

Abschätzung zukünftiger Stoffströme im Bausektor Nordrhein-Westfalens

**Abschätzung der durch Abriss, Neubau, Sanierung und
Austausch induzierten Materialströme im
Wohngebäudesektor von 2022 bis 2060**

SCI4climate.NRW steht für die wissenschaftliche Begleitung der Industrietransformation. Das Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIKE) hat Ende 2022 das Wuppertal Institut, das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, das Institut der deutschen Wirtschaft, die VDZ Technology gGmbH und die VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH (BFI) beauftragt, Transformationspfade für den klimaneutralen Umbau der Industrie in Deutschland zu erforschen. Nordrhein-Westfalen dient dabei als Modellregion. Die Forschung baut auf den Ergebnissen des Vorgängerprojekts SCI4climate.NRW 2018-2022 auf. Die Institute stehen in engem Austausch miteinander und mit Industrie und Politik in der Initiative IN4climate.NRW.



Bibliographische Angaben

Herausgeber: SCI4climate.NRW
Veröffentlicht: 06.12.2023
Autor:innen: Bergmann, Luisa; Steger, Sören
Kontakt: luisa.bergmann@wupperinst.org
Bitte zitieren als: Bergmann, Luisa; Steger, Sören 2023: Abschätzung zukünftiger Stoffströme im Bausektor Nordrhein-Westfalens. Abschätzung der durch Abriss, Neubau, Sanierung und Austausch induzierten Materialströme im Wohngebäudesektor von 2022 bis 2060. Ein Bericht aus SCI4climate.NRW.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	7
1 Zusammenfassung	8
2 Einführung	10
3 Wohngebäudebestand im Jahr 2021 in Gebäudezahlen	11
4 Das Wohngebäudemodell	13
4.1 Vorstellung des Wohngebäudemodells.....	13
4.2 Getroffene Annahmen im Wohngebäudemodell.....	14
4.2.1 Abrissrate	14
4.2.2 Zubaurate	15
4.2.3 Sanierungsrate	16
4.2.4 Austausch von Bauteilen.....	16
5 Wohngebäudebestand und dessen Veränderungen bis 2060 in Gebäudezahlen.....	17
6 Veränderungen des Wohngebäudebestands als Materiallager bis 2060	19
6.1 Materialströme der Abrissaktivitäten	20
6.2 Materialströme des Neubauaktivitäten	21
6.3 Materialströme der Sanierungsaktivitäten	22
6.4 Materialströme durch den Austausch von Bauteilen.....	24
6.5 Zusammenführung der Veränderungen durch energetische Sanierung und Austausch von Bauteilen.....	25
6.6 Zusammengeführte Veränderungen des Materiallagers bis 2060	28
7 Bewertung der Ergebnisse	32
7.1 Sensitivitätsanalyse der Sanierungsrate.....	32
7.2 Ausgewählte Stoffströme im Fokus.....	36
7.2.1 Dämmstoffe	36
7.2.2 Holz	41
7.3 Abschließende Bewertung.....	45
8 Ausblick.....	47
Literaturverzeichnis	48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wohngebäudebestand NRW im Jahr 2021 nach Baujahren	12
Abbildung 2: Zubau- und Abbruchszenario 2022-2060 mit Saldo	17
Abbildung 3: Wohngebäudebestand Szenario 2022-2060 nach Baujahren	18
Abbildung 4: Verteilung der Hauptmaterialien des Wohngebäudebestands (2021).....	19
Abbildung 5: anfallende Materialmasse aus dem Abbruch im Zeitraum 2022-2060 (insgesamt).....	20
Abbildung 6: anfallende Materialmasse aus dem Abbruch im Zeitraum 2022-2060 (Glas und Dämmstoffe).....	21
Abbildung 7: benötigte Materialmasse für den Neubau im Zeitraum 2022-2060.....	22
Abbildung 8: Materialmengen durch energetische Sanierung im Zeitraum 2022-2060.....	23
Abbildung 9: Materialmassen durch Austausch von Bauteilen im Zeitraum 2021-2060.....	24
Abbildung 10: Gemeinsame Betrachtung von Massen der energetischen Sanierung und des Austauschs von Bauteilen	25
Abbildung 11: Neu benötigte Materialmassen aus energetischer Sanierung und Austausch von Bauteilen.....	26
Abbildung 12: Anfallende Abfälle durch die energetische Sanierung und den Austausch von Bauteilen	27
Abbildung 13: Zusammengeführte Materialgruppen aus energetischer Sanierung und Austausch von Bauteilen.....	28
Abbildung 14: Materialien im Bestand (2060).....	29
Abbildung 15: Materialmasse im Bestand im Zeitraum 2021-2060	30
Abbildung 16: Kumulierte Materialmassen und -zusammensetzung durch sämtliche modellierten Bautätigkeiten (2022-2060).....	31
Abbildung 17: kumulierte Materialmassen und -zusammensetzungen durch sämtliche modellierten Bautätigkeiten (2022-2060) (ausschließlich prozentual geringfügige Fraktionen).....	31
Abbildung 18: Massenströme durch energetische Sanierung im Zeitraum 2022-2060 bei Sanierungsrate von 4 % (2060).....	32
Abbildung 19: Gegenüberstellung kumulierte Massenströme durch energetische Sanierung 2 %- vs. 4 %-Szenario	33
Abbildung 20: Materialmassen durch Austausch von Bauteilen im Zeitraum 2021-2060.....	35
Abbildung 21: Gemeinsame Betrachtung von Massen der energetischen Sanierung und des Austauschs von Bauteilen innerhalb des 4 %-Szenarios	36
Abbildung 22: Anfallende Dämmstoffabfälle aus energetischer Sanierung (2 %), Abriss und Austausch von Bauteilen (2022-2060)	37
Abbildung 23: Anfallende Dämmstoffabfälle aus energetischer Sanierung (4 %), Abriss und Austausch von Bauteilen (2022-2060)	38
Abbildung 24: Neu benötigte Dämmmaterialien durch energetische Sanierung, Zubau von Wohngebäuden und Austausch von Bauteilen (2022-2060)	39

Abbildung 25: Dämmmaterialien im Input und Output mit Saldo im Zeitraum 2022-2060	40
Abbildung 26: Menge an neu benötigtem Dämmmaterial (Hanf) durch Einsatz in der energetischen Sanierung (2022-2060)	41
Abbildung 27: Massenströme (Holz) im Zeitraum 2022-2060	42
Abbildung 28: Veränderungen im Bestand (Holz) im Zeitraum 2021-2060	42
Abbildung 29: jährlicher Inputstrom (Holz) unter Berücksichtigung einer sich erhöhenden Holzbaurrate bis 2050 auf 50 %	43

Abkürzungsverzeichnis

CO₂ *Kohlenstoffdioxid*
EPS *Expandiertes Polystyrol*
IWU *Institut Wohnen und Umwelt*
NRW *Nordrhein-Westfalen*

UBA *Umweltbundesamt*
WDVS *Wärmedämmverbundsystem*
XPS *Extrudiertes Polystyrol*

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht zu angenommenen Abgangsraten je Cluster über den Betrachtungszeitraum... 15

1 Zusammenfassung

In diesem Bericht wird das Wohngebäudemodell der Abteilung Kreislaufwirtschaft des Wuppertal Instituts präsentiert. Der Bericht zielt darauf ab, die Materialströme, die durch Abriss, Neubau, Sanierung und Austausch im Wohngebäudesektor des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen während des Zeitraums von 2022 bis 2060 verursacht werden, abzuschätzen. Das Modell verknüpft dabei Angaben zu tatsächlichen Wohngebäudezahlen, entnommen aus den Daten des Statistischen Bundesamts und der Zensuserhebung 2011, mit typischen Baumaterialien je Gebäudetyp und Baujahr. Die Gebäudetypologie basiert dabei auf Arbeiten des Instituts für Wohnen und Umwelt. Bis zum Jahr 2060 können so über Festlegung von Abriss-, Neubau- und Sanierungsraten sowie Austausch einzelner Bauteile mögliche Materialströme des Landes NRW im Wohnbausektor modelliert werden.

Insgesamt wird unter den getroffenen Annahmen der Wohngebäudebestand bis 2029 von 3,93 Millionen Wohngebäuden auf 3,95 Millionen leicht anwachsen, danach jedoch bis 2060 auf 3,7 Millionen Wohngebäude abfallen.

Innerhalb des Materiallagers entstehen durch den Abriss Materialmengen von kumuliert 962 Millionen Tonnen, wobei die massenmäßig relevantesten Abfallstoffe Beton, Kalksandstein und Bimsbeton sind. Dämmstoffe werden durch den zunehmenden Abriss energetisch sanierter Gebäude ab dem Jahr 2052 verstärkt anfallen. Durch den Neubau werden bis 2060 kumuliert 353 Millionen Tonnen in das Materiallager einfließen, wobei die wichtigsten Materialgruppen hier neben Beton, vor allem Mörtel/Putz/Estrich und Vollziegel sein werden. Innerhalb der energetischen Sanierung konnte bei der angenommenen linear ansteigenden Sanierungsrate von 1% auf 2% ein starker Rückgang der Materialmengen aus der Sanierung ab dem Jahr 2056 festgestellt werden, da ein Großteil des Gebäudebestandes dann saniert sein wird. Durch eine zusätzliche Modellierung des Austauschs einzelner Bauteile, z.B. dem Austausch bestehender Dämmung, wird dieser Rückgang nahezu ausgeglichen. Kumuliert werden für energetische Sanierung sowie Austausch von Bauteilen bis 2060 37 Millionen Tonnen neues Material benötigt, während 20 Millionen Tonnen Baumaterial als Abfall anfällt. Es konnte somit herausgearbeitet werden, dass es sich beim Wohnbausektor in NRW um einen äußerst dynamischen Sektor handelt, der einerseits zukünftig große Mengen an Material für Neubau und Sanierung benötigt, andererseits aber auch enorme Mengen an Abfälle durch Rückbau und Sanierung produzieren wird. Kumuliert fallen über den Betrachtungszeitraum zwischen 2022 und 2060 mehr Abfälle an, als für den Neubau benötigt werden, was entsprechende Potenziale zur Wiederverwendung von Baumaterialien anzeigt.

Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die Abfallströme und neu benötigten Materialien innerhalb der verschiedenen Materialgruppen teils starke Diskrepanzen aufweisen. Besonders gut geeignet für eine Wiederverwendung scheinen hier allgemein mineralische Mineralgruppen zu sein, da diese sowohl im Abriss als auch im Neubau kontinuierlich anfallen bzw. benötigt werden. Eine Aufbereitung dieser Abfälle stellt demnach eine besonders vielversprechende Perspektive der Kreislaufschließung dar. Anders ist dies bei Dämmstoffen, die besonders als Inputstrom im Modell dargestellt werden konnten,

als Abfall jedoch erst mit einer deutlichen zeitlichen Verschiebung anfallen werden und demnach erst später zur Aufbereitung und ggf. Wiederverwendung zur Verfügung stehen.

Weiterer Forschungsbedarf konnte in der Weiterentwicklung des Modells hinsichtlich der Detailtiefe und Regionalisierung der Gebäudetypen sowie der Modellierung alternativer Szenarien und Verwertung der gewonnenen Erkenntnisse identifiziert werden.

2 Einführung

Eine klimaneutrale Zukunft, also eine Zukunft, in der sich Kohlenstoffemissionen und -immissionen im Gleichgewicht befinden, ist eines der zentralen Ziele der europäischen Gemeinschaft. 2020 wurde dieses Ziel innerhalb des Green Deals festgehalten, wonach Europa bis 2050 der weltweit erste klimaneutrale Kontinent werden soll (Europäisches Parlament - Generaldirektion Kommunikation, 2019). 2021 wurde dieses Ziel in Form des Klimaschutzgesetzes in das deutsche Recht überführt und verschärft, indem Deutschland bereits 2045 im gesamten Bundesgebiet klimaneutral wirtschaften will (Bundesregierung, o. J. (a)).

Eine zentrale Stellschraube zum Erreichen dieses Ziels stellt der Gebäudesektor dar. 2021 war dieser für rund 16 % der gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich (Bundesregierung, o. J. (b)).

Einer der wichtigsten Treiber für diese Emissionen ist der hohe Materialbedarf im Gebäudesektor. So werden jährlich 90 % des gesamten inländischen mineralischen Rohstoffabbaus in Gebäuden verbaut – in Zahlen entspricht dies 517 Millionen Tonnen Material pro Jahr (Deutsche Energie-Agentur (2021)). Nicht nur der Materialbedarf für den Neubau von Gebäuden ist dabei klimarelevant. Besonders nach dem Ende der Nutzungszeit von Gebäuden bzw. Bauteilen, muss mit dem entstehenden Abfall sinnvoll umgegangen werden. In Deutschland verursacht der Bausektor pro Jahr knapp 230 Millionen Tonnen Abfall (Stand: 2020), und stellt damit rund 55 % der gesamten Abfallaufkommens dar (Umweltbundesamt, 2022). Bisher wird ein Großteil dieser Baumaterialien wiederverwertet, indem sie für Straßenbau genutzt oder deponiert werden. Die Wiederverwendung im Hochbau spielt nur eine untergeordnete Rolle, was in Bezug auf das Erreichen der Klimaschutzziele kritisch zu hinterfragen ist. Durch eine Steigerung der stofflichen Wiederverwertung im Hochbau und das Schließen von Stoffkreisläufen besteht hier das Potenzial, Emissionen, die bei der Bereitstellung von Primärmaterialien entstehen, einzusparen.

Um eine solche Kreislaufführung von Baumaterialien voranzutreiben, müssen jedoch besonders auf regionaler Ebene Daten über Qualität und Quantität anfallender Abfälle sowie für den Neubau benötigte Materialien vorhanden sein. Dadurch würde die Möglichkeit geschaffen kleinräumig Kreisläufe zu schließen und hohe Transportweiten zu vermeiden.

Der Fokus dieses Berichts wird deshalb auf eine Materialanalyse des Wohngebäudebestands in Nordrhein-Westfalen sowie auf die Entwicklung von Szenarien zu Stoffströmen dieses Systems in den nächsten Jahrzehnten gesetzt. Beide Komponenten sollen Aussagen darüber ermöglichen, mit welchen Massen in NRW zu rechnen ist. Diese Informationen können wiederum die Grundlage einer Strategieentwicklung bilden.

3 Wohngebäudebestand im Jahr 2021 in Gebäudezahlen

Für einen ersten Überblick und als Datengrundlage der folgenden Szenarien wird zuerst der aktuelle Wohngebäudebestand in NRW analysiert. Hierfür wurden einerseits Daten des Statistischen Bundesamts, andererseits Ergebnisse der Zensuserhebung aus dem Jahr 2011 genutzt.

Die Datenbank des Statistischen Bundesamts gibt die Anzahl der Wohngebäude in NRW zu jährlichen Stichtagen an und unterscheidet den Wohngebäudebestand in Gebäude mit einer bzw. zwei Wohnungen, sowie in Gebäuden mit „3 oder mehr Wohnungen“. 2021 wurden in NRW insgesamt 3.934.504 Wohngebäude erfasst, von denen 2.453.890 solche mit einer Wohnung waren (62 %), 656.036 solche mit zwei Wohnungen (17 %) und 824.578 solche mit drei oder mehr Wohnungen (21 %). 2021 wurden in NRW außerdem 16.019 neue Wohngebäude fertiggestellt und 628 Wohngebäude abgerissen.

Hinsichtlich der Qualität dieses Datensatzes muss angeführt werden, dass besonders die Anzahl der Gebäudeabgänge eher konservativ zu bewerten ist. Zwar gilt in NRW keine „Bagatellgrenze“ für die Anzeigepflicht des Abbruchs, sodass grundsätzlich alle Wohngebäudeabgänge angezeigt werden müssen, allerdings wird davon ausgegangen, dass besonders Wohnungsverluste nicht statistisch erfasst werden. Gründe dafür sieht die NRW-Bank (NRW.Bank, 2011) u. a. in nicht gemeldeten Zusammenlegungen von Wohnungen und der Zweckentfremdung von Wohnraum. Dies hat zur Folge, dass die Statistik dahingehend verfälscht wird und kritisch zu bewerten ist.

Neben den Daten des Statistischen Bundesamts, bilden die Zensusdaten den zum Erhebungszeitpunkt aktuellen Wohngebäudebestand nach Baujahren ab. Aus der aktuellsten Erhebung aus dem Jahr 2011 ist zu entnehmen, dass rund 23 % des Wohngebäudebestands durch Gebäude gestellt werden, die vor 1949 gebaut wurden. Die Gebäude aus den Zeiträumen 1950-59, 1960-69 sowie 1970-79 stellen jeweils rund 15 %, gefolgt von Gebäude aus den Jahren 1980-89 sowie 1990-99 mit jeweils nur 11 %. Die übrigen 10 % entfallen auf Gebäude, die nach 2000 erbaut wurden. Wendet man diese Verteilung auf die absoluten Zahlen aus dem Jahr 2021 an, ergibt sich das in **Abbildung 1** dargestellte Bild.

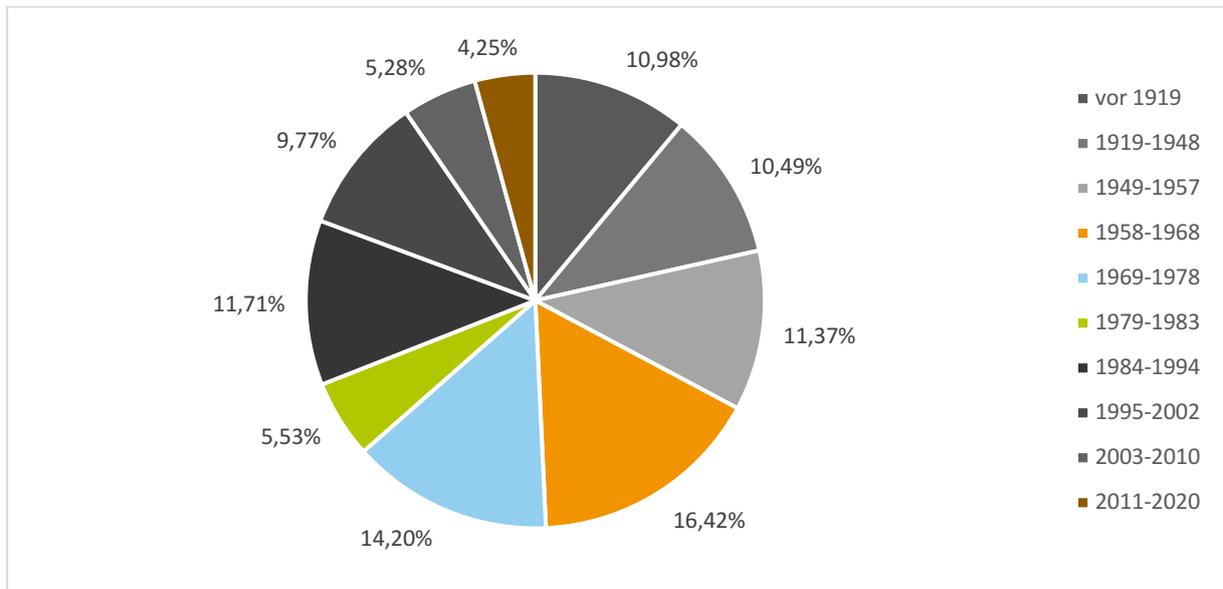


Abbildung 1: Wohngebäudebestand NRW im Jahr 2021 nach Baujahren

Für die Modellierung wurden die prozentualen Anteile aus dem Zensus 2011 übernommen, Abriss- und Neubauaktivitäten von 2011-2020 wurden darauf basierend miteinbezogen.

