Circular Economy Action Plans wurde der Bereich „Construction and Buildings“ als eine der zentralen Wertschöpfungsketten identifiziert, die in besonderem Maße von einer Transformation in Richtung Kreislaufwirtschaft profitieren würde; hier unter anderem mit Verweis auf die Relevanz der Abfallströme und die möglichen Einsparpotentiale durch erhöhte Materialeffizienz.

Konkret angekündigt wurden hier unter anderem Anpassungen der Construction Product Regulation, insbesondere mit Blick auf den Einsatz von recycelten Rohstoffen. Für die Überarbeitung solcher Regulierungen hat die Kommission die Revision der Batterierichtlinie wiederholt als „Blaupause“ bezeichnet, aus dem sich das methodische Vorgehen auch für andere der Schlüssel-Wertschöpfungsketten ablesen lasse. Von daher ist klar zu erwarten, dass die Kommission in Zukunft für zentrale Bauprodukte aus Kunststoffen, z.B. Rohre, eine Mindestrezyklatquote einführen wird. Ziel ist dabei zum einen die direkte Reduzierung von Treibhausgasemissionen durch den Ersatz von Primärkunststoff, indirekt aber vor allem die Schaffung einer gesicherten Nachfrage nach hochwertigen Rezyklaten und damit Anreize für den Aufbau einer europäischen Sammel- und Verwertungsinfrastruktur für Kunststoffe.

Hieraus werden sich absehbar ökonomische Anreize für die Sanierung gegenüber dem Neubau ergeben, wenn hier deutlich weniger neue, an diesen Vorgaben ausgerichtete Kunststoffprodukte eingesetzt werden müssen. Aktuell herrscht in Europa eine deutliche Knappheit an hochwertigem Kunststoffrezyklat, da von Seiten der Recycler mit Verweis auf die unsichere Marktlage kaum in entsprechende Anlagen und Technologien investiert wurde. Am Beispiel PET, das bei entsprechender separater Sammlung (z.B. über Pfandsysteme wie in Deutschland) auch in Verpackungen mit Lebensmittelkontakt eingesetzt werden kann, zeigen sich die Effekte der das Angebot deutlich übersteigenden Nachfrage: Aktuell liegt der Preis für qualitativ vergleichbares rPET teilweise bis zu 20% höher als für neues PET. Diese Marktentwicklungen werden von vielen Akteuren als so langfristig eingeschätzt, dass am Markt eine zunehmende Integration der Wertschöpfungskette zu beobachten ist: Unternehmen wie Aldi oder die Schwarz-Gruppe investieren in eigene Recycler, um sich so den Zugriff auf ihre eigenen Stoffströme zu sichern.

Ein zweiter Ansatzpunkt sollen die in Zukunft verpflichtenden „digital logbooks“ für Gebäude sein, über die Mengen, Qualität und Lokalisierung von Rohstoffen in Gebäuden erfasst werden sollen. Ziel ist hier zum einen eine verbesserte Rückgewinnungsquote für einzelne Rohstoffe, wenn diese vorab gezielt erfasst und rückgebaut werden können. Zum anderen soll über die Verknüpfung solcher Datenbestände die „urbane mine“ so abgebildet werden können, dass Angebot und Nachfrage nach recycelten Baustoffen möglichst regional aufeinander abgestimmt werden können. Auch hier ist im Rahmen der Batterierichtlinie ein erster konkreter Umsetzungsansatz vorgestellt worden: Demnach sollen Hersteller in Zukunft verpflichtet werden, entsprechende Daten zu Rohstoffgehalten im Rahmen eines europäischen Datenraums

bereitzustellen; demnach würden diese Anforderungen nur für Neuprodukte, nicht für wiederaufbereitete bzw. sanierte Produkte gelten.

