

Urbanes Stoffstrommanagement: Instrumente für die ressourcen- effiziente Entwicklung von Stadtquartieren

Schlussbericht RessStadtQuartier

RESZ – Verbundvorhaben

Projektlaufzeit: 01.03.2019-31.08.2022

Förderkennzeichen: 033W109



GEFÖRDERT VOM











Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

„Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den
Autorinnen und Autoren“

Verbundkoordinator

Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek
Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft
Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt
l.schebek@iwar.tu-darmstadt.de; 06151-16-20720

Projektpartner	Fachgebiet/Institut	Mitarbeitende Personen	
Technische Universität Darmstadt (TUDa)	Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft (SuR)	Liselotte Schebek, Laura Göllner-Völker, Bianca Siedlecki (geb. Koch), Ricarda Bay, Anton Jäger	 TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT 
	Landmanagement (LM)	Hans-Joachim Linke, Audrey Bourgoïn, Benjamin D. Kraff	
	Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen (IIB)	Uwe Rüppel, Marcel Heiß, Zhongxin Xia, Patrick Scheich	
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.	Fraunhofer Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie (IWKS)	Emanuel Ionescu, Theresa Mack, David Fahz	
UMGIS Informatik GmbH	UMGIS Informatik GmbH, Darmstadt	Martin Wacker, Erich Lieberum	
Landeshauptstadt Wiesbaden, der Magistrat	Umweltamt (WI)	Lena Diduch (geb. Spatz)	
Wissenschaftsstadt Darmstadt, der Magistrat	Amt für Wirtschaft und Stadtentwicklung (DA)	Rena Tilsner, Kai Hartmann	

Autorinnen und Autoren (Institution)

Weyand, Steffi (SuR); Bay, Ricarda (SuR); Bittner, Timo (DA); Bourgoïn, Audrey (LM); Fahz, David (IWKS); Göllner-Völker, Laura (SuR); Heiß Marcel (IIB); Ionescu, Emanuel (IWKS); Jäger, Anton (SuR); Kraff, Benjamin (LM); Linke; Hans-Joachim (LM); Mack, Theresa (IWKS); Rüppel, Uwe (IIB); Siedlecki, Bianca (SuR); Wacker, Martin (UMGIS); Xia, Zhogxin (IIB); Schebek, Liselotte (SuR)

Danksagung

Das Projekt RessStadtQuartier wurde zudem auch von studentischen Hilfskräften mitgetragen. Für die sehr umfangreiche Bauakteneinsicht, die Transkription der Experteninterviews und weiterer Unterstützung bei diversen kleineren Aufgaben gilt ein besonderer Dank Anna Bitsch, Jana Werner, Christian Giebler und Felix Wolf. Für textliche Editierung und Korrektur wird zudem Nico Geldmacher gedankt. Neue Perspektiven eröffnete Julia Schütz, die ihre Masterarbeit zu „Klimaschutz und Ressourceneffizienz auf kommunaler Ebene“ schrieb und bei Experteninterviews mitwirkte.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XII
1.....Einleitung	1
1.1. Motivation und Ziel des Forschungsvorhabens.....	1
1.2. Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen	2
1.3. Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens.....	3
2.....Stand der Wissenschaft und Technik	4
2.1. Ressourceneffizienz von Quartieren.....	4
2.2. Gebäude-Material-Kataster	6
2.3. Building Information Modeling	7
2.4. Energetische Quartiersanalyse	8
2.5. Berücksichtigung von Baumaterialien in der Sanierung.....	9
2.6. (Gemeinsame) Vorarbeiten	10
2.7. Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens.....	16
3.....Verwendung der Zuwendung	16
3.1. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises zur Verwendung der Zuwendung.....	16
3.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	16
4.....Methodisches Vorgehen zur Bewertung der Ressourceneffizienz von Quartieren.....	16
4.1. Grundlagen und Nomenklatur	16
4.2. Quartiers- und Gebäudetypologie und Datengrundlage.....	18
4.3. Werkzeugkasten für Ressourceneffizienz.....	19
5.....Ergebnisse und Verwertbarkeit	22
6.....LC-Quartier-Tool	24
6.1. Hintergrund der Ressourceneffizienzbewertung von Wohnquartieren	24