4 Das Wohngebäudemodell

4.1 Vorstellung des Wohngebäudemodells

Wie bereits dargestellt, ist es für die Kreislaufwirtschaft von besonderem Interesse, welche Materialien im Bestand verbaut sind und wie sich diese Menge über einen gewissen Zeitraum durch Bautätigkeiten verändert. Zur Modellierung dieser Mengen arbeitet die Abt. Kreislaufwirtschaft des Wuppertal Instituts mit einem selbst angelegten Wohngebäudemodell, das definierte Gebäudetypen mit Materialmengen verknüpft.¹

Die Datenbasis dieses Gebäudemodells stellt die Gebäudetypologie des Instituts Wohnen und Umwelt dar (Loga et al., 2015). Die IWU-Gebäudetypologie ist dabei grundsätzlich als Modell angelegt, das die energetische Betrachtung der Gebäude in den Vordergrund stellt. Allerdings weist sie ebenso typische Baumaterialien und -mengen der Gebäude nach bestimmten Zeitintervallen aus. So werden für die Intervalle 1919-48, 1949-57, 1958-68, 1969-78, 1979-83, 1984-94, 1995-2001, 2002-09, 2010-15 und ab 2016 jeweils typische Wohngebäude modelliert, wobei für jeden Zeitraum Bauweisen für Einfamilienhäuser, Doppel- bzw. Reihenhäusern sowie Mehrfamilienhäuser ausgewiesen werden. Die Gebäudetypologie des IWU dient dabei als Datengrundlage für die Gebäude mit den Baujahren vor 2010.

Für den Neubau ab 2010 wurden Modellierungen und Berechnungen aus dem Projekt DemRess II übernommen (Bierwirth & Wilts, in Veröffentlichung). Hierbei handelt es sich um eine vom Wuppertal Institut über Literaturrecherchen zusammengestellte, aktuelle Materialzusammensetzung, die den Neubau mit einem deutlich höheren Detailgrad darstellbar macht, als durch die Verwendung der IWU-Typologie. So kann im Neubau bspw. nicht nur nach den Wohngebäudetypen von Ein-, Mehrfamilien- und Reihenhäusern unterschieden, sondern auch verschiedene Bauweisen einbezogen werden. Hier konnte zwischen Massiv-, Leicht- und Holzbauweise differenziert werden. Hervorzuheben ist, dass im Neubau selbst in der Massivbauweise oft geringere Gesamtmengen an verbautem Material je Gebäude angenommen werden, als in Wohngebäuden früherer Baujahre. Grund hierfür ist bspw. die reduzierte Nutzung mineralischer Baustoffe und der verstärkte Einbau von Dämmmaterialien wie EPS, XPS und Mineralwolle die eine geringere Dichte in die Gebäudehülle aufweisen.

Die genutzten Materialien je Baualtersklasse wurden in das Gebäudemodell des Wuppertal Instituts übernommen und mit der Anzahl an Gebäuden in den jeweiligen Kategorien verknüpft. So kann bei bekanntem Wohngebäudebestand die Gesamtmenge an Baumaterialien in diesem Bestand anhand generischer Gebäude errechnet werden.

Dynamisiert wird diese Bestandsbetrachtung durch die Einbeziehung von Stoffflüssen in und aus dem Bestand in Form von Neubau-, Abriss-, Sanierungs- und Austauschaktivitäten. So können jährliche Zubau- und Abrissraten definiert und der Materialinput und -output für den Bezugsrahmen des

¹ Historisch bedingt gibt es noch weitere Gebäude-Modelle im Wuppertal Institut, die ähnlich wie das IWU-Modell vor allem helfen sollen, energetischen Fragen zu beantworten. An einer stärkeren Verknüpfung der Modelle wird derzeit gearbeitet. In dieser Studie wird sich immer auf das Gebäude-Modell der Abteilung Kreislaufwirtschaft am Wuppertal Institut bezogen.

Modells (z. B. einer Stadt oder dem Bundesland NRW) in Szenarien abgeschätzt werden. Gleiches gilt für die Sanierung. Für den Austausch von Bauteilen wurden diese in Form ihrer Materialkennziffern definiert und entsprechende Lebensdauern angenommen, nach denen ein Austausch nötig ist. Für den Zubau sind die entsprechenden Raten mit den Gebäudetypen ab dem Baujahr 2021 verknüpft, die Abrissraten dagegen mit den Gebäudetypen aus den Baujahren 1850 bis 2002. Die Sanierungsrate wird ebenfalls für Gebäude ab dem Baujahr 1850, jedoch nur bis einschließlich des Clusters mit Baujahr bis 1983 angenommen. Die Annahmen, die hinter dieser Entscheidung stehen, werden im nachfolgenden Abschnitt „Getroffene Annahmen im Wohngebäudemodell“ erläutert.

4.2 Getroffene Annahmen im Wohngebäudemodell

Als Basis des Gebäudemodells des Wuppertal Instituts müssen die Bestandszahlen des Wohngebäudesektors angegeben werden. Hierfür wurde auf die bereits vorgestellten Statistiken der Zensuserhebung 2011² und des Statistischen Bundesamts zurückgegriffen. Diese Daten wurden zusammengeführt, um sie innerhalb Gebäudemodell nutzbar machen zu können, da das Modell sowohl in Altersklassen als auch Gebäudetypen wie Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhäuser unterscheiden kann. Diese Zusammenführung wurde mithilfe bereits bestehender Daten aus früheren Modellierungen des Wuppertal Instituts in NRW auf regionaler Ebene durchgeführt.

Um im Gebäudemodell außerdem Zubau, Abriss und Sanierung mit den jeweiligen Materialmengen abbilden zu können, müssen hier Annahmen zu möglichen Zubau-, Abriss- und Sanierungsraten getroffen werden. Bei den Prognosen wurde sich allgemein auf die Annahmen aus dem UBA-Berichts „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“ (S. 164 f.) (Bürger et al., 2017) orientiert, der unter Berufung auf verschiedene Studien folgende Annahmen im deutschlandweiten Kontext trifft: Die Abgangsrate für Wohngebäude wird bis 2050 konstant mit 0,3 % pro Jahr bezogen auf die gesamte Wohnfläche des Vorjahres angenommen. Die Neubaurate wird dagegen für das Jahr 2015 mit ca. 0,85 % bezogen auf die gesamte Wohnfläche des Vorjahres angenommen, sinkt jedoch bis 2050 stetig bis auf 0,2 % pro Jahr ab. Da sich diese Raten jedoch auf die Wohnflächen beziehen, können sie nicht ohne Weiteres in das Wohngebäudemodell übertragen werden, da sich die Zubau- und Abgangsraten dort auf die Anzahl der Gebäude beziehen. Allerdings geben die Raten des UBA eine Orientierung dafür, wie sich die prozentualen Zugangs- und Abgangsraten bis 2050 relativ verändern werden.

4.2.1 Abrissrate

Der tatsächliche Abgang von Wohngebäuden in NRW im Jahr 2021 lag laut Statistik der Bauabgänge bei 628 Gebäude mit insgesamt 162.400 m² Wohnfläche. Dies entspricht einer Abgangsrate von 0,02 % bezogen auf die Wohnfläche und auf die Gebäudezahl des Vorjahrs. Damit liegt die tatsächliche Abgangsrate in NRW weit unter der von Bürger et al. (2017) angenommenen Rate. Gründe hierfür könnten die möglicherweise stark unterschätzten Abgangszahlen in der Statistik sein, die durch eine fehlende Anzeigepflicht für Gebäudeabgänge zu begründen ist. Allerdings legen auch weitere Quellen dar, dass die tatsächliche Abgangsrate unter der von Bürger et al. (2017) angenommenen Rate liegt. Thamling et al. (2022) gehen davon aus, dass aktuell in Deutschland eine Abrissrate von 0,1 % für Ein- und Zweifamilienhäuser bezogen auf den Gesamtwohnungsbestand vorherrscht, die bis 2050 auf

² Eine neue Zensuserhebung mit aktualisierten Daten zum Wohngebäudebestand wird in Kürze von Destatis veröffentlicht. Diese Daten werden im Modell dann entsprechend aktualisiert werden.

0,2 % ansteigen wird. Für Mehrfamilienhäuser wird mit einem Anstieg auf 0,25 % gerechnet. Jochum et al. (2015) leiten ihre Annahmen zu Abgangsraten über eine vorgegebene Neubaurate und den sich durch die Bevölkerungsentwicklung ergebenden Gesamtflächenbedarf ab, woraus sich auch hier ein Verlauf der Abgangsrate ergibt, der von aktuell rund 0,1 % auf leicht über 0,4 % im Jahr 2045 ansteigt. Diese Auflistung zeigt, dass eine große Unsicherheit bei der Festsetzung der Abgangsrate besteht. Der konstant angenommene Wert von Bürger et al. (2017) kann somit eher als Mittelwert gewertet werden, der in das Modell übernommen wird.

Die Abbruchrate von 0,3 % bezieht sich dabei ausschließlich auf Gebäude mit den Baujahren ab 1949 bis 2002, wobei zu Beginn des Betrachtungszeitraums bis 2030 davon ausgegangen wird, dass ausschließlich Gebäude mit Baujahr zwischen 1949 und 1978 abgerissen werden – entlang des Betrachtungszeitraums bis 2060 werden dann in einem Abstand von 10 Jahren schrittweise die jeweils neueren Gebäudecluster in den Abriss miteinbezogen. Hintergrund ist hier die Annahme, dass die Gebäude frühestens nach einer Lebensdauer von 50 Jahren abgerissen werden. Mit voranschreitender Jahreszahl wird die Abrissrate künftig auf immer mehr Gebäudecluster angewendet. Für Gebäude mit Baujahr vor 1949 wird konstant eine verringerte Abrissrate von 0,05 % angenommen. Diese Annahme wurde getroffen, da für Wohngebäude mit diesen Baujahren zwar angenommen werden muss, dass sie zum Teil abgerissen werden, jedoch z.B. unter Beachtung von Aspekten des Denkmalschutzes davon auszugehen ist, dass die Abrissrate hier deutlich geringer ist als bei Gebäuden mit Baujahr ab 1949. Eine Übersicht über die angenommenen Abgangsraten mit entsprechenden Gebäudeclustern, auf die sich angewendet werden, ist in **Tabelle 1** zu sehen.

Tabelle 1: Übersicht zu angenommenen Abgangsraten je Cluster über den Betrachtungszeitraum

Betrachtungsintervall	Gebäudecluster, auf die die Abgangsrate von 0,05 % angewendet wird	Gebäudecluster, auf die die Abgangsrate von 0,3 % angewendet wird
2020-2029	1850-1948	1949-1978
2030-2039	1850-1948	1949-1983
2040-2049	1850-1948	1949-1994
2050-2059	1850-1948	1949-2002

4.2.2 Zubaurate

Für die Zubaurate werden folgende Überlegungen angestellt: Der tatsächliche, statistisch erfasste Zubau von 16.019 Gebäuden und 4.323.800 m² im Jahr 2021 in NRW entspricht einer Zubaurate von 0,41 % bezogen auf die Wohngebäudezahl des Vorjahrs, bzw. 0,54 % bezogen auf die gesamte Wohnfläche des Vorjahrs. Für die Modellierung wird die Zubaurate bezogen auf die Wohngebäudeanzahl von 0,41 % festgelegt. Für das Szenario wird unterstellt, dass die Zubaurate bis zum Jahr 2060 linear auf etwa 0,2 % pro Jahr absinkt, gemäß des durch Bürger et al. (2017) unterstellten Trends.

Für den Neubau wird außerdem eine Unterteilung in Massiv-, Leicht- und Holzbauweise vorgenommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg Einfamilien- und Reihenhäuser zu 75 % in Massivbauweise gefertigt werden, zu 5 % in

Leichtbauweise und zu 20 % in Holzbauweise. Die Mehrfamilienhäuser sollen zu 75 % in Massiv- und zu 25 % in Leichtbauweise gefertigt sein. Hierbei wurde sich auf die tatsächlichen Raten der Bauweisen in Deutschland bezogen, wo Holzbau besonders bei Einfamilien- und Reihenhäusern eine Rolle spielt, im Bereich des mehrstöckigen Mehrfamiliengebäudebereich jedoch aktuell meist nur im Rahmen von Leuchtturmprojekten realisiert wird.

4.2.3 Sanierungsrate

Für die Sanierung wird davon ausgegangen, dass eine Sanierungsrate von 1 % im Jahr 2022 bezogen auf den Bestand des Vorjahrs umgesetzt wurde, dieser aber bis 2060 auf rund 2 % ansteigt. Außerdem wird davon ausgegangen, dass bereits zu Beginn des Betrachtungszeitraums im Jahr 2021 25 % der Wohngebäude in NRW energetische saniert sind. Die Sanierungsrate wird ausschließlich auf die Gebäudecluster bis zum Baujahr 1983 angewendet, da davon ausgegangen wird, dass neuere Gebäude innerhalb des Betrachtungszeitraums noch keiner grundlegenden Sanierung unterzogen werden müssen, da sie die geforderten energetischen Vorgaben bereits erfüllen.

4.2.4 Austausch von Bauteilen

Neben den bereits beleuchteten Annahmen zu Abriss-, Zubau- und Sanierungsraten besteht im Modell außerdem die Möglichkeit, einzelnen Bauteilen eine Lebensdauer zuzuordnen, nach der ein Austausch stattfindet. Hintergrund der Annahme, dass für einzelne Bauteile ein Austausch zu modellieren ist, ist, dass davon auszugehen ist, dass die Bausubstanz eines Wohngebäudes eine deutlich höhere Lebensdauer hat als einzelne Bauteile. Besonders Türen, Fenster, Dämmung und Heizgeräte können dabei mit relativ geringem technischem, zeitlichem und ökonomischem Aufwand bei fortlaufender Nutzung des Gebäudes ausgetauscht werden, weshalb diese im Modell für den Austausch vorgesehen sind. Die angesetzten Lebensdauern der Bauteile ergeben sich wie folgt: 30 Jahre für Türen, 45 Jahre für Fenster, 50 Jahre für Dämmungen und 20 Jahre für Heizgeräte. Diese Lebensdauern sind individuell anpassbar. In Vergleich zur energetischen Sanierung ist die Bautätigkeit des Austauschs von Bauteilen dadurch abzugrenzen, dass hier ausschließlich ein Austausch durch gleiche Materialienzusammensetzungen und -mengen angenommen wird, während bei der energetischen Sanierung die Materialzusammensetzungen der Gesamtgebäude gänzlich verändert wird. Das Modell unterscheidet dabei jedoch, ob die auszutauschenden Bauteile in einem sanierten oder noch unsanierten Gebäude verbaut sind. Bei bereits sanierten Gebäuden wird im Austausch der Bauteile eine identische Materialzusammensetzung und -masse für den Input und Output angenommen. Handelt es sich dagegen um ein noch unsaniertes Wohngebäude, werden folgende Annahmen unterstellt: ausgebaut werden hier die ursprünglich verbauten Bauteile mit ihren jeweiligen Materialzusammensetzungen, bspw. handelt es sich hier noch um Fenster mit Einfachverglasung. Getauscht werden diese jedoch durch Bauteile, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen, bspw. zweifachverglaste Fenstern, gleiches gilt für Türen und Heizkessel. Dämmmaterialien werden dagegen erst dann als Austauschmaterial angenommen, wenn eine energetische Sanierung bereits durchgeführt wurde.

Hintergrund dieser Annahmen ist, dass bei einem Austausch von Bauteilen auf die aktuellsten Technologien zurückgegriffen wird, eine komplette Neudämmung eines Gebäudes jedoch eher im Rahmen einer energetischen Sanierung durchgeführt werden wird.

5 Wohngebäudebestand und dessen Veränderungen bis 2060 in Gebäudezahlen

Im Jahr 2021 gab es 3.934.504 Wohngebäude in NRW. Den größten Anteil stellten dabei Wohngebäude mit 21 %, die zwischen 1850 und 1948 erbaut wurden. Den zweitgrößten Anteil machten Gebäude aus den 60er-Jahren aus (16 %), gefolgt von den 70er-Jahren mit 14 %.

Die Unterscheidung nach Häusertypen ergibt, dass 46 % der Häuser Einfamilienhäuser waren, 23 % Mehrfamilienhäuser, 17 % Reihenhäuser und 14 % Großsiedlungen/Hochhäuser.

Unter Beachtung der sinkenden Zubaurate und konstanten, jedoch auf eine größer werdende Anzahl an Gebäuden bezogene Abbruchrate bis 2060 wird sich, wie in Abbildung 2 zu sehen, ab dem Jahr 2029 ein negativer Saldo im Zubau von Wohngebäuden einstellen – es werden also mehr Gebäude abgerissen als neu gebaut.

Akkumuliert werden im Zeitraum von 2022 bis 2060 rund 464.000 Gebäude neu zugebaut werden, während rund 692.000 Gebäude abgerissen werden. Insgesamt beläuft sich der Wohngebäudebestand im Jahr 2060 auf 3,71 Millionen Gebäude. Im Jahr 2029 wird die Anzahl der Wohngebäude ihr Maximum erreichen und in NRW voraussichtlich bei 3,95 Millionen Gebäuden liegen.

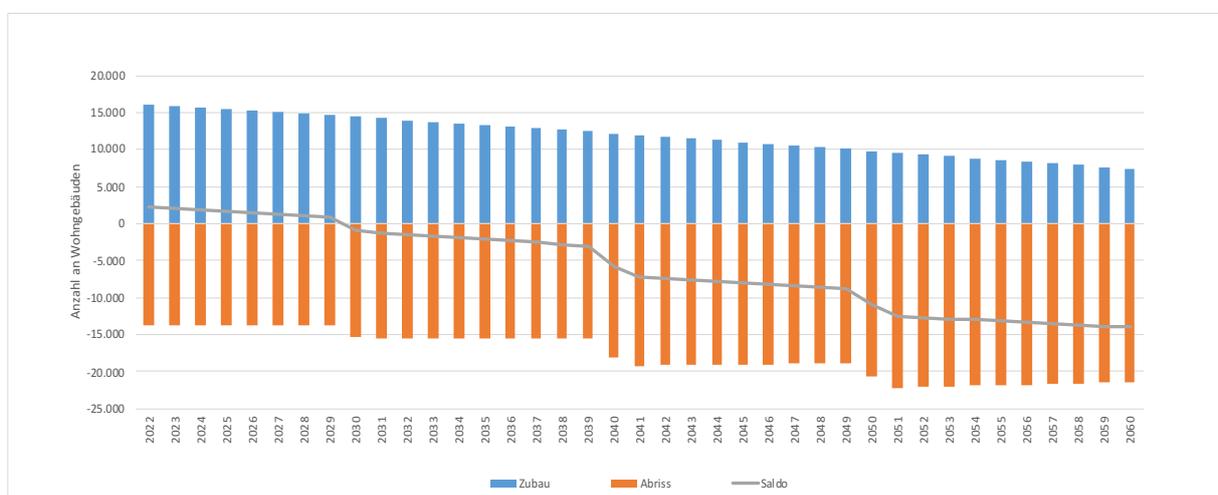


Abbildung 2: Zubau- und Abbruchszenario 2022-2060 mit Saldo

In **Abbildung 3** ist der Wohngebäudebestand in NRW für die Jahre 2022 bis 2060 aufgetragen. Unterschieden wird hier nachfolgenden, übergeordneten Baujahresintervallen:

- (1) Gebäude der Vorkriegszeit bis 1948, für die die konstante, verringerte Abrissrate von 0,05% angenommen wurden,
- (2) Gebäude der Baujahre 1949-1978, für die die konstante Abrissrate von 0,3% angewendet wurde,
- (3) Gebäude der Baujahre 1979-2002, die innerhalb des Betrachtungszeitraums zur Gruppe der abzureißenden Gebäude hinzukommen und auf die ebenfalls die Abrissrate von 0,3% angewendet wird,
- (4) Gebäude der Baujahre 2003-2021, für die weder ein Abriss noch Zubau erfolgt, sowie
- (5) Gebäude ab dem Jahr 2022, für die eine linear sinkende Zubaurate und keinerlei Abrisse angenommen wurde.