Erste Praxiserfahrungen mit vergleichbaren „Rohstoffpässen“ für Gebäude haben gezeigt, dass von der Bereitstellung solcher Daten in erster Linie die Sanierung profitieren könnte – hier kam es in Pilotprojekten zu einer deutlichen Verlängerung der Nutzungsdauer einzelner Gebäude, weil über solche Datensätze einzelne Sanierungsmaßnahmen deutlich effizienter geplant und umgesetzt werden konnten. Gleichzeitig ist absehbar, dass die verpflichtende Datenerfassung für Neubauten mit erheblichen administrativen Zusatzaufwänden verbunden sein könnte, insbesondere solange die Zuständigkeiten für solche Produktpässe weiter nicht klar geregelt werden – so gibt es in Deutschland für die nationale Umsetzung des Produktpasses für Batterien größere Forschungsvorhaben in mindestens drei Bundesministerien (Umwelt, Wirtschaft und Forschung).

Dritter Schwerpunkt war die Ankündigung einer umfassenden „built environment strategy“, die analog zur Sustainable Product Initiative einen umfassenden Rahmen für Nachhaltigkeit im Bausektor entwickeln sollte. Eine solche Strategie war ursprünglich noch für das Jahr 2021 angekündigt – nach Aussage verschiedener Akteure der Kommission ist diese Initiative allerdings zumindest vorläufig auf Eis gelegt worden. Ein Grund hierfür ist die komplexe Abstimmung mit der „Renovation Wave Initiative“ der Kommission, die sehr fokussiert auf die Themen Energieeinsparungen und Endenergieeffizienz die Sanierungsrate im Gebäudesektor erhöhen will. Mit dem Neuen Europäischen Bauhaus treibt die Kommission parallel auch die Entwicklung großer Pilotprojekte voran, getrieben von deutschen Experten wie Prof. Schellnhuber und mit deutlicher Unterstützung der Kommissions-Präsidentin Ursula von der Leyen – von daher ist erwartbar, dass zumindest eines der fünf solcher Pilotprojekte in Deutschland angesiedelt sein wird. Es wird dabei abzuwarten sein, welche Effekte sich durch die Verzögerung bei der Built Environment Strategy ergeben.

Ein paralleler Entwicklungsstrang ist die Entwicklung der sogenannten EU Taxonomy, mit der die Europäische Kommission private Investitionen u.a. in die Transformation zur Kreislaufwirtschaft steigern möchte. Grundlage der Taxonomy ist eine Liste konkreter Wirtschaftsaktivitäten, die zu sechs verschiedenen Umweltzielen beitragen und gleichzeitig keine signifikanten Nebenwirkungen aufweisen („do no significant harm principle“). Auf Basis dieser Klassifikationen sollen Unternehmen in Zukunft detailliert berichten, welche ihrer Investitionen den Anforderungen dieser Taxonomy entsprechen. Es ist zu erwarten, dass dann über die Finanzinstitute, die hier ebenfalls direkt adressiert werden, ein erheblicher Druck speziell auf Großunternehmen aufgebaut werden wird, ihre Investitions-Portfolios an diesen Kriterien auszurichten. Eine umfangreiche Expertengruppe hat im ersten Schritt Kriterien und Maßnahmen für die Bereiche Klimaschutz und Klimaanpassung entwickelt, in einer zweiten Runde sind aktuell auch Vorgaben für den Bereich Kreislaufwirtschaft in einen Konsultationsprozess eingespeist worden. Die hier genannten Anforderungen an im Sinne der Kreislaufwirtschaft sinnvolle Gebäude könnten weitere Impulse für die Sanierung gegenüber Abriss und Neubau liefern, wenn hier z.B. deutlich über das Abfallrecht hinausgehende Anforderungen an die Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen genannt werden. Allerdings befinden sich viele dieser Kriterien aktuell in

einem intensiven Abstimmungsprozess, so dass noch nicht wirklich absehbar ist, inwieweit sich die Liste der Aktivitäten noch verändern wird.

7.2 Nationale Ebene

Im Vergleich zu den Entwicklungen auf der europäischen Ebene ist für Deutschland insgesamt festzustellen, dass von hier deutlich weniger relevante Impulse für den Gebäudebereich ausgegangen sind.