6.1.1.	Bestehende Möglichkeiten zur Bewertung der Ressourceneffizienz.....	24
6.1.2.	Weiterer Forschungsbedarf	25
6.2.	Zielstellung und Mehrwert von LC-Quartier-Tool	26
6.3.	Methodisches Konzept	27
6.3.1.	Entwicklung einer Quartierstypologie	28
6.3.2.	Erarbeitung der Kenngrößen der Nutzenphase	31
6.3.3.	Energiekonzepterstellung für generische Quartiere	38
6.3.4.	Identifizierung von klima-ressourceneffizienten Sanierungsvarianten.....	40
6.4.	Anwendung und Verwertung der prototypischen Umsetzung	42
6.4.1.	Hinweise zur Anwendung	42
6.4.2.	Accounting-Modul	42
6.4.3.	Sanierungsmodul	44
7.....	Materialdatenbank und Circular-Modul.....	46
7.1.	Entwicklung von Rohstoffkennwerten.....	47
7.2.	Verwertungstechnologien	57
7.3.	Handlungsoptionen	68
8.....	Gebäude-Material-Kataster (GMK®)	77
8.1.	Methodisches Konzept und Daten des GMK®	77
8.1.1.	Bedarf und Mehrwert.....	77
8.1.2.	Informationsgrundlage.....	77
8.1.3.	Details des Datenmodells.....	79
8.1.4.	Benutzeroberfläche	81
8.1.5.	Auswertungen, Outputdaten und Ergebnisse aus dem GMK®	83
8.1.6.	Schnittstellen und Informationsaustausch	86
8.2.	Validierung	87
8.2.1.	Überprüfung anhand Praxisbeispiele.....	87
8.2.2.	Erkenntnisse aus dem Projekt.....	87
9.....	RSQ-BIM-Viewer.....	89
9.1.	Generische Informationsgrundlage: Anforderungen, Datenmodelle und Informationstiefen	90
9.1.1.	Das IFC-Format im Kontext von RessStadtQuartier	90
9.1.2.	Informationsquellen und Informationstiefen	94
9.2.	Konzeptionierung synthetischer BIM-Modelltypen	97
9.2.1.	Weiterentwickeltes BIM-Datenmodell	97
9.2.2.	Entwicklung synthetischer BIM-basiertes Modelltypen für alle Gebäudetypologien	99