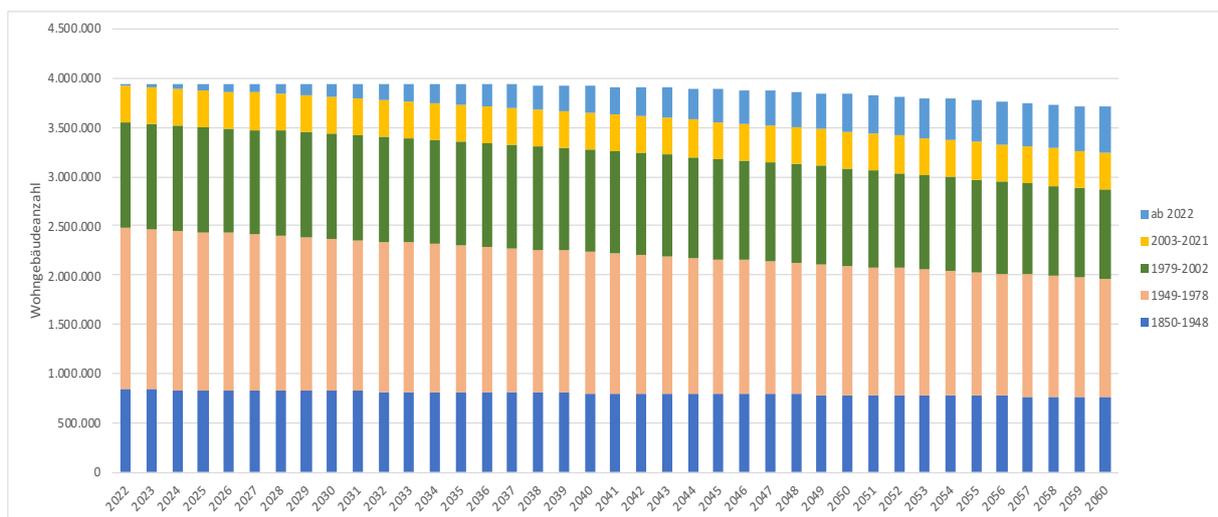


Abbildung 3: Wohngebäudebestand Szenario 2022-2060 nach Baujahren

6 Veränderungen des Wohngebäudebestands als Materiallager bis 2060

Für den Wohngebäudebestand im Jahr 2021 ergibt sich eine Gesamtmasse der Materialien von rund 4.424 Millionen Tonnen, die sich wie in **Abbildung 4** abgebildet auf die Hauptmaterialgruppen aufteilen. Materialgruppen, die weniger als 0,1% zur gesamten Materialmenge beitragen, werden nicht einzeln in der Abbildung aufgeführt, sondern zu „Sonstiges“ gezählt. Beton ist hier als Hauptbestandteil der Gebäudehülle zu erkennen. Dieser wird in Gebäuden als bevorzugtes Material für Fundamente und Kellerwände über alle Altersklassen hinweg eingesetzt. Kalksandstein und Bimsbeton sind im Modell typische Baustoffe für Außen- und Innenwände. Je nach Altersklasse werden reine Bimsbeton- oder Kalksandsteinbauweisen oder Mischformen modelliert. Strohlehm wird im Modell für Mehrfamilienhäuser mit Baujahr vor 1994 als Bestandteil von Außen- und Innenwänden angenommen.

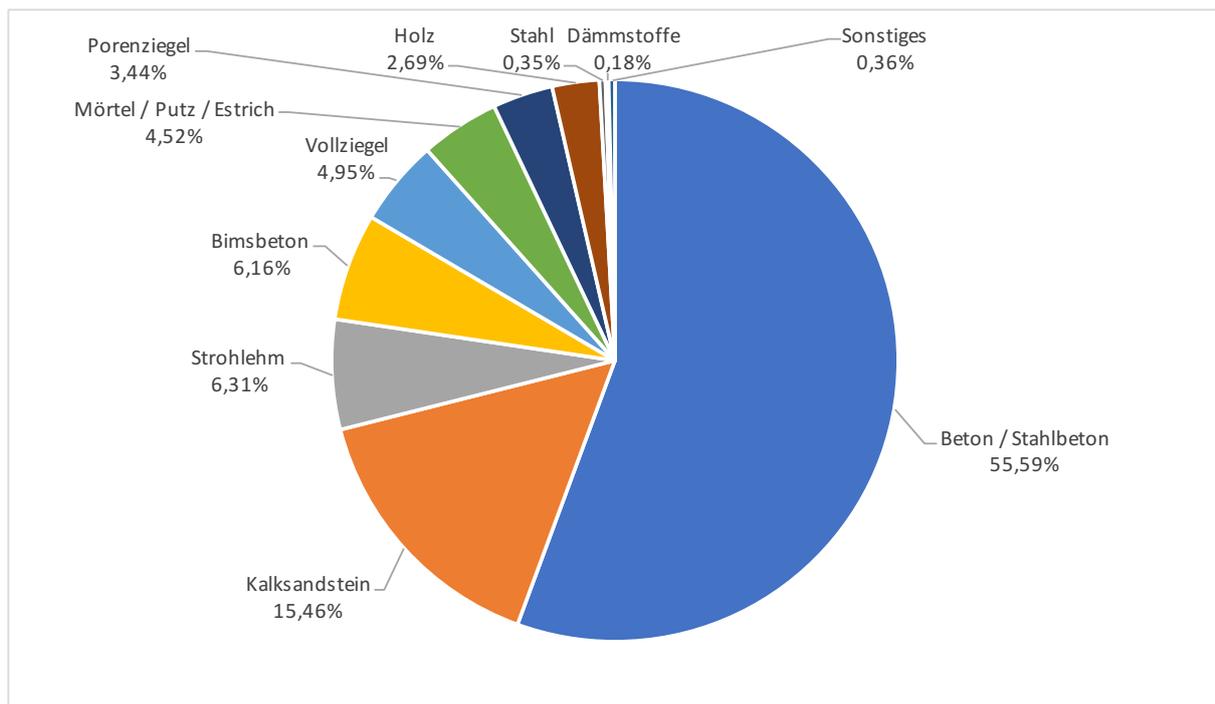


Abbildung 4: Verteilung der Hauptmaterialien des Wohngebäudebestands (2021)

6.1 Materialströme der Abrissaktivitäten

Über den Betrachtungszeitraum von 2022 bis 2060 fallen durch den Abriss jährlich die in **Abbildung 5** aufgetragenen Massen an.

Hier ist zu erkennen, dass über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg insgesamt ein Anstieg der Abfallmengen zu verzeichnen ist. Dabei sind klare Stufen zu erkennen, die auf die schrittweise steigende Gesamtzahl an abzureißenden Wohngebäuden im Verlauf zurückzuführen sind. Innerhalb der Stufen fallen die Abfallmengen dann leicht ab. Im Jahr 2022 fallen insgesamt rund 22 Millionen Tonnen Abfall an, im Jahr 2060 fast 27 Millionen Tonnen. Das Maximum liegt im Jahr 2051 bei 27,7 Millionen Tonnen jährlich anfallendem Abbruchmaterial.

Im Jahr 2060 sind die massenmäßig relevantesten Materialien Beton mit 55 %, Kalksandstein mit 17 %, Bimsbeton (7 %) und Strohlehm (6 %). Die prozentuale Zusammensetzung der Abbruchmaterialien verändert sich über den Betrachtungszeitraum leicht, da unterschieden wird, ob es sich bei den abgerissenen Wohngebäuden um bereits sanierte Gebäude handelt oder nicht. Dadurch verändern sich über den Betrachtungszeitraum hinweg teilweise die Materialzusammensetzungen der Wohngebäude. Jedoch sind auch im Jahr 2022 die massenmäßig relevantesten Abfallstoffe Beton (52 %), Kalksandstein (17 %) und Bimsbeton (9 %) und Strohlehm (8 %).

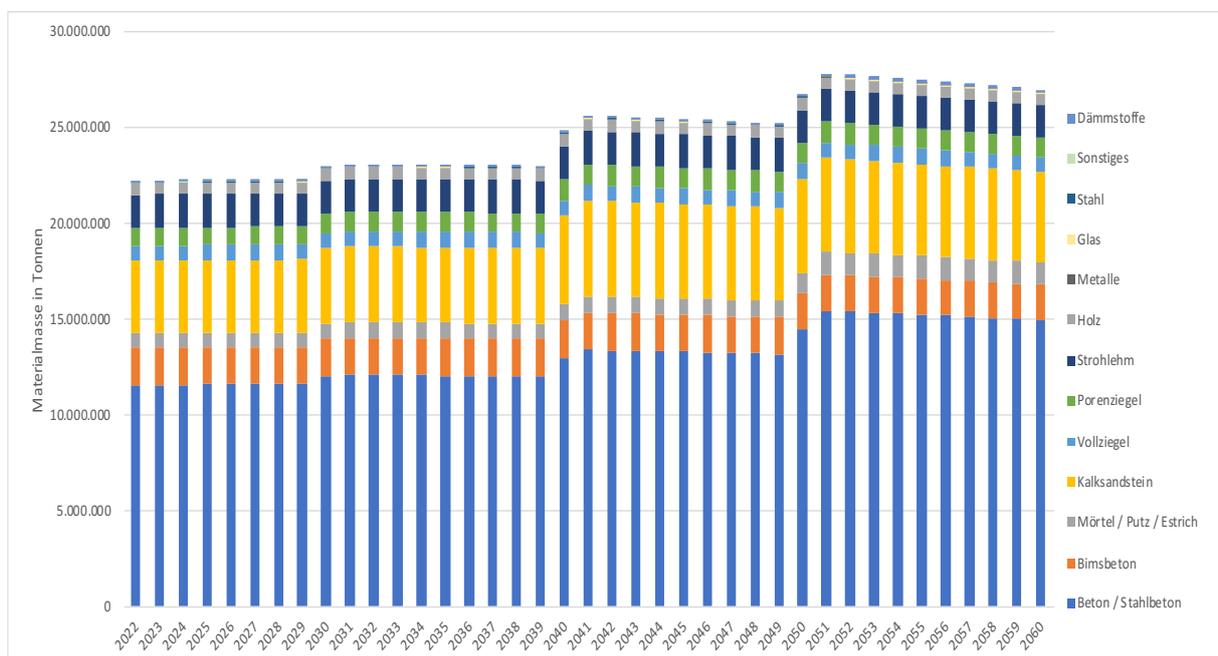


Abbildung 5: anfallende Materialmasse aus dem Abruch im Zeitraum 2022-2060 (insgesamt)

Insgesamt werden 2060 durch den Abriss auch bereits sanierter Gebäude u.a. mehr Dämmstoffe und Glas als Abfallstoffe anfallen (**vgl. Abbildung 6**). Grund hierfür sind die Materialzusammensetzungen der abgerissenen Gebäude. Innerhalb des Betrachtungszeitraums wird die Abrissrate auf eine immer größere Menge an Gebäuden angewendet, wobei besonders ab 2051 auch Gebäude abgerissen werden, bei denen davon ausgegangen wurde, dass bereits Dämmstoffe und doppelverglaste Fenster

verbaut wurden. Daher werden besonders ab 2050 verstärkt auch diese Materialgruppen aus dem Abriss anfallen.

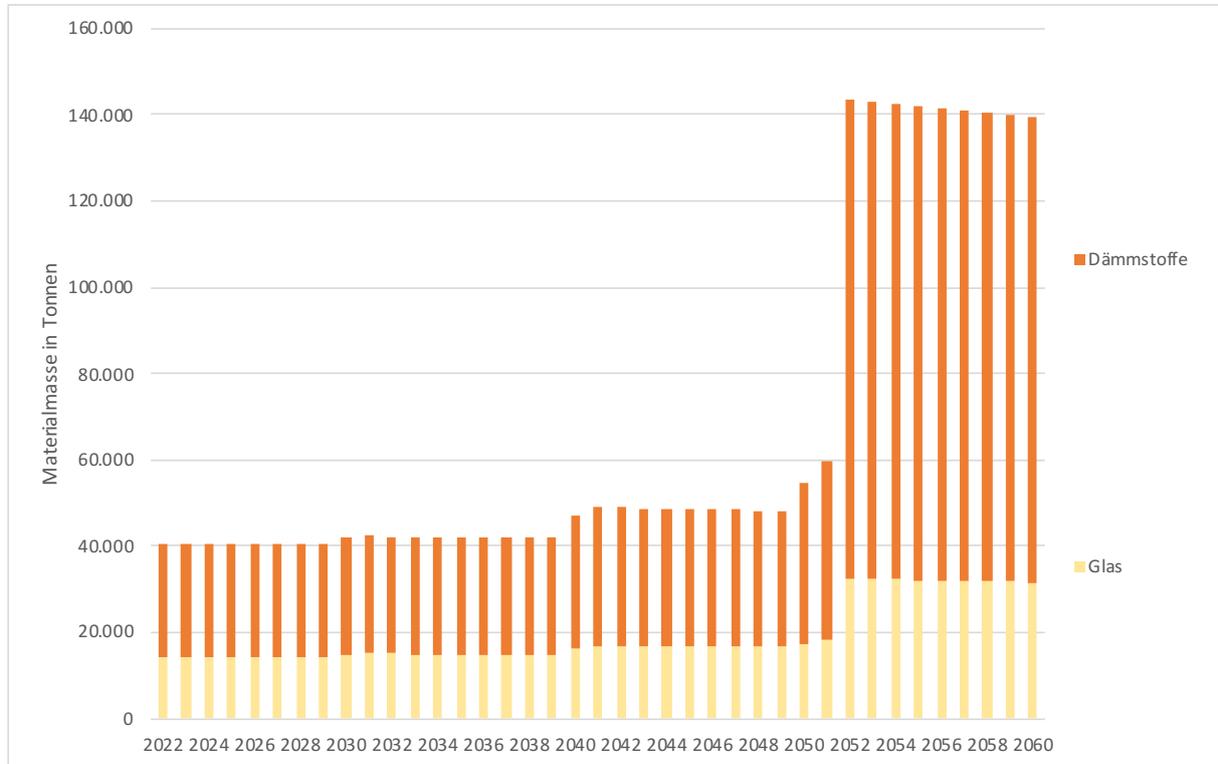


Abbildung 6: anfallende Materialmasse aus dem Abbruch im Zeitraum 2022-2060 (Glas und Dämmstoffe)

6.2 Materialströme des Neubauaktivitäten

Durch den Zubau fließen die in **Abbildung 7** abgebildeten Materialmengen über den Betrachtungszeitraum hinweg in das System hinein.

Hier sinken die jährlichen Materialmassen bis 2060 durch die linear sinkend modellierte Zubaurate ab. Im Jahr 2022 wird davon ausgegangen, dass insgesamt ca. 12,3 Millionen Tonnen Material für den Zubau benötigt werden, für 2060 wird ein Bedarf von lediglich etwa 5,7 Millionen Tonnen vorhergesagt. Dies entspricht einem Rückgang um 54 %. Die Zusammensetzung der benötigten Materialien bleibt jedoch auch hier über den gesamten Betrachtungszeitraum gleich. Die wichtigsten Materialgruppen sind dabei Beton (65 %), Mörtel/Putz/Estrich (15 %) und Vollziegel (7 %).

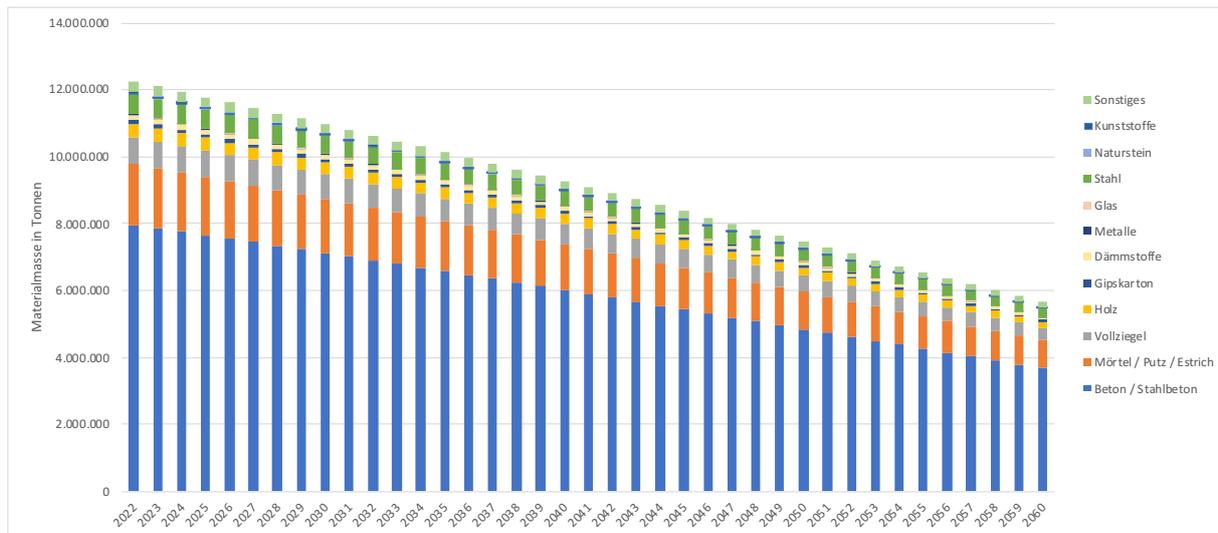


Abbildung 7: benötigte Materialmasse für den Neubau im Zeitraum 2022-2060

6.3 Materialströme der Sanierungsaktivitäten

Neben Abriss und Neubau kann im Modell außerdem eine einmalige energetische Sanierung der Bestandgebäude modelliert werden. Diese beinhaltet

- den Austausch bestehender, oft nur einfachverglaster Holzfenster durch zweifachverglaste Fenster mit Kunststoffrahmen,
- den Austausch bestehender Holztüren durch Aluminiumtüren,
- die Installation von Dämmungen (WDVS) an den Außenwänden, Kellerdecke und obersten Geschossdecke/Dach, sowie
- den Austausch bestehender Heizgeräte, oft Gasbrennwertkessel, durch Wärmepumpen.

Durch die energetische Sanierung fließen die in **Abbildung 8** abgebildeten Materialmengen über den Betrachtungszeitraum hinweg in das System hinein.

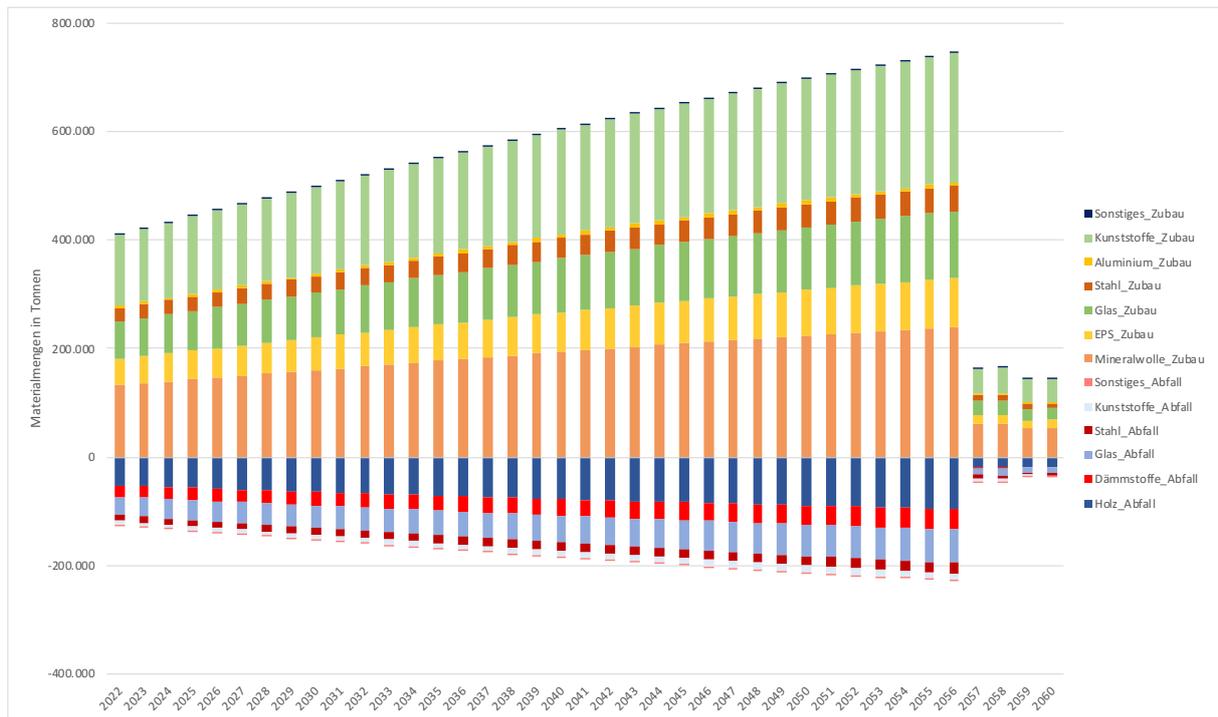


Abbildung 8: Materialmengen durch energetische Sanierung im Zeitraum 2022-2060

Es ist erkennbar, dass der Input an Materialien durch die energetische Sanierung den Output weit überschreitet, was mit dem Einbau einer Vielzahl neuer Materialien, besonders Dämmstoffen zu erklären ist. Über den Betrachtungszeitraum hinweg steigen sowohl die jährlich anfallenden Materialmengen des Abfalls als auch des Zubaus bis 2056 an. Danach ist ein deutlicher Einschnitt in der Graphik zu erkennen. Dieser lässt sich durch die Annahme erklären, dass im Modell davon ausgegangen wird, dass ein Gebäude innerhalb seines Lebenszyklus nur einmal energetisch saniert wird. Unter der Annahme, dass zu Beginn des Betrachtungszeitraums bereits 25 % des Wohngebäudebestands energetisch saniert ist, fallen über den Betrachtungszeitraum bis 2060 so immer mehr Gebäudecluster aus der energetischen Sanierung raus, wenn dort schon alle vorhandenen Gebäude saniert wurden. So ergibt sich, dass ab 2056 alle Gebäude mit Baujahr zwischen 1949 und 1978 bereits saniert sind. Im Jahr 2059 fällt auch das Cluster mit Baujahr von 1978 bis 1983 aus der Betrachtung raus, sodass ausschließlich bei Gebäuden mit Baujahr vor 1949 weiter energetische Sanierungen durchgeführt werden. Wie aus Abbildung 1 zu erkennen ist, handelt es sich dabei um das Cluster, das die meisten Wohngebäude innerhalb des Bestands stellt.