Mit der Mantelverordnung wurde nach über 15 Jahren politischer Diskussion ein politischer Kompromiss getroffen, der auf der einen Seite Ersatzbaustoffverordnung enthält und damit wichtige Grundlagen für die Kreislaufführung von Abfällen liefert; auf der anderen Seite aber durch verschiedene Anforderungen die Menge der deponierenden Abfälle erhöhen wird. Damit wird sich insofern ein indirekter Anreiz für die Sanierung ergeben, da sich schon jetzt eine erhebliche Knappheit an Deponieraum für Abbruchabfälle abzeichnet, der hier zu erheblich steigenden Entsorgungskosten führen dürfte. Bayern hat sich vor dem Hintergrund genau dieser Entwicklung eine Länderöffnungsklausel gesichert, was gleichzeitig aber eine einheitliche Regelung verhindern wird.

Prinzipiell hätten sich wichtige Impulse für die Sanierung als Ansatz zur Ressourceneinsparung auch aus dem Programm Ressourceneffizienz der Bundesregierung ergeben können. Dieses wurde als ProgRess III fortgeschrieben und enthält u.a. verschiedene Maßnahmenvorschläge für den Bereich bauen – konkrete Ansätze zur Sanierung fehlen hier jedoch leider. Die aufgeführten Maßnahmen wie z.B. der Einsatz CO₂-sparender Bauprodukte bleiben überwiegend auf dem Niveau von Empfehlungen und Prüfaufträgen; tatsächliche ökonomische Anreize oder regulatorische Vorhaben sind hier kaum zu finden. Schon jetzt startet eine Diskussion über die nächste, dann 2024 anstehende Überarbeitung des Programms – möglich wäre die Überführung in eine Art nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. Eine vom Wuppertal Institut koordinierte Arbeitsgruppe soll hier konkrete Optionen entwickeln, die u.a. auch die stärkere Einbeziehung des BMIs und damit z.B. des Runden Tisches Nachhaltigen Bauens beinhalten könnte. Diese Diskussion wird jedoch erst dann wieder an Schwung aufnehmen, wenn im Rahmen der Koalitionsverhandlungen die Zuständigkeiten für diese Themen geklärt wird – hier ist eine der offenbar intensiv diskutierten Optionen die Zusammenführung von Zuständigkeiten aus den Bereichen Umwelt, Bauen und Wirtschaft z.B. in einer Art Klimaschutzministerium.

Im Gegensatz dazu wurde die Revision des Kreislaufwirtschaftsgesetzes bereits abgeschlossen – dort ist u.a. erneut die Verpflichtung der öffentlichen Hand für den Einsatz von Rezyklat im Bausektor verstärkt worden. Im Rahmen der öffentlichen Beschaffung sollen hier u.a. Vorgaben zu Rezyklatgehalten gemacht werden, solange dadurch keine „übermäßigen Kosten“ entstehen. In der Praxis werden diese Vorgaben jedoch absehbar auch weiterhin keine wirklichen Effekte haben, da z.B. auf ein Klagerecht für Anbieter von Sekundärbaustoffen verzichtet wurde.

8 Annex: Tabellenanhang

8.1 Tabellen Bestand

Tabelle 13: Materialzusammensetzung Gebäudehülle A in Tonnen

Bestandteil Gebäudehülle	Keller (inkl. Fundament/ Bodenplatte)	Außenwände	Decken	Innenwände	Dach	Fenster/ Türen (außen und innen)	Treppen	Summe in Tonnen und %	
Beton	436,51		211,64				19,39	667,54	47,16%
Bimsbeton				66,80				66,80	4,72%
Mörtel/ Putz		16,70					1,13	17,83	1,26%
Vollziegel	219,11	3701,72			16,22			606,05	42,81%
Holz					10,18	2,37		12,55	0,89%
Sonstige Dämmstoffe					0,45			0,45	<0,1%
Glas						0,47		0,47	<0,1%
Stahl	29,14		14,13			0,05	0,55	43,87	3,10%
Summe								1.415,56	100,00%