9.3.	Instrumente zur teilautomatisierten Datengenerierung konkreter BIM-Bestandsmodelle	103
9.4.	Validierung der Modelle und Instrumente	109
10.	..Fallbeispiele	114
10.1.	Auswahl der Stadtquartiere	114
10.1.1.	Wissenschaftsstadt Darmstadt	115
10.1.2.	Landeshauptstadt Wiesbaden	118
10.2.	Datenerhebung	123
10.2.1.	Erhobene Daten zu den Gebäuden	123
10.2.2.	Eintragungen in den Bauteilerfassungsbogen	125
10.2.3.	Beschriftungen der Pläne	127
10.2.4.	Übersicht der Baustrukturcharakteristika	128
10.2.5.	Erkenntnisse aus der Analyse der Bauakten	129
11.	..Integration in quartiersbezogene Planungsprozesse	132
11.1.	Methodisches Vorgehen.....	132
11.1.1.	Literatur und Dokumentenanalyse.....	133
11.1.2.	Experteninterviews	133
11.2.	Prozess- und Bedarfsanalyse.....	136
11.2.1.	Kommunale Abläufe	136
11.2.2.	Herausforderungen und Limitierungen	139
11.2.3.	Nutzung der Projektergebnisse	143
11.3.	Handlungsleitfaden.....	145
11.3.1.	Ausgangslage	145
11.3.2.	Formelle Instrumente	145
11.3.3.	Informelle Instrumente.....	153
11.4.	Ausblick.....	155
12.	..Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	158
13.	..Literaturverzeichnis	xiii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Untersuchte Einzelfallstudien und ihre jeweilige räumliche Ausdehnung [ha] (Siedlecki et al., 2023).....	29
Abbildung 2 Verteilung der bebauten Fläche innerhalb der architektonisch geprägten Siedlungsgebiete (Siedlecki et al., 2023)	29
Abbildung 3 Durchschnittliche Wohnfläche [m ²] für die verschiedenen Gebäudetypen für jede CTP (Siedleck et al., 2023)	33
Abbildung 4 Grundfläche [m ²] der Gebäudetypen (Siedlecki et al., 2023).....	35
Abbildung 5 Anzahl der Haushalte in den generischen Quartieren (Siedlecki et al., 2023).....	37
Abbildung 6 Jährlicher Nutzenergiebedarf der generischen Quartiere (Siedlecki et al., 2023).....	40
Abbildung 7 LC-Quartier-Tool: Eingabe- bzw. Auswahlmaske des Accounting-Moduls, vgl. Schritt 1.)-4.).....	43
Abbildung 8 LC-Quartier-Tool: Ergebnisdarstellung innerhalb des Accounting-Moduls, vgl. Schritt 5.) beispielhaft für zwei Referenzquartiere mit Quartiersgröße 5-15 ha (klein), Quartiersdichte 25-35% (hoch) und unterschiedlicher Baualtersklassen: Referenzquartier 3: vor 1948 und Referenzquartier 33: 1995-2009	44
Abbildung 9 LC-Quartier-Tool: Zusätzliche Eingabe- bzw. Auswahlmaske des Sanierungsmoduls, vgl. Schritt 5.).....	45
Abbildung 10 LC-Quartier-Tool: Ergebnisdarstellung des Sanierungsmoduls, vgl. Schritt 6.).....	45
Abbildung 11 Überblick Prozessmodell der EoL-Phase und Verknüpfung mit der Datengrundlage	46
Abbildung 12 Systemgrenzen des Gesamtmodells und Bezeichner der jeweiligen Komponenten	47
Abbildung 13 Aufbau und Anwendung synthetischer Rohstoffkennwerte	50
Abbildung 14 Abgleich der im Projekt empirisch erhobenen Daten mit den entwickelten generischen MLS	56
Abbildung 15 Abgleich der im Projekt empirisch erhobenen Daten mit den entwickelten generischen LM	56
Abbildung 16 Phasen des Rückbaus. Phasen, die im Projekt RSQ betrachtet wurden, sind rot hervorgehoben.....	57
Abbildung 17 Zuordnungsmatrix von Materialschichten zu geeigneten Rückbautechnologien	59

Abbildung 18 Beschreibung der Abbruchverfahren	61
Abbildung 19 Fließbild der Aufbereitung von gemischtem Betonbruch.....	67
Abbildung 20 Ausschnitt aus dem Fließbild zur Aufbereitung von gemischtem Betonbruch mit Angabe der Sekundärstoffe	68
Abbildung 21 Zusammenhänge der Einflussfaktoren (rot) und Handlungsoptionen (grün) zur Stärkung von Sekundärbaustoffen	72
Abbildung 22 Circular-Modul: Eingabemaske: Beschreibung generischer BM für das Material „Mörtel“	73
Abbildung 23 Circular-Modul: Abbruchmodul	74
Abbildung 24 Circular-Modul: Ausgangsmaterial.....	74
Abbildung 25 Circular-Modul: Optionen selektiver Abbruch.....	74
Abbildung 26 Circular-Modul: Verwertungsmodul.....	75
Abbildung 27 Circular-Modul: Gesamtbewertung	76
Abbildung 28 Beispielhafte Kategorisierung der Wohngebäude im GMK	79
Abbildung 29 Darstellung der Beziehungen innerhalb des Datenmodells (eigene Darstellung).....	81
Abbildung 30 Grafische Benutzeroberfläche des GMKs.....	82
Abbildung 31 Beispiel der Auswahl und Anzeigens eines Gebäudes	82
Abbildung 32 Ablauf der Berechnung der Materialintensität in dem GMK (eigene Darstellung).....	83
Abbildung 33 Auswertung auf Quartiersebene im GMK	84
Abbildung 34 Auszug des Materialsteckbriefs eines Gebäudes	86
Abbildung 35 Konzeptioneller Entwurf zur Aggregation Daten und Eigenschaften auf Material-, Gebäude- und Quartiersebene (Eigene Darstellung in Anlehnung an Mack, T.; Scheich, P.; Koch, B.; Schebek, L., 2021)	89
Abbildung 36 Kombiniertes Ansatz von synthetischen und realen Daten zur Integration in BIM (Eigene Darstellung)	90
Abbildung 37 Erweiterung des IFC um tieferliegende Materialebenen (Eigene Darstellung)	93
Abbildung 38 Informationskomponenten für BIM-Modell (Eigene Darstellung)	94
Abbildung 39 Einordnung der unterschiedlichen Informationsquellen hinsichtlich Informationsart- und tiefe (Eigene Darstellung).....	96