2022 fallen insgesamt rund 125.000 Tonnen Material als Abfall an, 2056 dann 226.000 Tonnen, wobei der massenmäßig relevanteste Anteil hier durch Holz (42 %), Glas (27 %) und Dämmstoffe (17 %) gestellt wird. Die neu eingebauten Materialien belaufen sich im Jahr 2022 auf eine kumulierte Masse von 285.000 Tonnen, 2056 dann auf 518.000 Tonnen. Damit über steigen die neu benötigten Materialmassen die anfallenden Abfallmassen um rund 230 %. Die zugebauten Materialmassen bestehen dabei größtenteils aus Mineralwolle (32 %), Kunststoff (32 %) und Glas (17 %). Die eingesetzten Dämmstoffe, Mineralwolle und EPS, tragen zusammen sogar 44 % bei.

6.4 Materialströme durch den Austausch von Bauteilen

Als letzte im Modell darstellbare Materialströme sollen hier außerdem diejenigen in den Fokus genommen werden, die durch den Austausch von bestimmten Bauteilen nach ihrer Lebensdauer induziert werden. In **Abbildung 9** ist hierzu der jährliche Anfall bzw. Bedarf von Material im Input und Output durch diese Bautätigkeit innerhalb des Betrachtungszeitraums dargestellt.

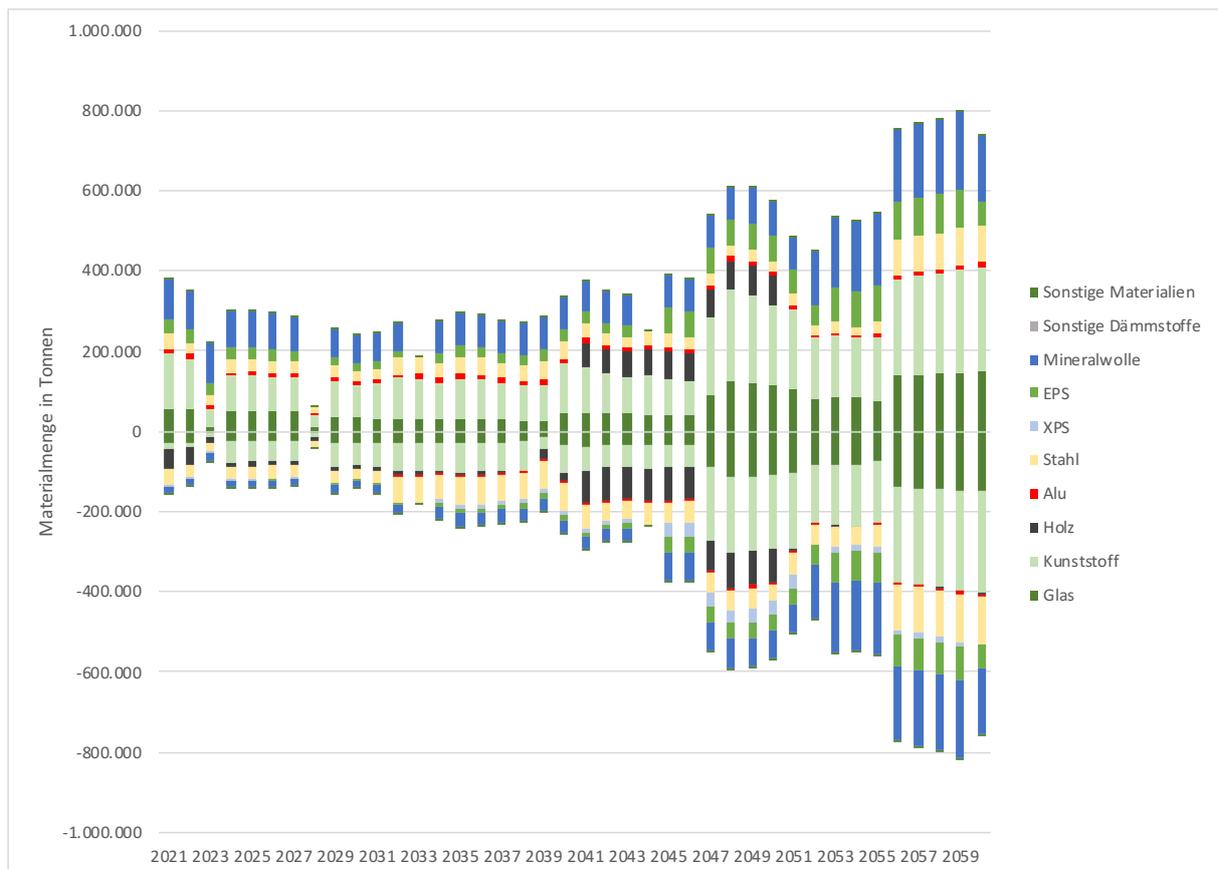


Abbildung 9: Materialmassen durch Austausch von Bauteilen im Zeitraum 2021-2060

Auffällig ist hier, dass zu Beginn des Betrachtungszeitraums die Materialmengen des Inputs die des Outputs teilweise stark übersteigen als auch in ihrer Zusammensetzung unterscheiden, während sie zum Ende des Betrachtungszeitraums hin eher übereinstimmen.

Die Veränderungen in den Materialzusammensetzungen und -mengen ergeben sich aus der Unterscheidung, ob es sich bei den Wohngebäuden, bei denen ein Austausch stattfindet, um ein bereits saniertes oder noch unsaniertes Gebäude handelt. Nähere Details hierzu findet sich unter Abschnitt 3.4.2. Dabei liegen besonders am Anfang des Betrachtungszeitraums noch eine Vielzahl unsanierter Wohngebäude im Bestand vor, weshalb hier die Differenzen deutlich höher sind. Durch die abnehmende Anzahl an unsanierten Bestandsgebäuden bis 2060 gleichen sich die Zahlen aus Input und Output zunehmend an.

Die Tendenz der immer höher werdenden Gesamtmassen sowohl im Input als auch im Output, lässt sich dadurch erklären, dass immer größere Materialmengen in den bereits sanierten Gebäuden vorliegen, die bei einer Bautätigkeit ausgetauscht werden müssen. Außerdem konnte in Abbildung 8 gezeigt werden, dass die energetische Sanierung ab 2056 nur noch eine sehr geringe Materialmasse induziert und dies sowohl im Bedarf als auch im Abfallaufkommen. Grund hierfür war, dass davon ausgegangen wird, dass ein Gebäude innerhalb seiner Nutzungsdauer nur einmal energetische saniert wird. In Abbildung 9 ist wiederum zu sehen, dass genau ab diesem Zeitpunkt der Austausch von Bauteilen als Bauaktivität eine immer größere Rolle spielt.

Die immer wieder zu sehenden Einschnitte in der eher zunehmenden Trendlinie der Materialien in Abbildung 9 begründen sich durch die angenommenen Lebensdauern der Bauteile und einzelnen Jahren, in denen nur in einzelnen Gebäudecluster ein Austausch bestimmter Bauteile angenommen wird.

6.5 Zusammenführung der Veränderungen durch energetische Sanierung und Austausch von Bauteilen

Betrachtet man die Massen der energetischen Sanierung zusammen mit denen des Austauschs von Bauteilen, ergibt sich **Abbildung 10**.

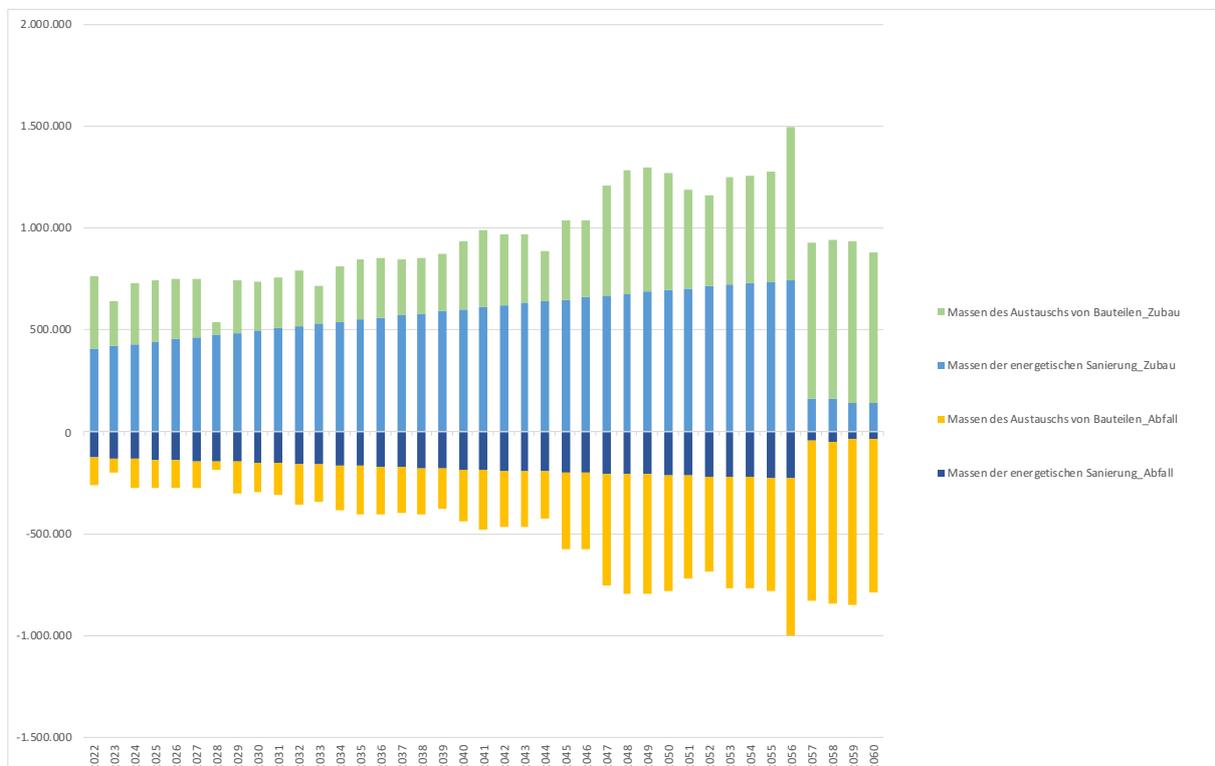


Abbildung 10: Gemeinsame Betrachtung von Massen der energetischen Sanierung und des Austauschs von Bauteilen

Insgesamt ist hier in den Abfällen ein fast durchgängig positiver Trend bis 2060 zu erkennen mit einem Maximum von knapp einer Millionen Tonnen im Jahr 2056. Dabei handelt es sich jedoch um einen

Ausreißer nach oben, die Trendlinie der vorhergehenden Jahre scheint sich danach weitestgehend fortzusetzen. Bei den zugebauten Materialien ist zu erkennen, dass der Einschnitt, der durch das Ende der Sanierungstätigkeiten im Jahr 2056, nicht vollständig durch die Materialmengen des Austauschs von Bauteilen kompensiert wird. Hier liegt das Maximum ebenfalls im Jahr 2056 bei 1,5 Millionen Tonnen Material und fällt danach in einer Stufe zurück auf rund 900.000 Tonnen.

Die einzelnen Einschnitte in der Linie der Materialien aus dem Austausch von Bauteilen, die bereits in Abschnitt 5.4 thematisiert wurden, sind auch in Abbildung 10 noch zu erkennen, jedoch verlieren sie durch die Auffüllung mit Materialien der energetischen Sanierung an Bedeutung.

Genauere Aufschlüsselungen der Materialien sind in **Abbildung 11** und **Abbildung 12** zu sehen.

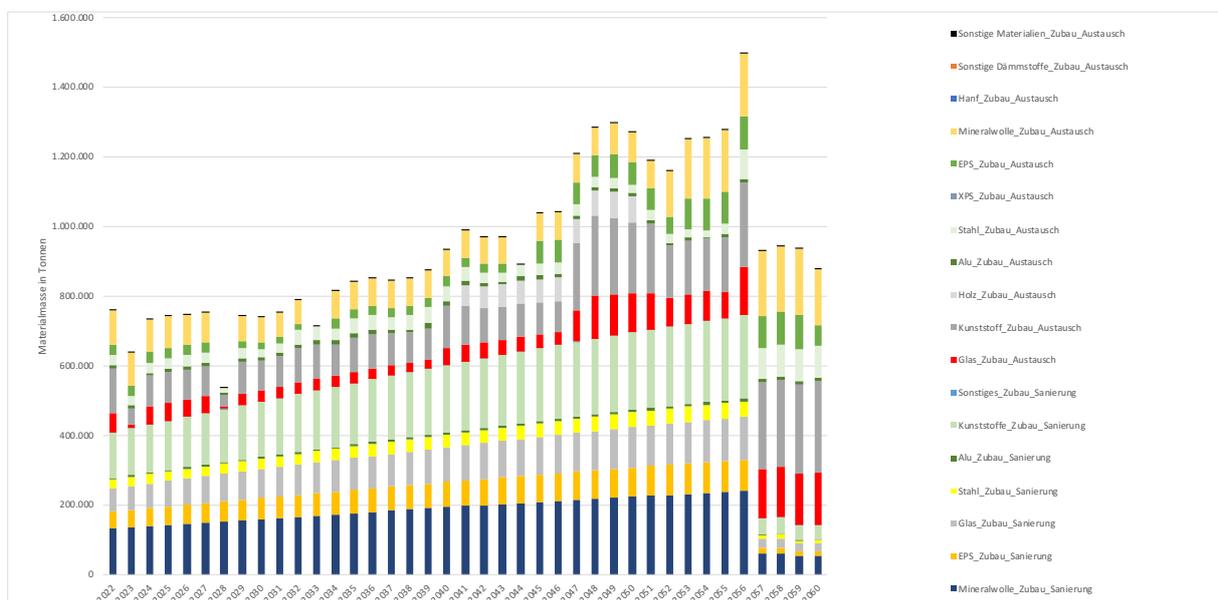


Abbildung 11: Neu benötigte Materialmassen aus energetischer Sanierung und Austausch von Bauteilen

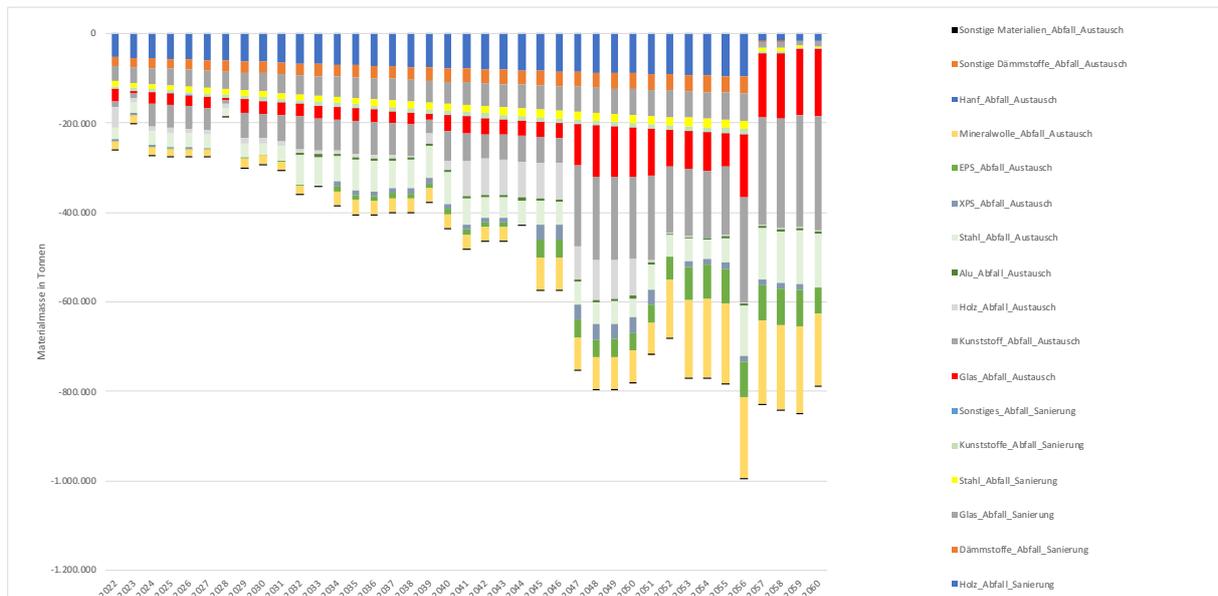


Abbildung 12: Anfallende Abfälle durch die energetische Sanierung und den Austausch von Bauteilen

In **Abbildung 13** ist außerdem ein Überblick über die Materialgruppen insgesamt gegeben. Hier wurden in der jeweiligen Materialgruppe die Massen der energetischen Sanierung und die aus dem Austausch von Bauteilen addiert und gemeinsam aufgetragen. Zu erkennen ist dabei, dass sich trotz des Wegfalls der Bauaktivitäten der energetischen Sanierung ab dem Jahr 2056 die Zusammensetzungen der Gesamtmasse aus energetischer Sanierung und Austausch von Bauteilen nicht signifikant verändert. Die Massen, die durch die energetische Sanierung Wegfallen werden demnach nicht direkt in reiner Menge, jedoch nach Zusammensetzung durch den Austausch der modellierten Bauteile ersetzt.