Tabelle 14: Materialzusammensetzung Gebäudehülle B in Tonnen

Bestandteil Gebäudehülle	Keller (inkl. Fundament/ Bodenplatte)	Außenwände	Decken	Innenwände	Dach	Fenster/ Türen (außen und innen)	Treppen	Balkon	Summe in Tonnen und %	
Beton	790,87		533,84				25,85	23,05	1.373,61	55,78%
Bimsbeton		247,36							247,36	10,04%
Mörtel/ Putz	25,22	32,98	75,66				1,51		135,37	5,50%
Kalksandstein				316,62					316,62	12,86%
Vollziegel	247,62				24,24				271,86	11,04%
Holz					15,22	3,85		0,97	20,04	0,81%
Mineralwolle	0,57								0,57	< 0,1%
EPS		0,99							0,99	< 0,1%
Sonstiger Dämmstoff			1,89						1,89	< 0,1%
Glas						1,06			1,06	< 0,1%

Stahl	52,79		35,63			1,51	0,74	1,68	92,35	3,75%
Aluminium						0,11			0,11	< 0,1%
Kunststoffe						0,66			0,66	< 0,1%
Summe									2.462,49	100,00%

Tabelle 15: Materialzusammensetzung Gebäudehülle C in Tonnen

Bestandteil Gebäudehülle	Keller (inkl. Fundament/Bodenplatte)	Außenwände	Decken	Innenwände	Dach	Fenster/ Türen (außen und innen)	Treppen	Balkon	Summe in Tonnen und %	
Beton	2.279,16		1.506,91		784,85		48,47	128,15	4.747,52	64,63%
Mörtel/Putz	53,39	45,93	213,56						312,88	4,26%
Kalksandstein	310,09			440,89					750,97	10,22%
Porenziegel		1.005,77							1.005,77	13,69%
Holz					2,10	10,89			12,96	0,18%
EPS	0,40	0,92							1,32	< 0,1%
Schaumglasdämmung				12,81					12,81	0,17%
Glas						2,01			2,01	< 0,1%
Stahl	149,49		100,59			1,60	1,38	239,80	492,86	6,71%
Aluminium						0,16			0,16	< 0,1%
Kunststoffe						1,28			1,28	< 0,1%
Sonstiges					4,86				4,86	< 0,1%
Summe									7.345,40	100,00%

Tabelle 16: Materialzusammensetzung Haustechnik der Gebäude A bis C in Tonnen

Materialkategorien	Gebäude A		Gebäude B		Gebäude C	
	in Tonnen	in %	in Tonnen	in %	in Tonnen	in %
Metalle	1,53	65,11%	3,27	66,60%	8,82	68,58%
davon Stahl	1,31	55,74%	2,79	56,82%	7,49	58,24%
davon Messing/Rotguss	0,07	2,98%	0,16	3,26%	0,41	3,19%
davon Kupfer	0,14	5,96%	0,32	6,52%	0,91	7,08%
Kunststoffe	0,44	18,72%	0,85	17,31%	2,05	15,94%

davon PP	0,11	4,68%	0,20	4,07%	0,45	3,50%
davon Acryl	0,27	11,49%	0,55	11,20%	1,33	10,34%
davon PVC	0,03	1,28%	0,06	1,22%	0,14	1,09%
Dämmung	0,10	4,26%	0,22	4,48%	0,61	4,74%
Mineralisch	0,28	11,91%	0,56	11,41%	1,36	10,58%
davon Glas	0,00	0,20%	0,01	0,2%	0,02	0,01%
davon Keramik	0,28	11,89%	0,55	11,2168,58	1,34	10,57%
Summe	2,35	100,00%	4,91	100,00%	12,86	100,00%

8.2 Tabellen Abrissmodell

Tabelle 17: KEA in GJ aus dem Abriss und der Verwertung verschiedenen Materialkategorien der drei Beispielhäuser (inkl. Haustechnik)