Abbildung 40 Klassendiagramm mit erweiterter Materialebene am Beispiel einer Wand (Eigene Darstellung)	97
Abbildung 41 Klassendiagramm für Produkte und Bauteile (Eigene Darstellung).....	100
Abbildung 42 Klassendiagramm für Gebäude und Bauteile (Eigene Darstellung)	100
Abbildung 43 Überblick Prozessmodell zur Entwicklung der synthetischen BIM-basierten Modelltypen und Verknüpfung mit der Datengrundlage (Eigene Darstellung)	101
Abbildung 44 Konzept zur Nutzung der unterschiedlichen Informationsquellen in BIM mit zunehmender Informationstiefe (Eigene Darstellung).....	104
Abbildung 45 Ontologie zur Vereinigung von Materialien aus zwei unterschiedlichen Quellen (Eigene Darstellung)	105
Abbildung 46 Fünf Phasen der BIM-Rekonstruktion. Geometriespezifische Informationen sind orange markiert, materialspezifische Informationen in blauer und gebäudespezifische Informationen in grauer Schrift (Eigene Darstellung in Anlehnung an Mack, T.; Scheich, P.; Koch, B.; Schebek, L., 2021)	107
Abbildung 47 Ergebnisse der prototypischen Umsetzung im RSQ-BIM-Viewer.....	111
Abbildung 48 Ergebnis der Nachmodellierung in Phase 4.....	113
Abbildung 49 Schnittstellen des RSQ-BIM-Viewers	114
Abbildung 50 Gebiet der Stadt Darmstadt (Google Earth, 2023).....	115
Abbildung 51 Quartier Ludwigshöhviertel (Google Earth, 2023).....	116
Abbildung 52: alte Gebäudestruktur und neue Flächen für die Wohnbebauung (ebd.).....	117
Abbildung 53 (links): Städtebauliches Strukturkonzept (ebd.)	117
Abbildung 54 (unten): Ortsbegehung der Kasernengebäude	117
Abbildung 55 Gebiet der Stadt Wiesbaden (Google Earth, 2023).....	118
Abbildung 56 Lage der Quartiere (Google Earth, 2023)	119
Abbildung 57: Blockrandbebauung (ebd.)	120
Abbildung 59 (links): Ortsbegehung	120
Abbildung 58 (rechts): Realnutzungskartierung (Wiesbaden, 2023a).....	120
Abbildung 60: Blockrandbebauung (ebd.)	121
Abbildungen 61 & 62: Ortsbegehung	121

Abbildung 63: Baustruktur (ebd.).....	122
Abbildung 64: Realnutzungskartierung (ebd.)	122
Abbildung 65 Verhältnis der Innenwandlänge/Bruttogrundfläche für die Gebäude, für die dieses Verhältnis sich auswerten ließ	130
Abbildung 66 Verhältnis der Innenwandfläche/Bruttorauminhalt für die Gebäude, für die dieses Verhältnis sich auswerten ließ	131
Abbildung 67 Verhältnis der Fläche der Öffnungen pro Außenwandfläche für die Gebäude, wo dieses Verhältnis sich auswerten ließ	131
Abbildung 68 Verhältnis der Fläche der Öffnungen pro Innenwandfläche für die Gebäude, für die dieses Verhältnis sich auswerten ließ	132
Abbildung 69: Schritte der Interviewdurchführung	133
Abbildung 70 Expert*innencluster	134
Abbildung 71 Gruppierung der Informations- und Beteiligungsformate.....	154