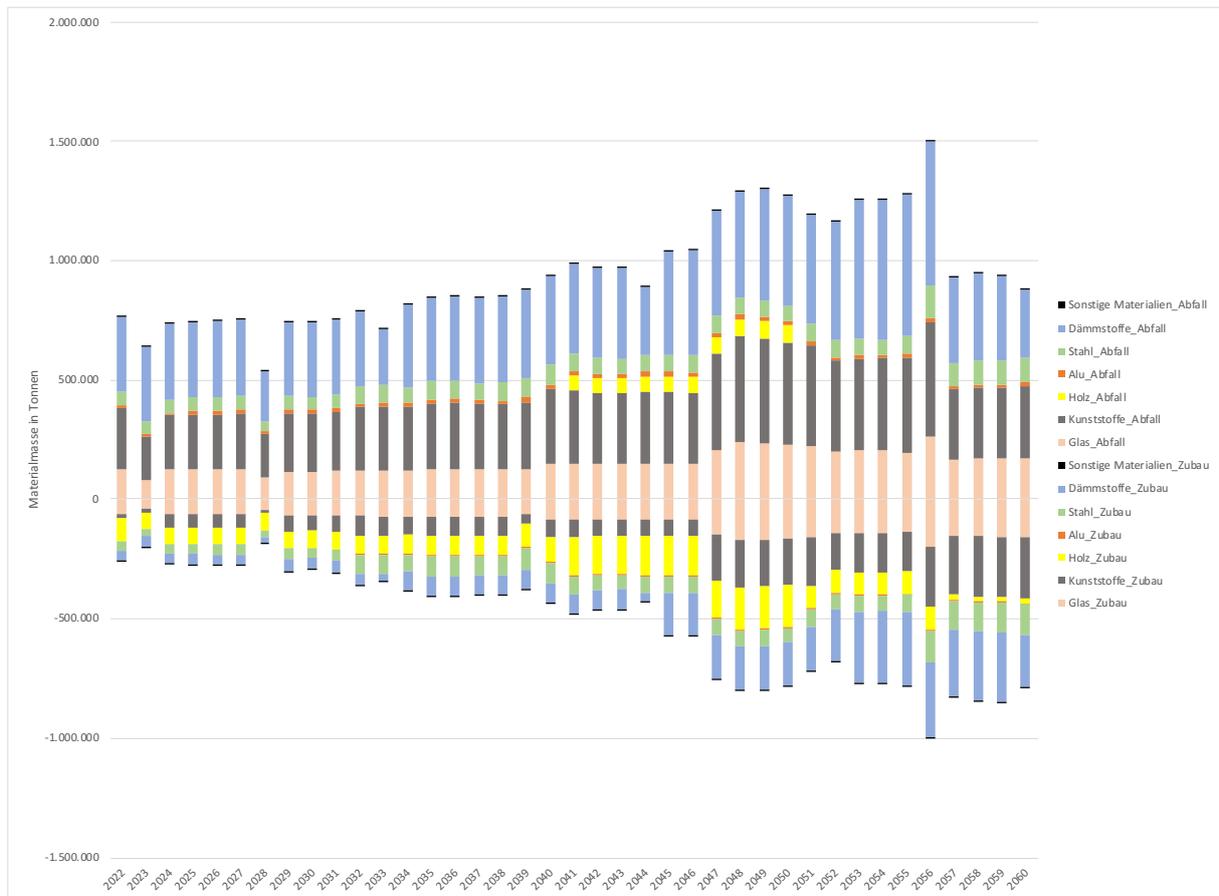


Abbildung 13: Zusammengeführte Materialgruppen aus energetischer Sanierung und Austausch von Bauteilen

6.6 Zusammengeführte Veränderungen des Materiallagers bis 2060

Durch Abbruch, Zubau, Sanierung und Austausch von Bauteilen ergibt sich für das Jahr 2060 eine Materialmasse im Bestand von circa 3,8 Millionen Tonnen, die sich wie in **Abbildung 14** dargestellt zusammensetzt.

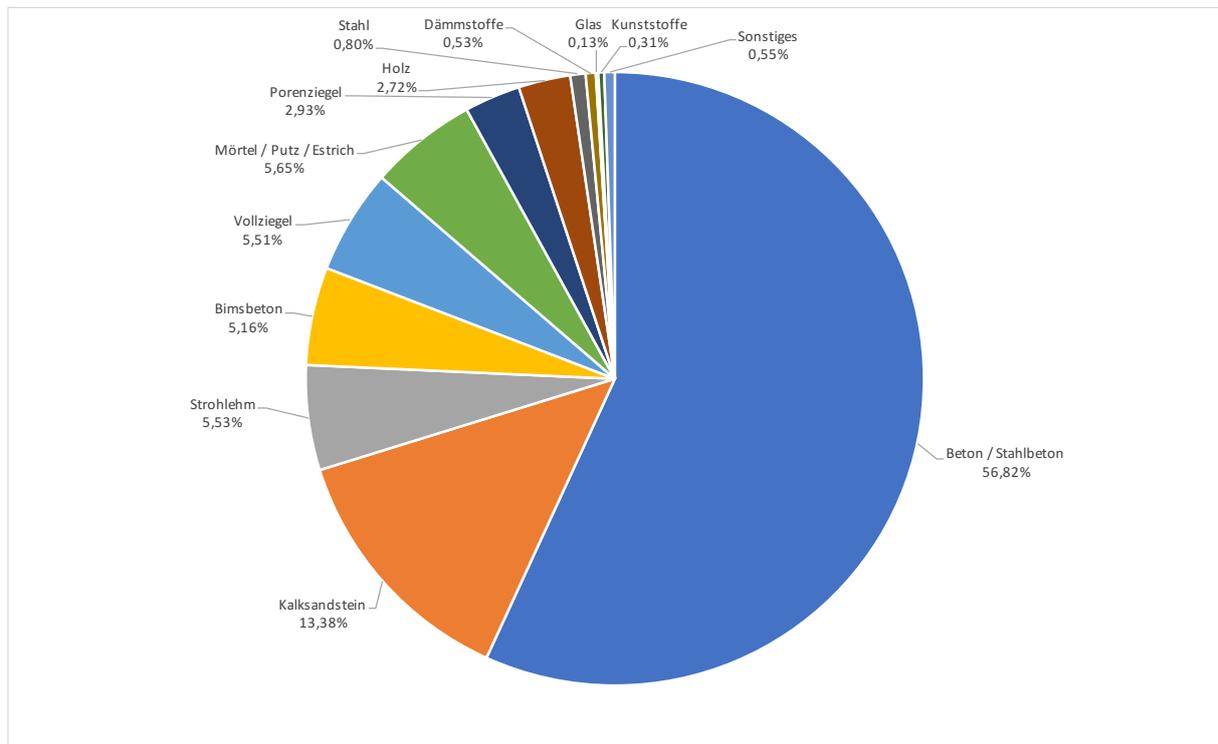


Abbildung 14: Materialien im Bestand (2060)

Im Vergleich zum Bestand von 2021 steigen demnach bis 2060 prozentual die Anteile von Beton (+1,2%), Vollziegel (+0,56%), Mörtel/Putz/Estrich (+1,13%), Stahl (+0,18%), Dämmstoffen (+0,35%), Holz (+0,03%), Glas (+0,06%), Kunststoffen (+0,23%) und Sonstigen (+0,19%). Die prozentualen Anteile von Kalksandstein (-2,08%), Strohlehm (-0,78%), Bimsbeton (-1,0%) und Porenziegel (-0,51%) sinken.

In **Abbildung 15** ist die Entwicklung der Materialmasse im Wohngebäudebestand über den Zeitraum von 2021 bis 2060 insgesamt aufgetragen.

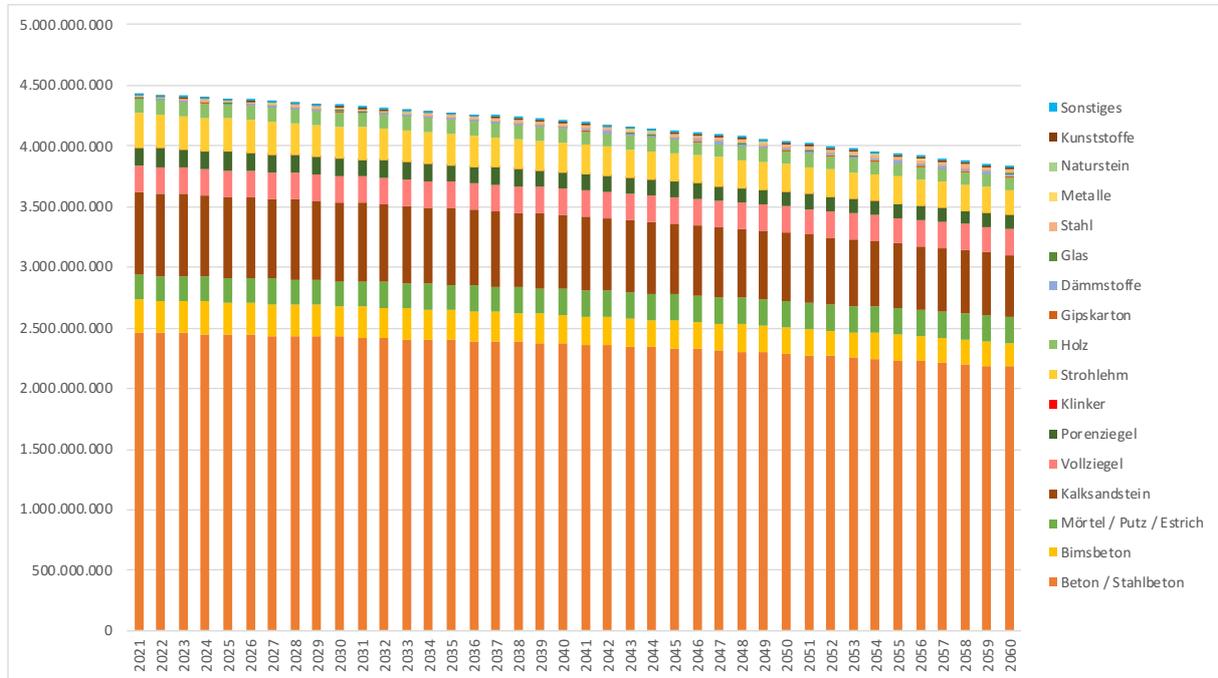


Abbildung 15: Materialmasse im Bestand im Zeitraum 2021-2060

Es ist zu erkennen, dass die Materialmasse im Wohngebäudebestand über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg absinkt.

Abbildung 16 zeigt zusätzlich die kumulierten Materialmengen und -zusammensetzung, die durch die Abriss-, Zubau- und Sanierungstätigkeiten bis 2060 anfallen werden. Im Abriss beläuft sich die Gesamtmasse auf rund 961,8 Millionen Tonnen, im Zubau auf etwa 352,7 Millionen Tonnen, in der Sanierung auf 6,4 Millionen Tonnen als Abfall und 21,1 Millionen Tonnen als neu benötigte Materialien. Der Austausch von Bauteilen sorgt für zusätzliche 14,0 Millionen Tonnen Abfall und induziert 16,2 Millionen Tonnen Bedarf an neuen Materialien.

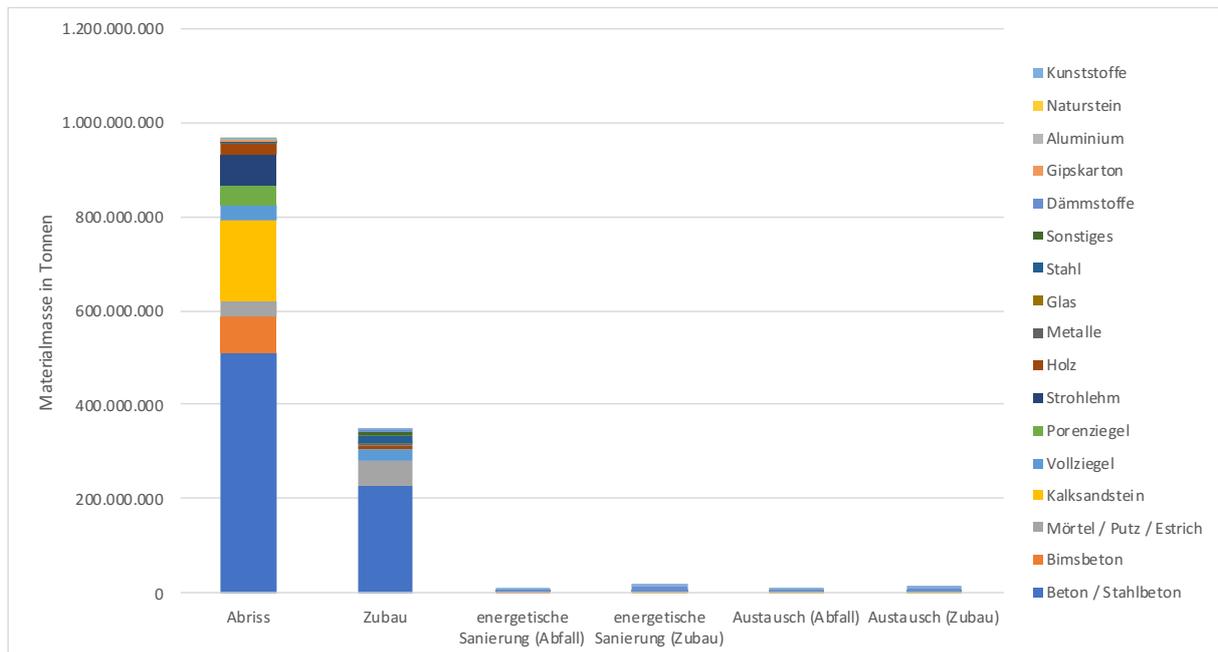


Abbildung 16: Kumulierte Materialmassen und -zusammensetzung durch sämtliche modellierten Bautätigkeiten (2022-2060)

Abbildung 17 entspricht Abbildung 16, jedoch wurden hier zur besseren Übersicht über die prozentual geringeren Fraktionen, die Fraktionen Beton, Bimsbeton, Mörtel/Putz/Estrich, Kalksandstein, Vollziegel, Porenziegel, Strohlehm und Naturstein außenvor gelassen.

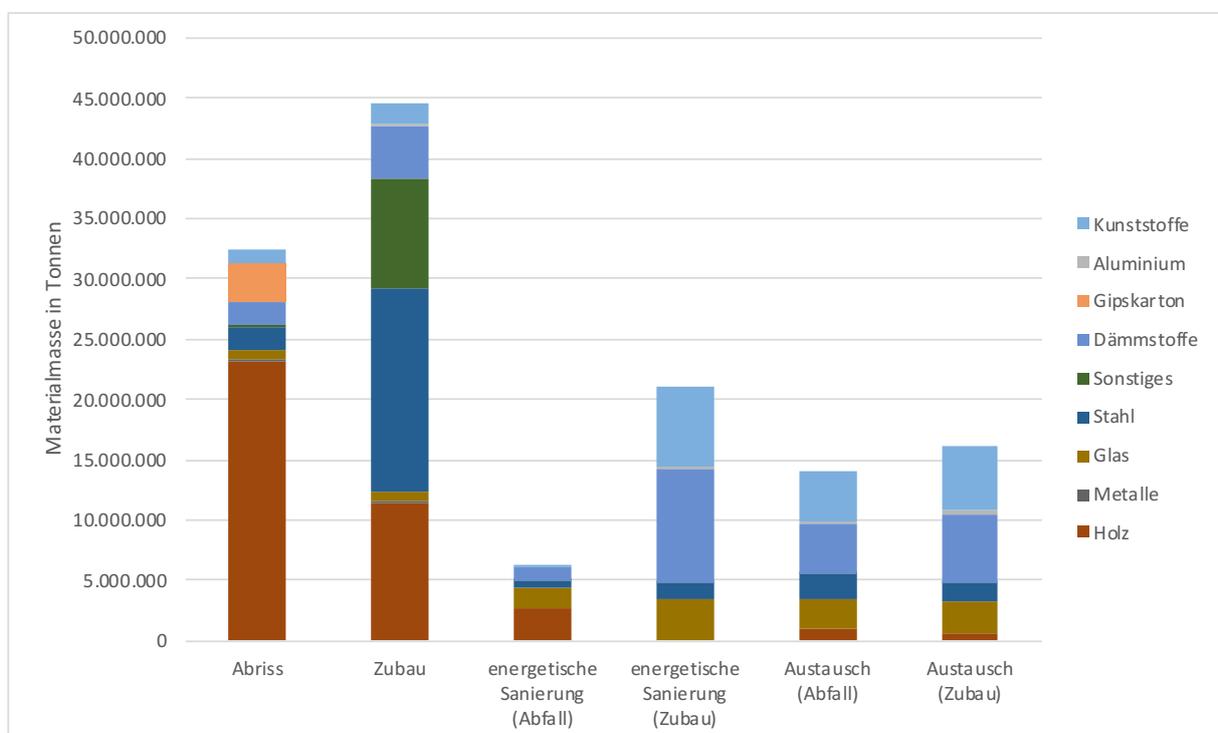


Abbildung 17: kumulierte Materialmassen und -zusammensetzungen durch sämtliche modellierten Bautätigkeiten (2022-2060) (ausschließlich prozentual geringfügige Fraktionen)

7 Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Modellierung sollen im Folgenden kritisch bewertet werden. Hierfür wird in einem ersten Schritt eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der unterstellten Sanierungsrate durchgeführt, anschließend werden zwei als besonders relevant eingestufte Materialströme genauer beleuchtet, um ihre Relevanz für künftige Verwertungs- und Bereitstellungskapazitäten darzustellen.

7.1 Sensitivitätsanalyse der Sanierungsrate

Die vorliegenden Ergebnisse des berechneten Szenarios unterstehen einer großen Zahl an Annahmen. Besonders die Abgangs-, Neubau- und Sanierungsraten erscheinen hier als Stellschrauben für die ermittelten Massenströme interessant. Vor dem Hintergrund, dass bundesweit immer größere Anstrengungen unternommen werden, die bestehende Bausubstanz möglichst lange zu nutzen, erscheint es hinsichtlich der Szenarien besonders von Bedeutung, die Sanierungsrate innerhalb einer Sensitivitätsanalyse anzupassen. Die im vorliegenden Szenario angenommene Rate von aktuell 1% erscheint hier als Ausgangspunkt weiterhin sinnvoll. Es soll jedoch untersucht werden, wie sich Massenströme verändern, wenn davon ausgegangen wird, dass die Sanierungsrate bis 2060 auf 4%, statt der vorher angenommenen 2% ansteigt. Auch hier soll ein linear ansteigender Verlauf unterstellt werden. Daraus ergeben sich, analog zu Abbildung 8, die in **Abbildung 18** dargestellten Massenströme durch die energetische Sanierung bis 2060.

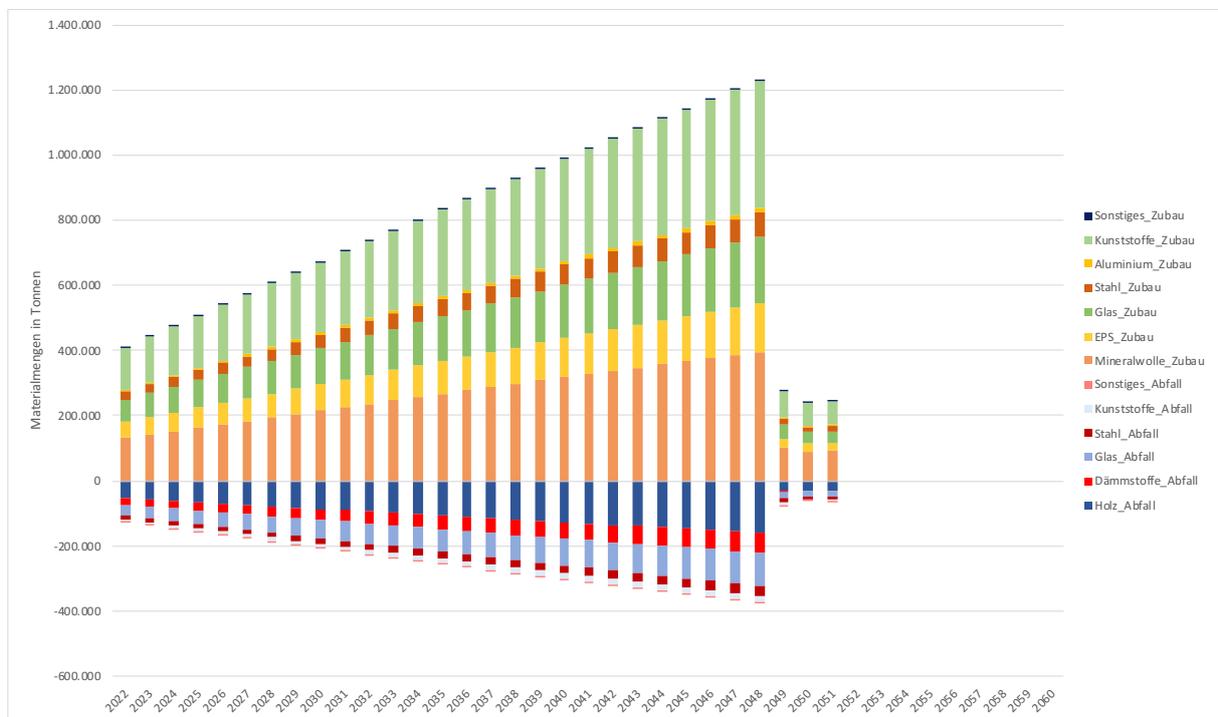


Abbildung 18: Massenströme durch energetische Sanierung im Zeitraum 2022-2060 bei Sanierungsrate von 4% (2060)

Hier ist eine klare Veränderung der Massenströme, induziert durch die energetische Sanierung, im Vergleich zum vorher berechneten Szenario zu erkennen. Einerseits sind die jährlich anfallenden Massen insgesamt deutlich höher als im vorherigen Szenario, wobei eine Steigerung des

Abfallaufkommens auf 374.000 Tonnen im Jahr 2048 und des Rohstoffbedarfs zum Einbau auf 856.000 Tonnen, ebenfalls im Jahr 2048, vorliegt. Andererseits ist klar sichtbar, dass jetzt schon im Jahr 2048 ein signifikanter Rückgang sowohl des Rohstoffbedarfs als auch des Abfallaufkommens vorherrscht und ab dem Jahr 2052 keinerlei Massenströme mehr vorliegen. Die insgesamt höheren Massen lassen sich auf die höheren jährlichen Sanierungsraten im vorliegenden Szenario zurückführen. Der Rückgang ab dem Jahr 2048 und die fehlenden Massenströme ab 2052 sind, wie in Abbildung 8, dadurch zu erklären, dass im Modell davon ausgegangen wird, dass ein Gebäude nur einmal innerhalb seines Lebenszyklus energetisch saniert wird. Unter den getroffenen Annahmen zur Sanierungsrate sowie der Annahme, dass bereits im Jahr 2021 25% des Wohngebäudebestands in Deutschland energetisch saniert ist und Gebäude ab dem Baujahr 1984 innerhalb des Betrachtungszeitraums keiner energetischen Sanierung unterliegen, da ihre energetische Performance bereits auf dem Stand der Technik ist, ergibt sich, dass ab dem Jahr 2052 keinerlei Wohngebäude mehr sanierungsbedürftig sein werden. Ab diesem Zeitpunkt wird also davon ausgegangen, dass der Wohngebäudebestand hinsichtlich seiner allgemeinen energetischen Performance hinreichend gut abschneidet und ausschließlich Instandhaltungen in Form von Austausch von Bauteilen innerhalb der Bestandsgebäude vorgenommen werden müssen.