Materialkategorien	Gebäude A	Gebäude B	Gebäude C
Beton	113,009	232,541	803,718
Bimsbeton	7,749	28,695	
Mörtel/Putz	4,529	34,384	79,475
Kalksandstein		36,729	87,117
Vollziegel	109,592	49,162	
Porenziegel			181,875
Holz	1,260	2,012	1,091
Mineralwolle	0,010	0,111	0,063
EPS		0,363	0,483
Schaumglas			2,013
Sonstige Dämmstoffe	0,076	0,297	
Glas			
Stahl	39,122	81,172	432,355
Aluminium			
Kunststoffe			
Sanitärkeramik	0,070	0,141	0,341
Sonstiges		0,297	1,867
Summe	275,417	466,607	1.590,398

Tabelle 18: KRA in Tonnen aus dem Abriss und der Verwertung verschiedenen Materialkategorien der drei Beispielhäuser (inkl. Haustechnik)

Materialkategorien	Gebäude A	Gebäude B	Gebäude C
Beton	26,347	54,214	187,377
Bimsbeton	0,456	1,689	
Mörtel/Putz	1,801	13,674	31,606
Kalksandstein		2,162	5,129
Vollziegel	39,255	17,609	
Porenziegel			65,146
Holz	0,307	0,490	0,317
Mineralwolle	0,007	0,082	0,046
EPS		0,060	0,080
Schaumglas			1,485
Sonstige Dämmstoffe	0,056	0,219	
Glas			
Stahl	1,275	2,645	14,091
Aluminium			
Kunststoffe			
Sanitärkeramik	0,034	0,068	0,164
Sonstiges		0,219	0,556
Summe	69,538	92,914	306,00

Tabelle 19: Carbon Footprint in Tonnen CO₂-Äquivalent aus dem Abriss und der Verwertung verschiedenen Materialkategorien der drei Beispielhäuser (inkl. Haustechnik)

Materialkategorien	Gebäude A	Gebäude B	Gebäude C
Beton	5,845	12,027	41,569
Bimsbeton	0,401	1,487	
Mörtel/Putz	0,214	1,627	3,761
Kalksandstein		1,903	4,513

Vollziegel	4,963	2,226	
Porenziegel			8,237
Holz	0,109	0,174	0,121
Mineralwolle		0,004	0,002
EPS		3,149	4,198
Schaumglas			0,066
Sonstige Dämmstoffe	0,002		
Glas			
Stahl	2,571	5,335	28,418
Aluminium			
Kunststoffe			
Sanitärkeramik	0,003	0,006	0,014
Sonstiges		0,010	11,333
Summe	14,110	27,948	102,223

8.3 Tabellen Neubau

Tabelle 20: Materialzusammensetzung Gebäudehülle A bis C in Tonnen

Gebäudehülle Neubau	Gebäude A		Gebäude B		Gebäude C	
Beton	873,55	68,46 %	1.803,15	68,71 %	4.868,07	68,86 %
Mörtel/Putz	187,68	14,71 %	392,78	14,97 %	1.069,07	15,12 %
Vollziegel	64,70	5,07 %	145,06	5,53 %	409,48	5,79 %
Holz	19,96	1,56 %	35,88	1,37 %	87,60	1,24 %
Gipskarton	6,39	0,50 %	9,55	0,36 %	20,21	0,29 %
Mineralwolle	10,94	0,86 %	17,24	0,66 %	38,37	0,54 %
XPS	1,10	0,09 %	2,10	0,08 %	5,43	0,08 %
EPS	1,80	0,14 %	4,04	0,15 %	11,41	0,16 %
Sonstige Dämm- stoffe	1,64	0,13 %	2,97	0,11 %	7,41	0,10 %
Stahl	58,22	4,56 %	121,86	4,64 %	331,66	4,69 %
Aluminium	0,24	0,02 %	0,53	0,02 %	1,52	0,02 %
Zink	0,70	0,05 %	1,05	0,04 %	2,23	0,03 %
Glas	1,76	0,14 %	3,96	0,15 %	11,30	0,16 %