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Einteilung der 20 synthetischen Gebäudetypen in RSQ	18
Tabelle 2 Übersicht der Module mit Solution Readiness Level des entwickelten „Werkzeugkasten Ressourceneffizienz“	19
Tabelle 3: Quartierstypologie (Siedlecki et al., 2023)	31
Tabelle 4: Anteil der Sanierungen in deutschen Wohngebäuden nach Sanierungsgrad, CTP und Gebäudetyp [%]. (Siedlecki et al., 2023)	34
Tabelle 5: Jährlicher Strombedarf der Haushalte (Statistisches Bundesamt, 2020).....	38
Tabelle 6 Übersicht der entwickelten Sanierungsvarianten	41
Tabelle 7 Schwerpunkt der mineralischen Abfälle mit Abfallschlüssel	50
Tabelle 8 Detailtiefe der Bestimmung repräsentativer Bauteilarten für den Gebäudetyp Einfamilienhaus geordnet nach quantitativen Erhebungen durch Statistiken (s), qualitativen Darstellungen (Q) und Abschätzungen (E).....	53
Tabelle 9 Beschreibung des synthetisches MLS „Ziegelwand 1949 – 1978“	54
Tabelle 10 Beschreibung synthetischer LM für den Konstruktionstyp Ziegelwand 1949 - 1978	55
Tabelle 11 Beschreibung generischer BM für das Material „Mörtel“	55
Tabelle 12 Kategorisierung der Wiederverwendung von Baustoffen	62
Tabelle 13 Steckbriefe der modellierten Verwertungsverfahren	65
Tabelle 14 Steckbrief für die modellierten Verwertungsverfahren der Stoffgruppe Ziegel.....	66
Tabelle 15 Kriterien für Handlungsoptionen	70
Tabelle 16 Einflussfaktoren für Handlungsoptionen	72
Tabelle 17 Übersicht der Inputdaten in dem GMK sowie deren Verfügbarkeit.....	79
Tabelle 18 Übersicht der Output-Daten / Ergebnisse aus dem GMK.....	84
Tabelle 19 Wesentliche Inhalte eines Gebäude-Datenblatts	85
Tabelle 20 Abbildung der allgemeinen Gebäudedaten des urbanen Stoffstrommanagements im IFC-Format	91
Tabelle 21 Abbildung der energetischen Kennwerte des urbanen Stoffstrommanagements im IFC-Format	92

Tabelle 22 Objekt-Mapping einer Wand zwischen Datenformat und IFC 4 (Eigene Darstellung in Anlehnung an Mack, T.; Scheich, P.; Koch, B.; Schebek, L., 2021)	98
Tabelle 23 Eigenschaften der unterschiedlichen Ebenen im BIM-Datenmodell	99
Tabelle 24: Objekt-Mapping einer Wand zwischen Datenformat und Autodesk Revit (Eigene Darstellung in Anlehnung an Mack, T.; Scheich, P.; Koch, B.; Schebek, L., 2021).....	112
Tabelle 25 Übersicht der ausgewählten Gebäude für die Bauakteneinsicht	124
Tabelle 26: Übersicht der Beschriftung der Gebäudepläne im Prozess Bauakteneinsicht.....	128
Tabelle 27 Übersicht der erfassten geometrische Informationen zu den Gebäuden.....	129
Tabelle 28 Modulare Bausteine der Interviews.....	135
Tabelle 29 Ämter und jeweiliger Nutzen der RSQ-Ergebnisse	144
Tabelle 30 Kommunale Herausforderungen und Chancen für die Implementierung von Konsistenzstrategien.....	144

Abkürzungsverzeichnis

BIM	Building Information Modeling
GMK	Gebäude-Material-Kataster
GIS	Geoinformationssystem
iib	Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen (TU Darmstadt)
IWKS	Fraunhofer Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie
LCA	Ökobilanz (engl: Life Cycle Assessment)
LM	Fachgebiet Landmanagement (TU Darmstadt)
RSQ	RessStadtQuartier
SuR	Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft (TU Darmstadt)
WFS	Web Feature Service

1. Einleitung

Stadtplanung stellt sich immer stärker als Planung auf der Quartiersebene dar: hier lassen sich planerische und technologische Gesamtkonzepte und ökonomische Skaleneffekte realisieren (Projektträger Jülich, 2023; BMWSB, 2023; EBC, 2023); Identifikationseffekte der Bewohner können die Umsetzung von Maßnahmen beschleunigen (Agentur für erneuerbare Energien, 2017; ILS, 2017). Gleichzeitig unterliegen städtische Quartiere in Ballungsräumen heute einem vielfältigen Veränderungsdruck durch Zuwanderung und steigende Attraktivität des Wohnens in der Stadt, aber auch durch gesellschaftliche und wirtschaftliche Veränderungsprozesse, z. B. der Rückkehr von (Klein-)Unternehmen auf Basis Industrie 4.0 in die Innenstädte. Insgesamt lässt sich eine steigende Dynamik der Umstrukturierung von Quartieren beobachten. Die Entwicklung von Planungsinstrumenten für die Quartiersebene hat daher einen sehr hohen Wert für übertragbare Lösungsmodelle.