In **Abbildung 19** ist ein Vergleich zwischen den beiden Szenarien – einerseits die Annahme der Steigerung der Sanierungsrate auf 2% und andererseits auf 4% – zu sehen. Zu sehen ist dabei, dass sowohl die Abfall- als auch die Rohstoffbedarfsmengen im 4%-Szenario erhöht sind. Zu begründen ist dies mit der vollständigen Betrachtung des Sanierungszeitraums bis zu dem Zeitpunkt, an dem keine Gebäude mehr zu sanieren sind im 4%-Szenario, während im 2%-Szenario die Betrachtung früher abgebrochen wird durch den eingeschränkten Betrachtungszeitraum bis 2060.

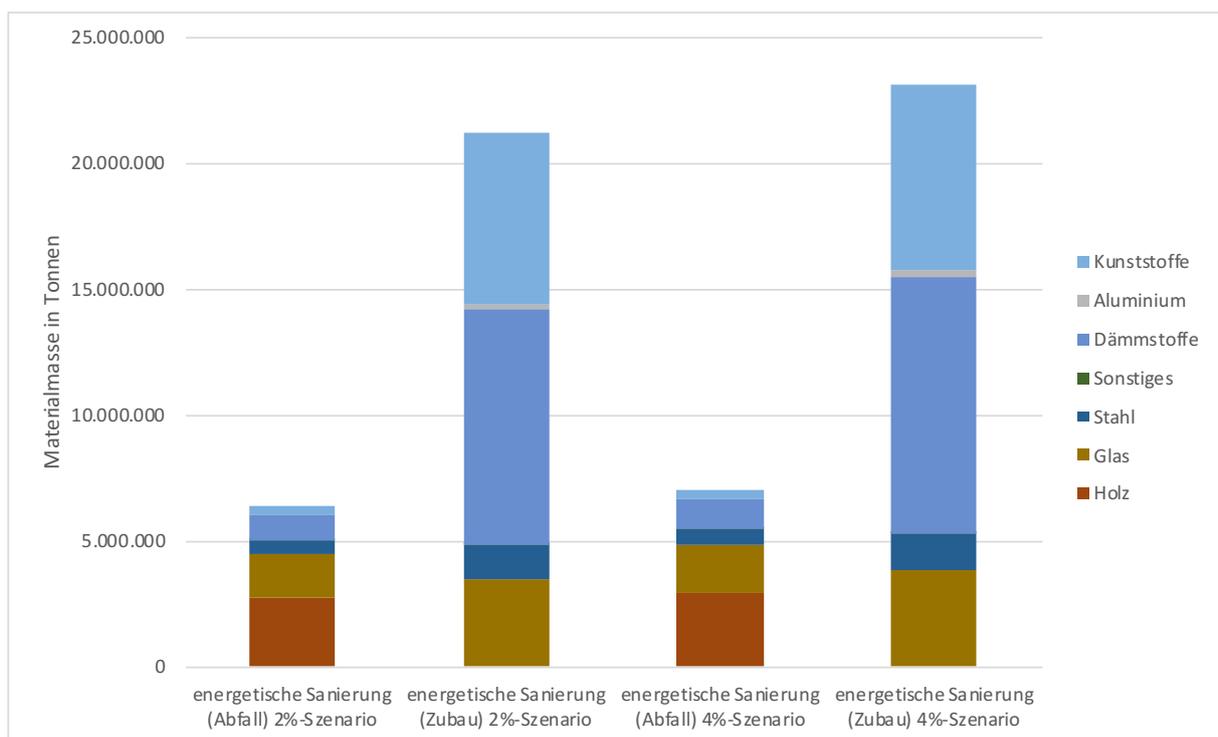


Abbildung 19: Gegenüberstellung kumulierte Massenströme durch energetische Sanierung 2%- vs. 4%-Szenario

Es kann also festgestellt werden, dass die berechneten Massenströme unter der Annahme der Steigerung der Sanierungsrate auf 2% bis 2060 in den kumuliert anfallenden Abfallmengen sowie den kumuliert benötigten Baustoffen keine signifikanten Abweichungen zum Szenario der Steigerung auf 4% aufweisen. So übersteigen die kumulierten Massen des 4%-Szenarios die des 2%-Szenarios lediglich um 9%. Interessant ist jedoch, dass im 4%-Szenario die Massen über einen deutlich kürzeren Zeitraum anfallen, als im 2%-Szenario. Dies kann besonders hinsichtlich Abfallaufbereitungskapazitäten und Baustoffverfügbarkeiten von Bedeutung sein und soll im Verlauf dieses Berichts nochmals aufgegriffen werden.

Interessant vor dem Hintergrund einer gesteigerten Sanierungsrate bis 2060 ist außerdem auch hier eine Verschiebung und der allgemeine Zusammenhang mit den Mengen aus dem Austausch von Bauteilen. In **Abbildung 20** ist dabei zu sehen, dass im Vergleich zum 2%-Szenario (vgl. Abbildung 9) die Materialmassen im 4%-Szenario am Ende des Betrachtungszeitraums deutlich erhöht sind. Jedoch fallen im 4%-Szenario im Vergleich zum 2% Szenario im Zeitraum von 2021 bis 2052 jährlich geringere Materialmassen sowohl in Zubau als auch im Abriss an. Die Erklärung für diese Verschiebungen ist dabei, dass die erhöhte Sanierungsrate dafür sorgt, dass zu Beginn des Betrachtungszeitraums bis 2052 Gebäude eher direkt saniert werden als vor einer nachfolgenden Sanierung nochmal ein Austausch einzelner Bauteile vorzunehmen. Ab 2052 spielt dann jedoch der Austausch von Bauteilen eine umso wichtigere Rolle, da die Aktivitäten der energetischen Sanierung des deutschen Wohngebäudebestands beendet wurden und dann umso mehr Gebäude für den Austausch von Bauteilen in Frage kommen.

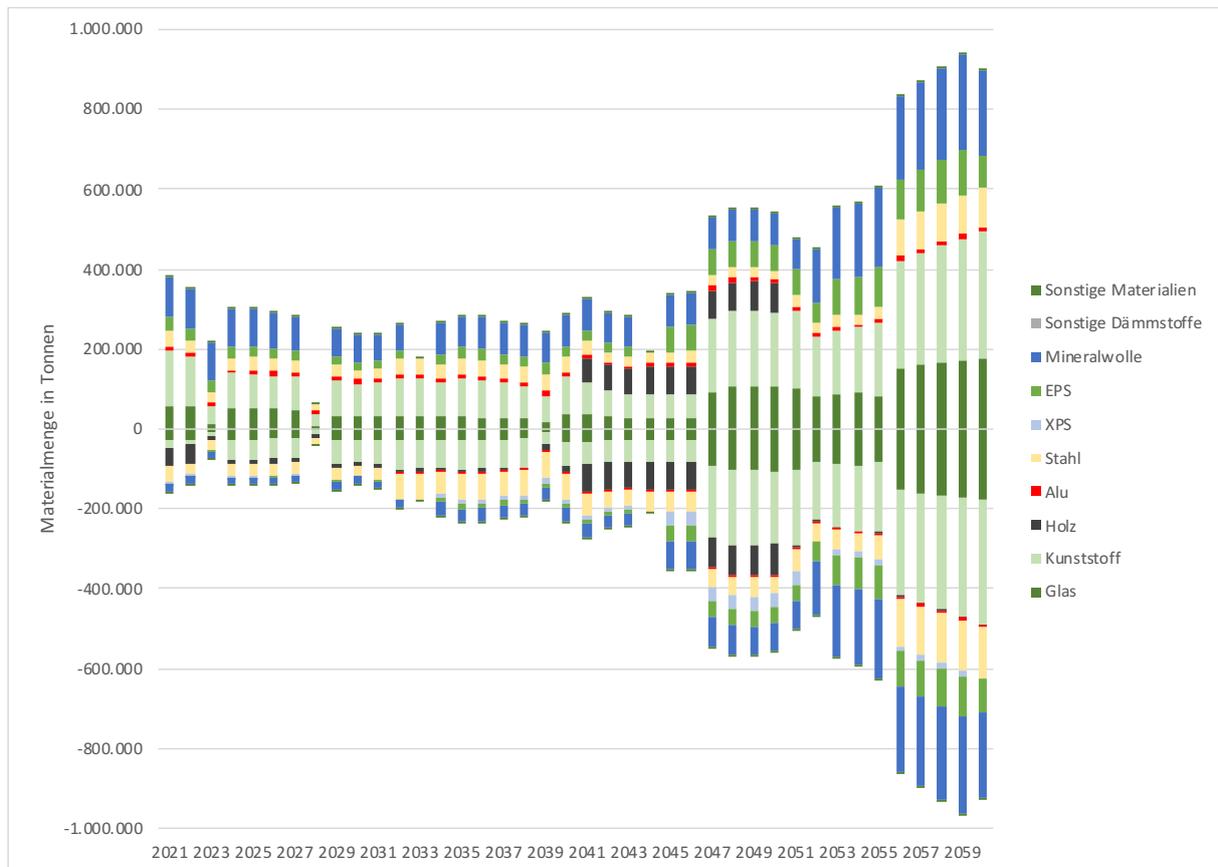


Abbildung 20: Materialmassen durch Austausch von Bauteilen im Zeitraum 2021-2060

In **Abbildung 21** ist der zusammengeführte Verlauf der Materialmassen aus energetischer Sanierung und Austausch von Bauteilen aufgetragen. Dabei ist bis zum Jahr 2048 ein fast durchgängig steigender Verlauf sowohl für die Abfälle als auch für die neu benötigten Materialien zu erkennen – verursacht vor allem durch die Massen der energetischen Sanierung. Nach dem signifikanten Einschnitt in den Jahren 2049 bis 2055, induziert durch den Wegfall der Massenströme aus der energetischen Sanierung, ist jedoch eine leichte Steigerung in den Trends der anfallenden Materialmassen durch den Austausch von Bauteilen erkennbar. Während die Gesamtmassen des Zubaus dabei hinter dem Niveau des Jahres 2048 zurückbleiben, erhöhen sich die Abfallmassen des Austauschs soweit, dass sie den Trend vor 2048 auf gleichem Niveau fortzuführen scheinen. Grund dafür, dass die Abfallströme sich nach dem Einschnitt 2048 mengenmäßig im Vergleich zu den neu benötigten Mengen schneller wieder an das vorherige Niveau anpassen, ist, dass die Massen der energetischen Sanierung innerhalb der Abfallströme schon vor 2048 weit weniger Einfluss auf die Gesamtmassen hatte als die Massen im Zubau.



Abbildung 21: Gemeinsame Betrachtung von Massen der energetischen Sanierung und des Austauschs von Bauteilen innerhalb des 4%-Szenarios

7.2 Ausgewählte Stoffströme im Fokus

Innerhalb der betrachteten Materialströme sollen exemplarisch zwei Ströme genauer beleuchtet werden, die innerhalb des Betrachtungszeitraums von besonderem Interesse sind. Einerseits soll dabei der Fokus auf den Stoffgruppe der Dämmstoffe gelegt werden, die im Bestand vorwiegend als WDVS verbaut sind und in Zukunft als Abfallstoffe eine Herausforderung in der Verwertung darstellen werden. Andererseits soll Holz als nachwachsender Baustoff der Zukunft mit seinen möglichen Problemen in Bezug auf das vorliegende Angebot beleuchtet werden.

7.2.1 Dämmstoffe

Eine besondere Rolle innerhalb der Stoffströme der Zukunft werden Dämmstoffe einnehmen. Ab den 60er-Jahren wurden in Deutschland verstärkt WDVS in Wohngebäuden verbaut, um die Gebäudehülle energetisch zu dämmen. Diese WDVS stellen in der Verwertung dahingehend ein Problem da, als dass es sich um oft untrennbare Einheiten handelt, für die ein sortenreines Recycling nicht möglich ist. Stoffliche Verwertung ist daher meist ausgeschlossen, sodass WDVS zumeist energetisch verwertet werden müssen. Interessant sind hier zuerst die Massen, die innerhalb des Betrachtungszeitraums anfallen werden.

Ausgehend vom ursprünglichen 2%-Szenario ist in **Abbildung 22** aufgetragen, wie sich die Abfallströme der Dämmmaterialien durch Abriss, energetische Sanierungen und Austausch von Bauteilen bis 2060 entwickeln werden. Demnach fließen zu Beginn des Betrachtungszeitraums besonders Mineralwolle

und Sonstige Dämmstoffe aus dem Bestand raus, zum Ende hin stellen Mineralwolle und EPS die massenmäßig relevantesten Ströme dar. Der Abfallstrom der Dämmstoffe durch die energetische Sanierung wird sich von 2022 bis 2056 circa um den Faktor 1,8 erhöhen. Der Abfallstrom der Dämmstoffe durch den Abriss von Gebäuden wird sich schrittweise um den Faktor 4,2 im Jahr 2052 erhöhen. Der Abfallstrom des Austauschs von Bauteilen wird sich von 2022 bis 2059 um rund den Faktor 5 erhöhen. Insgesamt erhöht sich der Abfallstrom der Dämmmaterialien im Vergleich zum Jahr 2021 in diesem Szenario maximal um den Faktor 5,7.

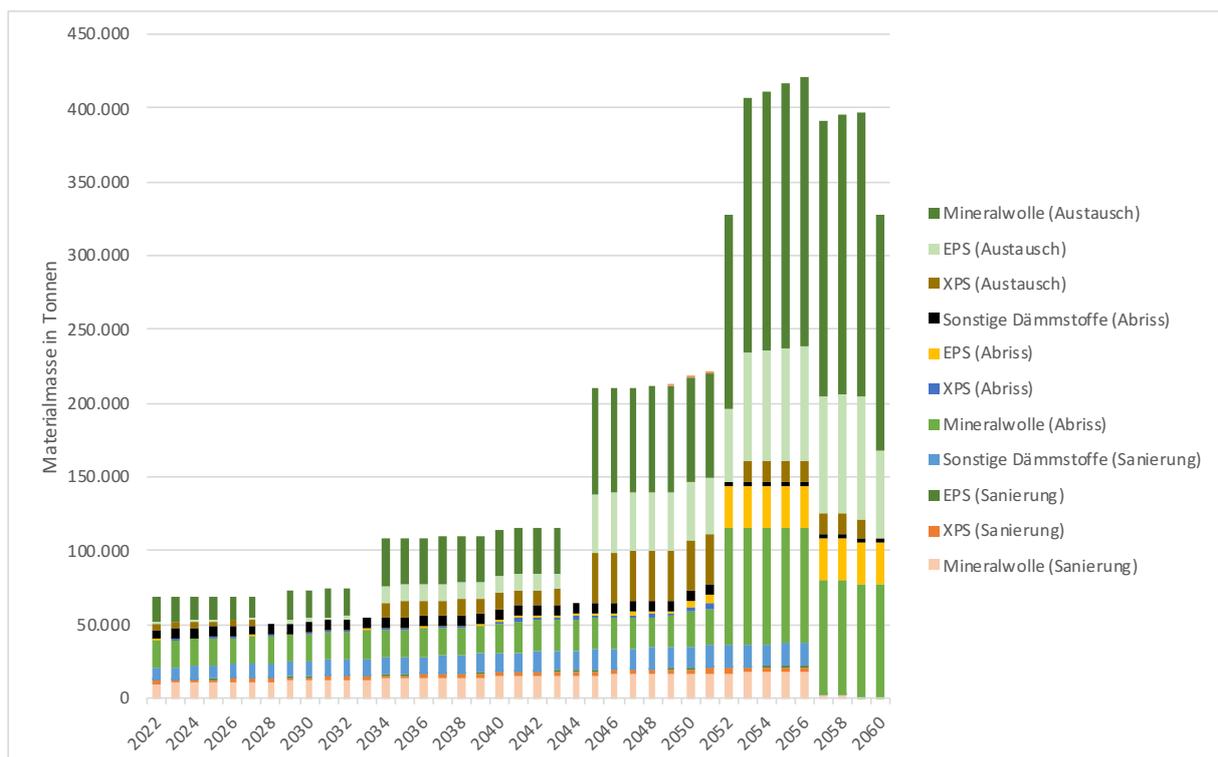


Abbildung 22: Anfallende Dämmstoffabfälle aus energetischer Sanierung (2%), Abriss und Austausch von Bauteilen (2022-2060)

Dämmstoffe werden dabei bisher meist in Müllverbrennungsanlagen energetisch verwertet, weshalb eine Gegenüberstellung der zur Verfügung stehenden Verwertungskapazitäten hier von Interesse ist.

Nach Dehoust & Alwast (2019) bestehen aktuell in NRW Kapazitäten zur energetischen Verwertung von Abfällen in Höhe von 6,3 Millionen Tonnen, von denen 96% ausgelastet sind. Demnach könnten unter den aktuellen Gegebenheiten rund 252.000 Tonnen an zusätzlichem Material jährlich anfallen, ohne dass die bestehenden Kapazitäten der energetischen Verwertung überlastet wären. Durch die energetische Sanierung, den Abriss bereits gedämmter Wohngebäude sowie den Austausch von Bauteilen würden in diesem Szenario maximal rund 350.000 Tonnen zusätzliches Material anfallen, die somit von den aktuellen Kapazitäten nicht gedeckt werden könnten. Es besteht ein zusätzlicher Kapazitätsbedarf von rund 98.000 Tonnen. Zu beachten ist dabei jedoch, dass ein Teil der Dämmstoffe nach wie vor auch deponiert wird, wodurch sich die Masse verringert. Im Szenario, bei dem ein Anstieg der Sanierungsrate auf 4% bis zum Jahr 2060 erwartet wird, ergeben sich die in **Abbildung 23** aufgetragene Massen.