Kunststoff gesamt	5,72	0,45 %	11,57	0,44 %	31,01	0,44 %
Sonstige	41,68	3,27 %	72,51	2,76 %	174,94	2,47 %
Summe	1.276,08	100,00 %	2.624,25	100,00 %	7.069,70	100,00 %

Tabelle 21: Materialzusammensetzung Haustechnik der Gebäude A bis C in Tonnen

Materialkategorien	Gebäude A		Gebäude B		Gebäude C	
Metalle	1,62	65,32 %	3,52	66,92 %	9,27	68,77 %
davon Stahl	1,43	57,66%	3,10	58,94 %	8,13	60,31 %
davon Messing/Rotguss	0,07	2,82 %	0,15	2,85 %	0,40	2,97 %
davon Kupfer	0,12	4,84 %	0,26	4,94 %	0,73	5,42 %
Kunststoffe	0,5	20,16 %	1,00	19,01 %	2,36	17,51 %
davon PP	0,03	1,21 %	0,07	1,33 %	0,21	1,56 %
davon Acryl	0,27	10,89 %	0,55	10,46 %	1,33	9,87 %
davon PVC	0,03	1,21 %	0,07	1,33 %	0,16	1,19 %
Dämmung	0,07	2,82 %	0,17	3,23 %	0,47	3,49 %
Mineralisch	0,28	11,29 %	0,56	10,65 %	1,36	10,09 %
davon Glas	0,00	0,00 %	0,01	0,19 %	0,02	0,15 %
davon Keramik	0,28	11,29 %	0,55	10,46 %	1,36	10,09 %
Summe	2,48	100,00 %	5,26	100,00 %	13,48	100,00 %

Tabelle 22: KEA der Materialzusammensetzung Gebäudehülle A bis C in GJ

Gebäudehülle Neubau	Gebäude A	Gebäude B	Gebäude C
Beton	691	1.442	3.916
Mörtel/Putz	260	556	1.530
Vollziegel	247	553	1.561
Holz	773	1.381	3.360
Gipskarton	36,6	54,8	116
Mineralwolle	208	328	730

XPS	113	216	558
EPS	171	383	1.082
Sonstige Dämmstoffe	146	270	682
Stahl	1.360	2.845	7.743
Aluminium	46,8	105	298
Zink	52,5	78,5	166
Glas	44,4	100	285
Kunststoff gesamt	472	945	2.513
Sonstige	803	1.542	3.982
Summe	5.425	10.799	28.522

Tabelle 23: KRA der Materialzusammensetzung Gebäudehülle A bis C in Tonnen

Gebäudehülle Neubau	Gebäude A	Gebäude B	Gebäude C
Beton	944	1.970	5.350
Mörtel/Putz	217	455	1.241
Vollziegel	105	236	667
Holz	57,3	102	248
Gipskarton	8,1	12,1	25,7
Mineralwolle	27,5	43,3	96,4
XPS	3,7	7,1	18,2
EPS	4,7	10,6	29,9
Sonstige Dämmstoffe	3,9	6,8	16,4
Stahl	406	849	2.312
Aluminium	5,4	12,1	34,5
Zink	17,1	25,5	54,0
Glas	6,3	14,2	40,4
Kunststoff gesamt	23,2	48,1	131
Sonstige	70,7	123	297
Summe	1.901	3.916	10.561

Tabelle 24: Carbon Footprint der Materialzusammensetzung Gebäudehülle A bis C in Tonnen CO₂-Äquivalent