Städtische Quartiere bündeln Stoffströme in unterschiedlicher Weise: Der **Bestand der „gebauten Umwelt“ von Quartieren** (Gebäuden und Infrastrukturen) stellt ein **Lager an Materialien** dar, die bei Sanierung, Umbau oder Abbruch frei werden und als Sekundärrohstoffe in hochwertige Verwertungskreisläufe zurückgeführt werden sollen. Die **Funktionen von Quartieren** für Wohn-, Gewerbe- oder spezifische Zwecke (z. B. Universitätscampus) **steuern Stoff- und Materialströme** in Form der Nachfrage der zur Versorgung einfließenden Stoffströme (beispielsweise energetische Versorgung) und der Abgabe der zu entsorgenden Stoffe. Gleichzeitig sind die Funktionen eines Quartiers maßgeblich für den **Aufbau neuer Lager** an Materialien beim Neubau von Gebäuden und Infrastrukturen. Die beschriebene steigende Dynamik der Quartiersplanung ist daher eine Chance für die Etablierung eines urbanen Stoffstrommanagements, das bislang nur sektoral (z. B. im Energiebereich) und eher reaktiv (z. B. Verwertungskonzept bei Abriss) stattfindet. Die gegenwärtigen Hemmnisse für ein quartiersbezogenes Stoffstrommanagement liegen z. T. im fehlenden Bewusstsein für die Möglichkeiten von Planungsprozessen zur Beeinflussung der Ressourceneffizienz, z. T. aber auch in fehlenden Informationsgrundlagen und Instrumenten zur umfassenden Bewertung der Aspekte von Ressourceneffizienz auf Quartiersebene.

1.1. Motivation und Ziel des Forschungsvorhabens

Vor diesem Hintergrund verfolgt das Projekt die Ziele, Wissens- und Informationsgrundlagen sowie praxisbezogene Instrumente für ein quartiersbezogenes Stoffstrommanagement zu entwickeln und diese im Rahmen realer Planungsprozesse zu erproben. Die Verwertung der Ergebnisse erfolgt im Bereich der wissenschaftlichen Partner in Form der Weiternutzung der methodischen Entwicklungen und der generierten Datenbestände, in Form der Verbreitung der neuen Abschlussbericht „RessStadtQuartier“

Erkenntnisse in wissenschaftlichen Publikationen sowie in der Umsetzung in die Lehre. Die Praxispartner streben die Umsetzung in wirtschaftliche nutzbare Dienstleistungen an bzw. im Bereich der Kommunen die Überführung in eine Verstetigung von wissensbasierten Planungsprozessen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz von Stadtquartieren.

Das Innovationspotential und der Neuheitsgrad des in *RessStadtQuartier* entwickelten „Werkzeugkasten Ressourceneffizienz“ soll insbesondere in der Verknüpfung von Ansätzen des Life Cycle Assessment (LCA), des Building Information Modelling (BIM) und von GIS-basierten Katastern liegen. Dies soll konzeptionell durch Verschränkung des „physischen Lebenszyklus“ mit dem „Planungszyklus“ von Quartieren erfolgen. Der „physische Lebenszyklus“ liegt der Methode des LCA zu Grunde und umfasst die Herstellungsphase, d. h. der Bau des Quartiers einschließlich der Produktion der Baumaterialien und Rohstoffen, die Nutzenphase, in der das Quartier bewohnt wird und die End-of-Life-Phase, die Abriss/Rückbau und die anschließende Entsorgung umfasst. Durch Erfassung des vollständigen Lebenszyklus wird u. a. die Bewertung von „grauer Energie“ und von Maßnahmen der Circular Economy möglich. Auf Basis des „Planungszyklus“ von Quartieren der Bauplanung bis zu Realisierung von Maßnahmen sollen die Aufgaben bzw. Entscheidungspunkte identifiziert werden, mit denen Akteure Einfluss auf den „physischen Lebenszyklus“ von Quartieren nehmen können. Auf diese Aufgaben soll der in *RessStadtQuartier* entwickelte „Werkzeugkasten“ abgestimmt werden, um so in optimaler Weise Entscheidungsunterstützung in der ganzheitlichen Sicht des Lebenszyklus zu leisten.