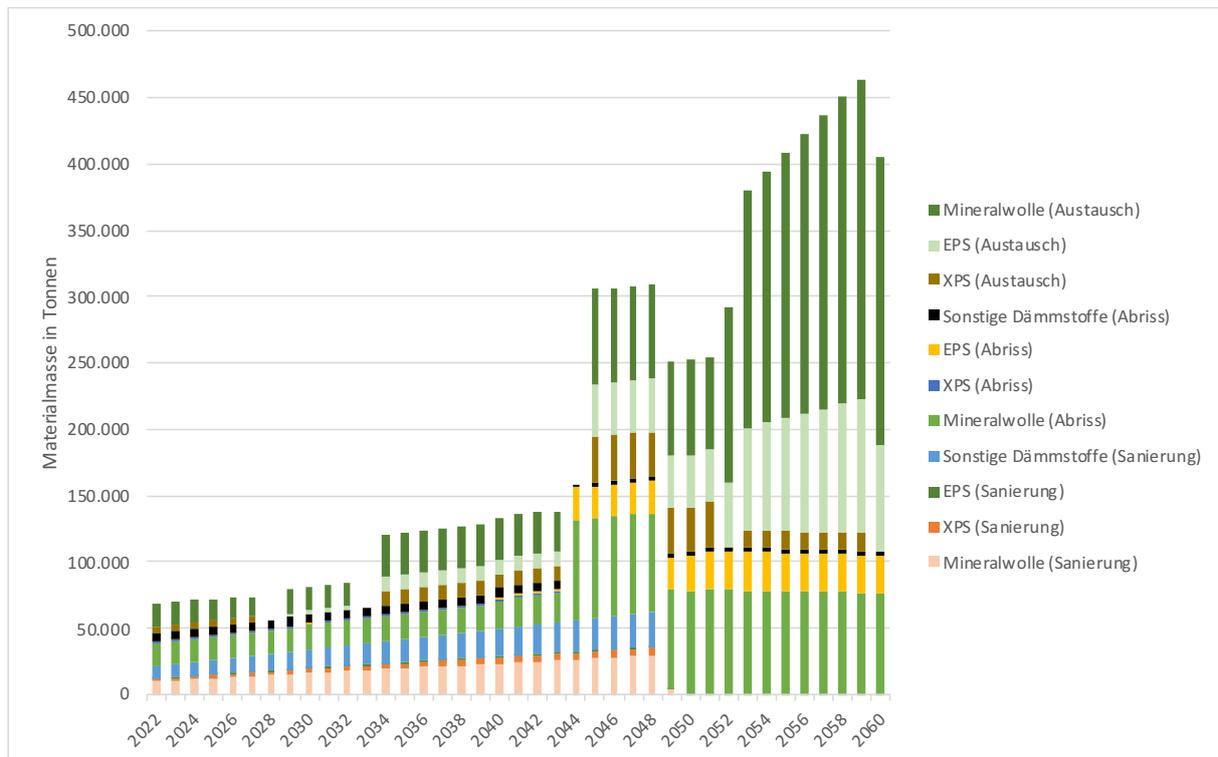


Abbildung 23: Anfallende Dämmstoffabfälle aus energetischer Sanierung (4%), Abriss und Austausch von Bauteilen (2022-2060)

In diesem 4%-Szenario liegt das Maximum der anfallenden Dämmmaterialien im Abfall 2059 bei 470.000 Tonnen. Dies entspricht im Vergleich zum Jahr 2021 einem Zuwachs um Faktor 6,3 und übersteigt die aktuellen energetischen Verwertungskapazitäten um 143.000 Tonnen.

Neben dem Output von Dämmmaterialien kommt es durch die energetische Sanierung, den Zubau von Wohngebäude und den Austausch von Bauteilen außerdem zu Inputströmen in das System (vgl. **Abbildung 24**). Diese bestehen verstärkt aus Mineralwolle und EPS.

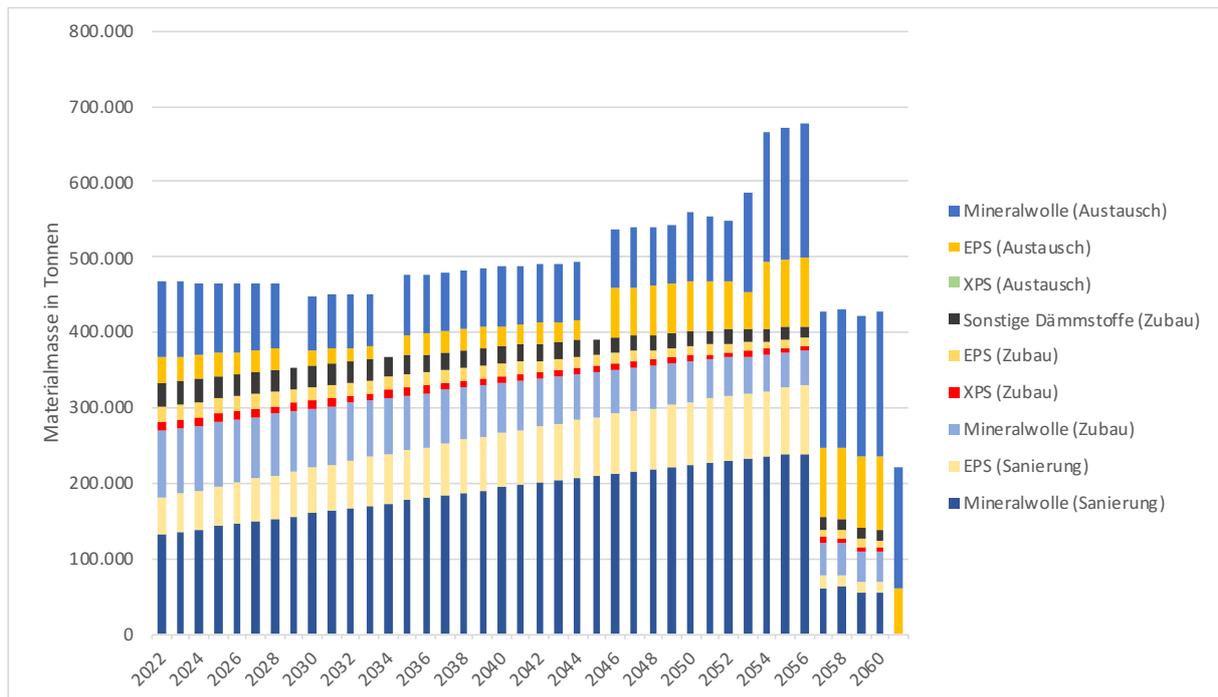


Abbildung 24: Neu benötigte Dämmmaterialien durch energetische Sanierung, Zubau von Wohngebäuden und Austausch von Bauteilen (2022-2060)

Legt man dabei die Gesamtströme von anfallenden Abfällen und für den Zubau benötigten Materialien übereinander, ergibt sich **Abbildung 25**. Daraus ist ersichtlich, dass für das Szenario, dass die Sanierungsrate bis 2060 auf 2 % ansteigt, ein durchgängiger Zuwachs an verbauten Dämmmaterialien im Bestand entstehen wird. Dies liegt unter anderem an höheren Dämmdicken in Neubau und Sanierung genauso wie erstmals verbauten Dämmungen in bisher ungedämmte Wohngebäude. Im Szenario, in dem die Sanierungsrate bis 2060 auf 4 % ansteigt, ergibt sich jedoch ab dem Jahr 2052 ein leicht negativer Saldo (rund 20.000 Tonnen im Jahr 2052, absinkend auf rund 40.000 Tonnen im Jahr 2060). Grund hierfür sind die wegfallende Sanierung in Verbindung mit einer insgesamt abnehmenden Neubaurate.



Abbildung 25: Dämmmaterialien im Input und Output mit Saldo im Zeitraum 2022-2060

Wie bereits erläutert, können WDVS im Moment meist nicht innerhalb eines stofflichen Recyclings wiederverwertet werden. Da dies im Sinne der Kreislaufwirtschaft jedoch gefördert werden soll und mineralölbasierte Dämmstoffe außerdem selbst meist mit hohen negativen Umweltwirkungen einhergehen, soll hier außerdem beleuchtet werden, welche Stoffströme eine Förderung alternativer Dämmstoffe hervorrufen würde und wie hoch diese anzusetzen sind. Dafür wurde das Modell wie folgt angepasst: es wurde davon ausgegangen, dass bei einer Sanierung ausschließlich mit nachwachsenden Dämmstoffen (hier: Hanf) gearbeitet wird. Daraus ergeben sich bei den neu benötigten Materialien die in **Abbildung 26** aufgetragenen Massen.

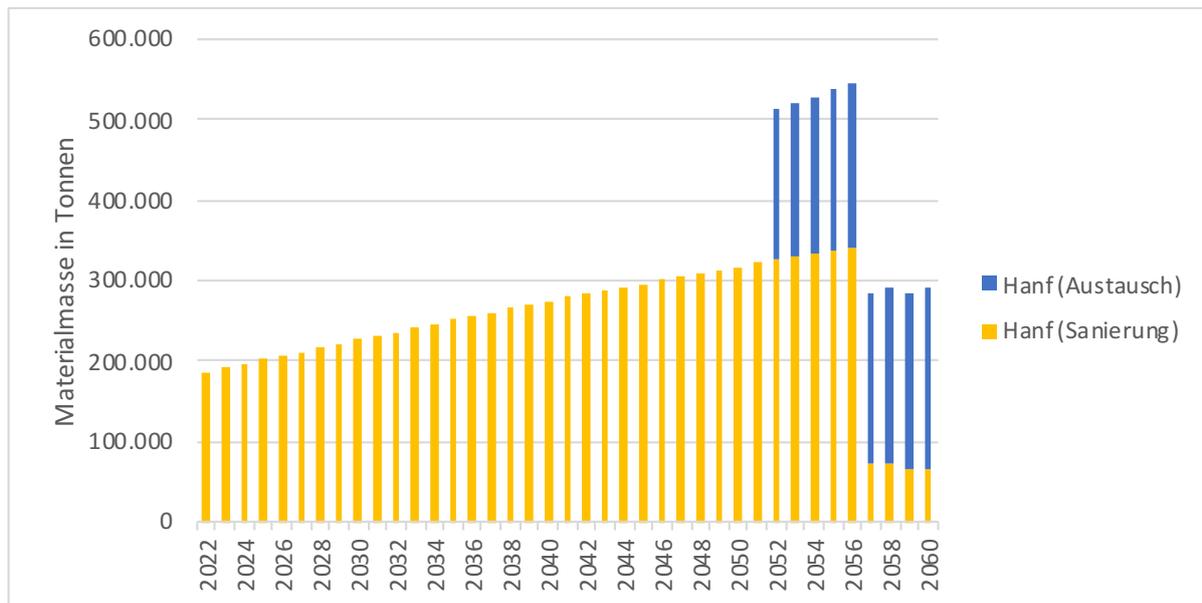


Abbildung 26: Menge an neu benötigtem Dämmmaterial (Hanf) durch Einsatz in der energetischen Sanierung (2022-2060)

Die Massen im Vergleich zu den Summen beim Einsatz herkömmlicher Dämmstoffe sind hier leicht erhöht, was mit den unterschiedlichen Dichten der Dämmmaterialien zu erklären ist. Der Bedarf an Hanf liegt demnach im Jahr 2022 bei 187.000 Tonnen und im Jahr 2056 bei rund 550.000 Tonnen. Im Szenario, bei dem die Sanierungsrate bis 2060 auf 4% ansteigt, liegt der Bedarf zu seinem Maximum im Jahr 2048 bei rund 560.000 Tonnen. Mit dem Beitrag von Hanf als Inputstrom aus dem Austausch von Bauteilen wird die angenommene Lebensdauer von 50 Jahren für die Dämmung deutlich sichtbar, da davon ausgegangen wurde, dass ab dem Jahr 2022 Hanf als Dämmstoff eingesetzt wird. Dem gegenüber steht die Verfügbarkeit des Naturdämmstoffs. 2022 haben in Deutschland 889 landwirtschaftliche Betriebe auf einer Gesamtfläche von 6.943 ha Nutzhanf angebaut, was einer Verdopplung innerhalb der letzten fünf Jahre entspricht (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2022). Innerhalb der EU wurden 2019 152.820 Tonnen Hand geerntet, wobei Frankreich hier der wichtigste Erzeuger mit über 70% war (Europäische Kommission – Agriculture and rural development, 2019). Dies zeigt, dass der Bedarf nicht durch europäische oder gar inländische Angebote gedeckt werden könnte. Allerdings ist nicht zu erwarten, dass sämtliche herkömmliche Dämmstoffe durch Hanf ersetzt werden, sondern nach und nach durch eine Mischung verschiedenster nachwachsender Dämmstoffe. Beispielsweise könnten hier Holzfasern, Flachs oder Stroh mögliche weitere Dämmstoffalternativen darstellen. Hanf sollte hier eher als Platzhalter für nachwachsende Dämmstoffe im Allgemeinen verstanden werden statt als tatsächliches, alleiniges Substitutionsmaterial.

7.2.2 Holz

Auch Holz als Werkstoff wird in den nächsten Jahrzehnten ein wichtiger Bestandteil des Wohngebäudebestands werden. Auf politischer Ebene wurde bereits das Ziel formuliert, im Jahr 2030 eine Holzbaurrate im Wohngebäudebereich von 30 % erreichen zu wollen (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 2021), bis 2050 soll diese laut Verbänden bis auf 50 % ansteigen (o. A., 2022). Im vorliegenden Modell wurde die Holzbaurrate auf 20 % im Bereich der Einfamilien- und

Reihenhäuser festgelegt. Daraus ergeben sich für den Baustoff Holz im Detail die folgenden Massenströme bis 2060:

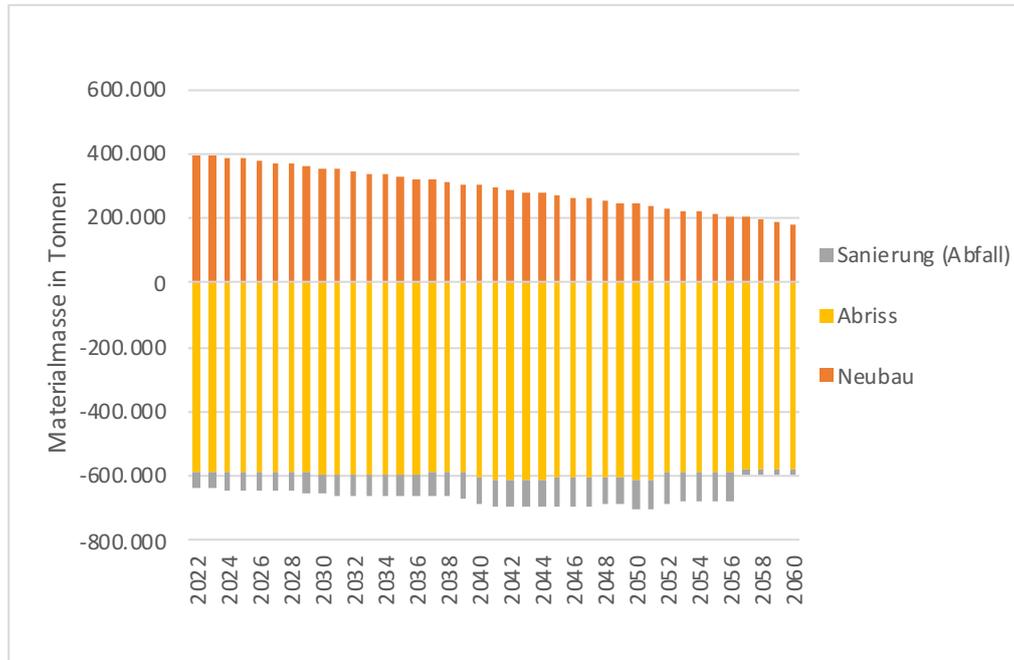


Abbildung 27: Massenströme (Holz) im Zeitraum 2022-2060

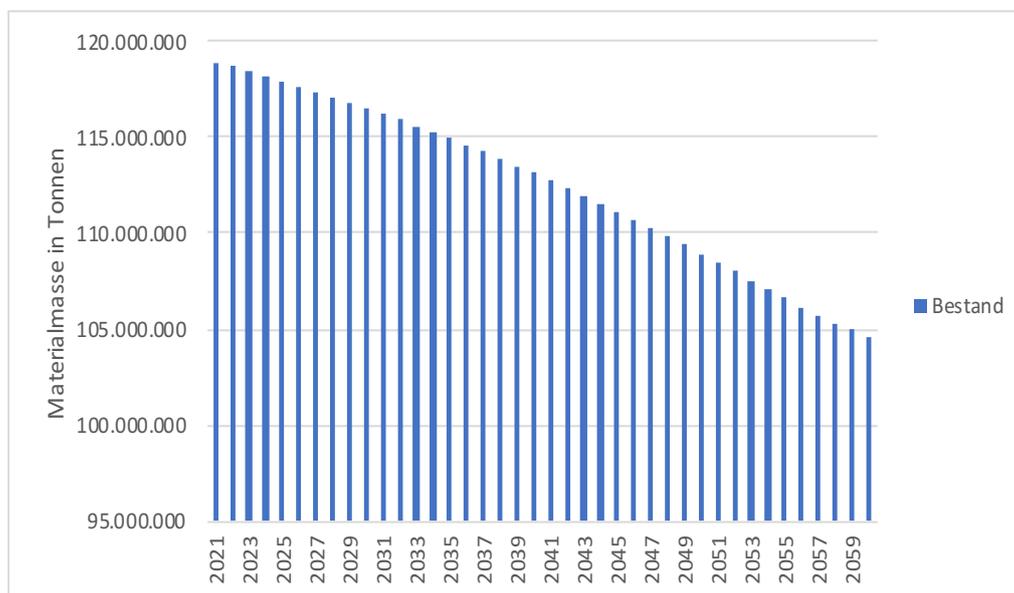


Abbildung 28: Veränderungen im Bestand (Holz) im Zeitraum 2021-2060

Wie aus **Abbildung 27** und **Abbildung 28** zu erkennen ist, ist nach den Daten des vorliegenden Modells mit einem Rückgang des Holzbestands im Wohnbausektor NRWs bis 2060 zu rechnen. Die hängt mit folgenden Annahmen zusammen:

- 1) Im Neubau, der den massenmäßig relevantesten Inputstrom von Holz in den Bestand darstellt, wurde die Annahme getroffen, dass die Zubaurate insgesamt von 2022 bis 2060 sinkt, was sich

in der linear abfallenden Materialmenge im Neubau in Abbildung 27 widerspiegelt. Nicht eingeflossen sind mögliche weitere Inputströme für Holz wie z.B. in Form von Modernisierungen, die nach Wolf et al. (2020) den größten Inputstrom im Jahr 2012 darstellten. Allein bei der Sanierung und dem Austausch von Türen bei Wohngebäuden mit Baujahr ab 2011 wird angenommen, dass ein zusätzlicher Input an Holz erfolgt, der jedoch so gering ist, dass er hier keine Relevanz hat.

- 2) Nicht miteingeflossen ist außerdem der Trend einer sich erhöhenden Holzbaurrate in Deutschland. Dieser gilt insbesondere für Einfamilienhäuser, die jedoch gleichzeitig innerhalb des Neubaus in Deutschland künftig möglicherweise eine immer geringere Rolle spielen werden. Gründe hierfür sind nach Ammann & Müther (2022) der direkte Widerspruch zum sparsamen Umgang mit Flächen, Baustoffen und Energie. Gleichzeitig herrschen weiterhin gesellschaftliche Präferenzen zur Wohneigentumsbildung in Form von Einfamilienhäusern vor. Eine Prognose, wie sich der Neubaumarkt hier innerhalb des Betrachtungszeitraums entwickeln wird, ist daher nicht abschließend zu treffen.

Um die Auswirkungen einer Steigerung der Holzbaurrate im Wohngebäudebereich zu untersuchen, wurde jedoch eine Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse hinsichtlich der angenommenen Holzbaurrate vorgenommen. Dabei wurde die Holzbaurrate im Neubau von konstant 20% über den gesamten Betrachtungszeitraum so verändert, dass bis 2030 ein linearer Anstieg auf 30%, bis 2050 bis auf 50% angesetzt wurde. Diese Erhöhung der Holzbaurrate durch dabei zulasten der Massivbaurrate angenommen und bezieht sich rein auf Einfamilien- sowie Reihenhäuser. In **Abbildung 29** sind sowohl die bisherigen Inputströme entsprechend Abbildung 27 aufgetragen, als auch die gestiegenen jährlichen Inputströme durch den Zubau bei einer erhöhten Holzbaurrate.