Gebäudehülle Neubau	Gebäude A		Gebäude B		Gebäude C	
	[t CO ₂ -Äquivalent]	[t CO ₂ -Äquivalent /WE]	[t CO ₂ -Äquivalent]	[t CO ₂ -Äquivalent /WE]	[t CO ₂ -Äquivalent]	[t CO ₂ -Äquivalent /WE]
Beton	90,3	12,9	189	13,5	512	15,1
Mörtel/Putz	32,4	4,6	68,4	4,9	187	5,5
Vollziegel	20,6	2,9	46,3	3,3	131	3,9
Holz	6,7	1,0	11,6	0,8	27,8	0,8
Gipskarton	2,6	0,4	3,9	0,3	8,3	0,2
Mineralwolle	15,8	2,3	24,9	1,8	55,4	1,6
XPS	12,4	1,8	23,6	1,7	61,0	1,8
EPS	7,2	1,0	16,1	1,2	45,6	1,3
Sonstige Dämmstoffe	2,1	0,3	4,2	0,3	11,3	0,3
Stahl	142	20,3	297	21,2	807	23,7
Aluminium	4,5	0,6	10,0	0,7	28,4	0,8
Zink	4,1	0,6	6,2	0,4	13,1	0,4
Glas	3,4	0,5	7,6	0,5	21,7	0,6
Kunststoff gesamt	18,0	2,6	36,7	2,6	98,8	2,9
Sonstige	10,3	1,5	15,8	1,1	34,3	1,0
Summe	372	53,1	760	54,3	2.042	60,1

Tabelle 25: KEA der Materialzusammensetzung Haustechnik der Gebäude A bis C in GJ

Materialkategorien	Gebäude A	Gebäude B	Gebäude C
Metalle	64,73	140,69	377,23
davon Stahl	33,52	72,54	190,03
davon Messing/Rotguss	33,52	72,54	190,03
davon Kupfer	19,51	43,74	123,48
Kunststoffe	28,05	56,89	131,73

davon PP	2,52	5,65	15,95
davon Acryl	10,99	21,98	53,39
davon PVC	2,04	4,15	10,09
Dämmung	4,32	9,69	27,35
Mineralisch	7,94	15,88	38,55
davon Glas	0,06	0,11	0,27
davon Keramik	7,88	15,76	38,29
Summe	105,56	224,32	578,18

Tabelle 26: KRA der Materialzusammensetzung Haustechnik der Gebäude A bis C in Tonnen

Materialkategorien	Gebäude A	Gebäude B	Gebäude C
Metalle	45,21	98,34	266,62
davon Stahl	9,99	21,63	56,65
davon Messing/Rotguss	13,83	28,75	74,57
davon Kupfer	21,35	47,88	135,15
Kunststoffe	0,92	1,86	4,37
davon PP	0,06	0,13	0,37
davon Acryl	0,50	1,01	2,45
davon PVC	0,07	0,14	0,35
Dämmung	0,14	0,31	0,87
Mineralisch	1,36	2,72	6,61
davon Glas	0,01	0,02	0,04
davon Keramik	1,35	2,71	6,57
Summe	47,64	103,24	278,49

Tabelle 27: Carbon Footprint der Materialzusammensetzung Haustechnik der Gebäude A bis C in Tonnen CO₂-Äquivalent

Materialkategorien	Gebäude A	Gebäude B	Gebäude C
--------------------	-----------	-----------	-----------

	[t CO ₂ -Äquivalent]	[t CO ₂ -Äquivalent /WE]	[t CO ₂ -Äquivalent]	[t CO ₂ -Äquivalent /WE]	[t CO ₂ -Äquivalent]	[t CO ₂ -Äquivalent /WE]
Metalle	5,08	0,73	10,46	0,75	27,89	0,82
davon Stahl	3,57	0,51	7,14	0,51	18,76	0,55
davon Messing/Rotguss	0,58	0,08	1,22	0,09	3,18	0,09
davon Kupfer	0,91	0,13	2,04	0,15	5,75	0,17
Kunststoffe	0,79	0,11	1,51	0,11	3,66	0,11
davon PP	0,15	0,02	0,27	0,02	0,66	0,02
davon Acryl	0,43	0,06	0,87	0,06	2,11	0,06
davon PVC	0,09	0,01	0,18	0,01	0,47	0,01
Dämmung	0,21	0,03	0,42	0,03	1,11	0,03
Mineralisch	2,27	0,32	4,91	0,35	13,38	0,39
davon Glas	0,00	<0,01	0,01	<0,01	0,02	<0,01
davon Keramik	0,55	0,08	1,06	0,08	2,52	0,07
Summe	8,52	1,22	17,68	1,26	47,10	1,39