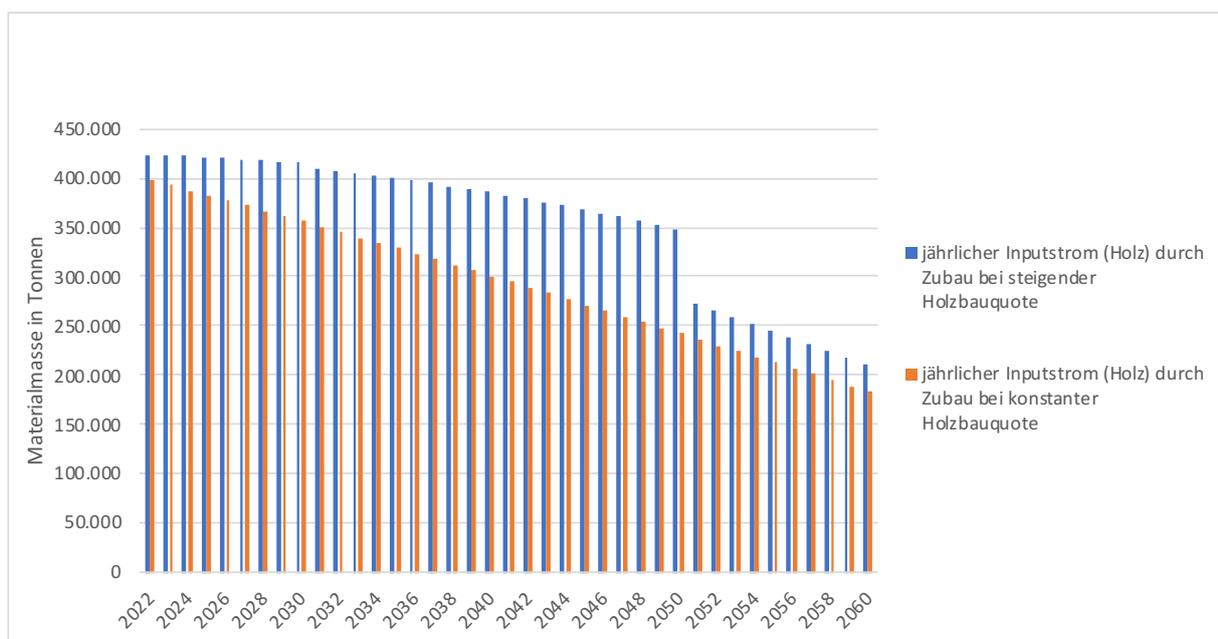


Abbildung 29: jährlicher Inputstrom (Holz) unter Berücksichtigung einer sich erhöhenden Holzbaurrate bis 2050 auf 50%

Zu erkennen ist in Abbildung 29, dass sich der Inputstrom durch die gesteigerte Holzbaurrate erhöht, allerdings im Jahr 2050 eine Stufe zu sehen ist. Diese Stufe ergibt sich aus der

Annahme, dass die Holzbaurate ab 2050 nicht weiter steigt, sondern konstant bei 50% bleibt. Dadurch spiegeln die Balken nur noch den Verlauf der allgemeinen Zubaurate insgesamt wider, die bis 2060 sinkt. Dies führt auch dazu, dass die Balken ab 2050 parallel zueinander laufen. Die erhöhte Zahl in den blauen Balken im Vergleich zu den orangenen ab 2050 ergibt sich aus der insgesamt höheren Bezugzahl des zugebauten Wohngebäudebestands aus dem Vorjahr im Fall der blauen Balken.

Insgesamt sorgt die Erhöhung der Holzbaurate jedoch nicht dafür, dass im Modell bspw. eine insgesamte Erhöhung des verbauten Holzes im Bestand über den Betrachtungszeitraum abzubilden ist, da die Abfälle durch Abriss und Sanierung nach wie vor massenmäßig relevanter sind.

- 3) Zuletzt unterliegen dem Modell Annahmen zur Materialzusammensetzung der Holzgebäude. Die modellierten Gebäude haben dabei einen eher geringen Holzanteil, da davon ausgegangen wurde, dass sämtliche Kellerbauteile sowie Decken weiterhin aus mineralischen Baustoffen gefertigt werden. Es handelt sich bei dem modellierten Holzgebäude damit eher um eine Leichtbauweise mit dem Schwerpunkt auf Holzeinsatz als um ein reines Holzgebäude.

Insgesamt muss festgehalten werden, dass das Modell den Input von Holz als Baustoff wohl stark unterschätzt. Betrachtet man beispielweise den Holzinput in den Bausektor im Jahr 2012, so wird hier für den Wohnungsbau insgesamt ein Inputstrom von 10.683.000 m³ angegeben (Wolf et al., 2020). Mit der Annahme, dass es sich bei diesem Holzinput hauptsächlich um Nadelholz handelt, entspricht dies ungefähr einer Holzmasse von 5,3 Millionen Tonnen³ und damit fast dem 13-Fachen an Holz, das bei steigender Holzbaurate im Jahr 2022 im Modell verbaut würde. Wobei hier die unterschiedlichen Betrachtungsebenen zu beachten sind. Die 5,3 Millionen Tonnen verbautes Holz im Jahr 2012 beziehen sich auf Deutschland. Das Modell betrachtet NRW. Mit einem Anteil von über 20% an der Gesamtbevölkerung in Deutschland sollte aber auch Bausektor in NRW ähnliche Größenordnungen aufweisen, was etwas über einer Millionen Tonnen für NRW entsprechen würden. Nach unserem Modell wird allerdings 10 Jahre später bei steigendem Holzeinsatz weniger als die Hälfte der Menge derzeit im Neubau eingesetzt.

Interessant ist bei den Holzmenen, die für den Neubau benötigt werden, besonders die Verfügbarkeit von geeigneten Hölzern für den Neubau. In Deutschland wird für Wohnungsbau aktuell zu rund 84% (Wolf et al., 2020) Nadelholz genutzt. Bei einer Steigerung der Holzbaurate wird sich dadurch auch die Nachfrage nach Nadelholz erhöhen, das aus ökologischen Gesichtspunkten möglichst aus inländischen Beständen gedeckt werden sollte, um hohe Transportwege zu vermeiden und das Risiko von illegalem Holzschlag im Ausland zu minimieren. Gleichzeitig wird jedoch in der Waldstrategie 2050 der Bundesregierung ein Umbau des Waldes als Maßnahme der Klimaanpassung hin zu einem Mischwald vorangetrieben. Dadurch könnte der Holzbedarf künftig über den inländischen Produktionskapazitäten liegen, sodass Holzimporte besonders im Nadelholzbereich nötig werden. Bei einer ökologischen

³ Für den Wohnungsbau wird in Deutschland hauptsächlich Nadelholz genutzt, bevorzugt werden hier unter anderem Fichte (470 kg/m³), Lärche (590 kg/m³) oder Douglasie (510 kg/m³) verbaut. Für die Umrechnung von m³ in Tonnen wurde daher ein Wert von 500 kg/m³ angenommen.

Betrachtung der Steigerung der Holzbauraten müssen somit Transportaufwendungen genauso wie mögliche Verlagerungseffekte in die Exportländer mitbeachtet werden.

7.3 Abschließende Bewertung

Die Ergebnisse der Modellierung legen dar, dass in NRW ausgehend vom Jahr 2021 bis 2060 auf eine Periode des Zuwachses an Wohngebäuden im Wohnbausektor eine Periode folgen wird, in der es zu einem Rückgang der Anzahl an Wohngebäuden kommen wird. Der Wendepunkt liegt, bei den hier unterstellten Zubau- und Abgangsraten, im Jahr 2030. Insgesamt wird die Anzahl der Wohngebäude in NRW über den Betrachtungszeitraum hinweg um rund 228.000 absinken.

Die verbauten Materialmengen werden über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg entsprechend ebenfalls absinken auf ein Niveau, das rund 593 Millionen Tonnen unterhalb dessen von 2021 liegt. Grund hierfür ist neben den angesetzten Zubau-, Abgangs- und Sanierungsraten die geringere Materialintensität des Neubaus im Vergleich zu abzureißenden Gebäuden durch die Unterstellung von erhöhten Leicht- und Holzbauraten im Neubau. So haben die abgerissenen Gebäude trotz geringerer Detailtiefe in den Informationen zur spezifischen Materialzusammensetzung eine höhere Gesamtmasse an verbauten Materialien als die neu zugebauten Gebäudetypen. Grund dafür ist primär der verringerte Einsatz von mineralischen Materialien mit hohen Dichten im Neubau, zusammen mit dem erhöhten Verbau von Materialien geringer Dichte, wie z. B. Dämmstoffe und Holz.

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse hinsichtlich einer stärker ansteigenden Sanierungsrate zeigt, dass die Massen, die unter den getroffenen Annahmen berechnet wurden, zwar kumuliert über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg fast gleichbleiben, es jedoch zu einer zeitweisen Erhöhung der jährlich anfallenden Abfälle und benötigten Materialien für die energetische Sanierung um rund 170% (2048) kommt.

Beim Fokus auf das Baumaterial der Dämmstoffe konnte außerdem gezeigt werden, dass durch die Überlagerung von Abfällen aus der energetischen Sanierung mit denen aus dem Austausch von Dämmstoffen nach Ende ihrer Nutzungsdauer Materialmassen anfallen werden, die die aktuellen energetischen Verwertungskapazitäten um 28% im Szenario des Anstiegs der Sanierungsrate auf 2% bzw. 36% im Szenario des Anstiegs der Sanierungsrate auf 4% bis 2060 übersteigen.

Hinsichtlich des Baustoffs Holz ergibt das Modell zum jetzigen Zeitpunkt eine Verringerung des verbauten Bestands, was jedoch nicht mit den in der Literatur erarbeiteten Trends übereinstimmt. Grund hierfür sind getroffene Annahmen zu Holzbauraten im Neubau, unterstellte Abrissraten sowie zu Materialzusammensetzungen der Gebäude. Holz aus Baustoff ist zudem nicht nur für die Gebäudehülle und Dachstühle relevant, die durch unsere Gebäudemodell abgedeckt werden, sondern auch als Teil des Innenausbau (Dielen, Parkett) oder für Anbauten wie Carports. Dies wird in unserem Gebäudemodell jedoch nicht abgebildet. Zudem sind die Nutzung von generischen Gebäudetypen eine grobe Vereinfachung der Wirklichkeit. Wichtig wird hier in Zukunft der Bedarf an geeignetem Holz für den Wohnbausektor, der voraussichtlich nur durch Importe besonders im Nadelholzbereich gedeckt werden kann.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass der Bausektor als Materiallager einen äußerst dynamischen Sektor darstellt, was genaue Vorhersagen zu Verfügbarkeiten und Bedarf von Materialien erschwert. Was allerdings gezeigt werden konnte ist, dass generell das Potenzial besteht, Stoffkreisläufe auf Landesebene durch Wiederverwendungen zu schließen. So fallen kumuliert über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg deutlich mehr Materialien als Abfälle an als für den Neubau benötigt werden, was generell die Chance zur Wiederverwendung von Materialien und zum Schließen von Stoffkreisläufen sichtbar macht. Besonders mineralische Baumaterialien fallen innerhalb von Abfallströmen als mögliche Sekundärmaterialien in großer Menge an, sodass eine verstärkte Nutzung lokaler Aufbereitungsmöglichkeiten und eine entsprechende Wiederverwendung sinnvoll sein kann. So könnte bei der Materialgruppe Beton/Stahlbeton eine Aufbereitung der Abfälle und eine Wiederverwendung eine besonders vielversprechende Perspektive darstellen. Diese Materialgruppe stellt sowohl innerhalb der anfallenden Abfälle als auch für den Neubau die massenmäßig relevanteste Gruppe unter den untersuchten Materialien dar. Allerdings konnte auch gezeigt werden, dass teilweise eine hohe Diskrepanz in Materialmenge und -zusammensetzung zwischen den Abfällen und für den Neubau bzw. die Sanierung benötigten Materialien besteht. Besonders Dämmstoffe sind von dieser Problematik betroffen. Außerdem zu beachten ist, dass eine zeitliche Diskrepanz von Bedarf und Bereitstellung von Sekundärbaustoffen bestehen kann.

8 Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse liefern durch Entwicklungen von Abriss-, Zubau und Sanierungstätigkeiten im Wohngebäudesektor NRWs bis 2060, deren Verknüpfung mit Gebäudezahlen und durchschnittlich verbauten Materialmengen und -zusammensetzungen Aussagen über die künftigen Entwicklungen des Materiallagers in diesem Bereich. Die erzielten Ergebnisse liefern somit eine erste Einschätzung des Materiallagers im Wohngebäudesektor von NRW und dienen als Basis, tiefer in die Thematik einzusteigen und tiefere Überlegungen und Modellierungen anzustellen. Im Folgenden soll auf mögliche Ebenen der Erweiterung und Nutzung der gewonnenen Daten eingegangen werden.

Zuerst wäre eine allgemeine Verbesserung der Datenbasis des Modells denkbar. Dabei könnte ein GIS-Ansatz bzw. eine Verknüpfung mit digitalen Katasterdaten mit den bestehenden Gebäudetypen und -massen helfen, um ein noch schärferes, lokales Bild davon zeichnen zu können, wo innerhalb des Landes NRW (oder exemplarisch von Städten mit hinreichend guten digitalen Katasterdaten) welche Massen mit welcher Altersverteilung verbaut sind. Die dabei gewonnene Detailtiefe in Bezug auf Regionalität und Lokalität könnte dann wiederum dafür genutzt werden, besonders die erzeugten Abfälle innerhalb der unterschiedlichen Szenarien mit den Lager- und Aufbereitungskapazitäten in NRW zu vergleichen und mögliche Diskrepanzen in den Aufbereitungskapazitäten oder Transportaufwendungen zu identifizieren. So könnten gezielte Empfehlungen zum Ausbau dieser Kapazitäten beim Verfolgen bestimmter Szenarien möglich werden.

Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung der Datenbasis kann ein Abgleich mit historischen Daten sein. Die bisherigen Annahmen zu Bauweisen der Gebäude stellen eine Datenbasis dar, die einen ersten Überblick über die verbauten Materialien und Mengen geben können, eine detaillierte Aufschlüsselung der Bausubstanz kann so jedoch nicht erreicht werden. Ein besonderer Angriffspunkt ist hier die Einteilung in die Baualtersklassen, die aus der IWU-Typologie übernommen wurden. Hier wird unterstellt, dass sich die Gebäude eines Typs bspw. zwischen 1850 und 1918, 1919 und 1948 oder auch 1958 und 1968 nicht ändern bzw. auch dass alle Gebäude eines Gebäudetyps und Altersklasse identisch gebaut sind. Diese teilweise sehr großen Zeiträume können die Heterogenität der Bauweisen nicht abbilden, was zu einer Verfälschung der Ergebnisse führt. Auch lokale Besonderheiten in der Bauweise, wie der höhere Einsatz von Schiefer in der Bergischen Region, werden durch das Gebäudemodell zurzeit nur unzureichend abgebildet. Eine Einteilung in kleinere Altersschritte oder lokale Bauweisen würde hier zu einer deutlichen Erhöhung der Genauigkeit der Ergebnisse führen. Der Abgleich mit historischen Daten kann hier dabei helfen deutlich kleinteiligere Unterscheidungen vorzunehmen und so die Heterogenität des Wohngebäudebestands besser abzubilden.

Neben der Weiterentwicklung des Modells selbst können außerdem die aus dem Modell gewonnenen Ergebnisse zu Materialströmen in weiterführende Forschungsbereiche eingebettet werden. Hier bietet sich in einem ersten Schritt die Entwicklung von Szenarien an. Dabei können die unterschiedlich angesetzten Raten für Abriss, Neubau und Sanierung, sowie mögliche Lebensdauern von Bauteilen für die zusätzlichen Austauschaktivitäten über den Betrachtungszeitraum hinweg angepasst werden. Möglich wäre es hier, die Trends ökologisch zu bewerten und entsprechende Empfehlungen auszusprechen.

Literaturverzeichnis

- Ammann, I., & Müther, A. M. (2022). *Wohneigentumsbildung und Wohnflächenverbrauch: Bestandsaufnahme und zukünftige Entwicklung*. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Bonn.
- Bierwirth, A., & Wilts, H. (in Veröffentlichung). *DEMRESS II. Demografische Entwicklung in Stadtregionen mit angespannten Wohnungsmärkten*.
- Bründlinger, T., Marcinek, H., Stahl, C., & Stolte, C. (2021). *Dena-Gebäudereport 2021 – Fokusthemen zum Klimaschutz im Gebäudebereich*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2022). *Nutzhanf auf fast 7.000 Hektar angebaut*. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Pressemitteilungen/2022/220926_Nutzhanf.pdf;jsessionid=727173799AC158A14A02C06CAC2F5688.internet012?__blob=publicationFile&v=2, geprüft am 29.11.2023.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). (2021). *Waldstrategie 2050. Nachhaltige Waldbewirtschaftung—Herausforderungen und Chancen für Mensch, Natur und Klima*. Bonn.
- Bundesregierung. (o. J. (b)). *Bauen und Wohnen*. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimafreundliches-zuhause-1792146>, zuletzt geprüft am 29.11.2023.
- Bundesregierung. (o. J. (a)). *Klimaschutzgesetz 2021. Generationenvertrag für das Klima*. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>, zuletzt geprüft am 29.11.2023.
- Bürger, V., Hesse, T., Plazer, A., Köhler, B., Herkel, S., Engelmann, P., & Quack, D. (2017). *Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Energieeffizienzpotentiale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand (Climate Change, 06/2016)*. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Dehoust, G., & Alwast, H. (2019). *Kapazitäten der energetischen Verwertung von Abfällen in Deutschland und ihre zukünftige Entwicklung in einer Kreislaufwirtschaft. Strukturanalyse thermischer Anlagen innerhalb der deutschen Kreislaufwirtschaft*. Öko-Institut e.V.. Berlin.
- Europäische Kommission – Agriculture and rural development. (2019). *Hanf*. Online verfügbar unter https://agriculture.ec.europa.eu/farming/crop-productions-and-plant-based-products/hemp_de, zuletzt geprüft am 29.11.2023.
- Europäisches Parlament - Generaldirektion Kommunikation. (2019). *Was versteht man unter Klimaneutralität und wie kann diese bis 2050 erreicht werden?* Online verfügbar unter https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2019/10/story/20190926STO62270/20190926STO62270_de.pdf, zuletzt geprüft am 29.11.2023.
- Jochum, P., Lempik, J., Kulka, M., Blachut, T., Wolff, J., Wallstab, T., Mellwig, P., von Oehsen, A., Pehnt, M., Fehr, J., & Fortuniak, A. (2015). *Dämmbarkeit des deutschen Gebäudebestands [Endbericht]*. Beuth Hochschule für Technik Berlin, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu). Berlin.

- Loga, T., Stein, B., Diefenbach, N., Born, R., & Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.). (2015). *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - „Typology approach for building stock energy assessment“, EPISCOPE - „Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks“* (2., erw. Aufl). IWU. Darmstadt.
- NRW.Bank. (2011). *Wohnungsmarkt Nordrhein-Westfalen—Analysen Wohnungsabgänge in NRW. Auswertung der Bauabgangsstatistik Nordrhein-Westfalen*. Online verfügbar unter https://digital.zlb.de/viewer/api/v1/records/15436051/files/images/NRW.BANK_Wohnungsabgaenge_in_NRW.pdf/full.pdf, zuletzt geprüft am 29.11.2023.
- o. A. (2022). Ziel: Holzbauanteil bis 2050 auf 50% steigern—Deutscher Holzfertigbau-Verband trifft sich zur »Herbsttagung« in Frankfurt – Al Samarraie leitet künftig DHV-Hauptstadtbüro. *Holzbau-Zentralblatt*, 857. Online verfügbar unter https://d-h-v.de/wp-content/uploads/DHV-MV_in_HZ_49_2022_Seite_857-9_09Dez22.pdf, zuletzt geprüft am 29.11.2023.
- Thamling, N., Rau, D., Kemmler, A., Sahnoun, M., Kulkarni, P., Vu, M. P., Holm, A., Empl, B., Kamml, M., Oschatz, B., Winiewska, B., Ortner, S., Stange, H., Bürger, V., Kühler, B., Braungardt, S., Fjornes, J., Kluge, C., Schneller, A., ... Hänsel, R. (2022). *Hintergrundpapier zur Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz*. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/gebäudestrategie-klimaneutralitaet-2045.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 29.11.2023.
- Umweltbundesamt. (2022). *Abfallaufkommen*. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall>, zuletzt geprüft am 29.11.2023.
- Wolf, T., Untergutsch, A., Mittelbach, H., Lu-Pagenkopf, F., Kellenberger, D., & Kubowitz, P. (2020). *Potenziale von Bauen mit Holz. Erweiterung der Datengrundlage zur Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau sowie vergleichende Ökobilanzierung von Häusern in Massiv- und Holzbauweise* (192/2020; TEXTE). Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.