Die direkte Verwertung der Projektergebnisse erfolgt in den beteiligten Städten Darmstadt und Wiesbaden. Dies umfasst einerseits die Verstetigung von Planungsprozessen und die Entwicklung von Leitbildern für ein „Ressourceneffizientes Stadtquartier“, die von beiden Städten beabsichtigt sind. Darüber hinaus werden die Erkenntnisse zur Ressourceneffizienz in der Realisierungsphase der Quartiersplanung eingehen, die zeitlich im Anschluss an die Vorhabendauer erfolgt.

1.2. Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Das Vorhaben unterstützt alle drei in der Bekanntmachung genannten Wirkungsziele und entwickelt dafür geeignete Indikatoren. Das Wirkungsziel „Ressourceneffizienz in den betrachteten Stadtquartieren“ wird erreicht durch reale Planungen und Maßnahmen in den Quartieren; die notwendigen Indikatoren zur Bewertung werden innerhalb des Vorhabens entwickelt. Das Wirkungsziel „Verbesserung der informations- und wissensbasierten Entscheidungsgrundlagen“ wird durch wissenschaftliche Projektergebnisse in Verbindung mit der Integration von Entscheidungsprozessen adressiert. Das Wirkungsziel der Etablierung eines Transformationsmanagements wird durch die in beiden Städten vorgesehene aktive Mitwirkung mehrerer Bereiche der Verwaltung und die Zielsetzung der Verstetigung ermöglicht. Für alle

Wirkungsziele werden Indikatoren für ein Monitoring des Erfolgs entwickelt. Der Modellcharakter und die Übertragbarkeit werden über die Einbindung der Städte Darmstadt und Wiesbaden sichergestellt.

1.3. Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Die Realisierung der angestrebten wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele des Vorhabens erfolgt durch Kooperation der wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Partner mit den Städten Darmstadt und Wiesbaden. Die in diesen Städten ausgewählten Standorte der Quartiersentwicklung befinden sich in der Metropolregion Frankfurt Rhein-Main, die zu den vier wirtschaftsstärksten Standorten in Deutschland mit einem erwarteten Anstieg der Einwohner um knapp 9% bis 2030 gehört. Hier, wie in anderen wachstumsstarken Regionen, müssen typischerweise aufgrund knapper Flächen neue Wohnungen und Gewerbeimmobilien vorrangig durch Innenentwicklung realisiert werden. Darmstadt verfügt über Entwicklungspotenziale durch aufgegebenen Militärstandorte, während Wiesbaden Entwicklungsmöglichkeiten v.a. in den großzügig angelegten Wohnquartieren und den überalterten Gewerbequartieren der 1950er bis 1980er Jahre sieht. Die ausgewählten Fallbeispiele repräsentieren diese Konstellationen: in Darmstadt sind dies diverse Konversionsflächen, die ehemals als US-Kasernen und US-Wohngebiete genutzt wurden. Die Stadt Wiesbaden wird den Stadtbau im Bestand von Stadtquartieren aus den 1950er bis 1980er Jahren in den Mittelpunkt stellen. Derzeit sind mehrere Vorhaben in Vorbereitung, u.a. die Sanierung von Bestandsgebäuden und Punkthäusern zur Nachverdichtung (z.B. Uthmannstraße). In einem Workshop zu Beginn des geplanten Forschungsvorhabens werden diese in Bezug auf ihre unterschiedlichen Charakteristika analysiert und geeignete Vorhaben zur Abdeckung aller relevanten Aspekte der Quartiersplanung im Bestand ausgewählt. Die Städte Darmstadt und Wiesbaden repräsentieren mit den beschriebenen Fallbeispielen typische Problemstellungen von wachsenden urbanen Ballungsregionen in Deutschland, sodass sich ein hohes Übertragungspotential ergibt.

Die wissenschaftlich-technischen Arbeitsziele ergeben sich aus der übergeordneten Zielsetzung, die Dynamik und den Ablauf der Quartiersplanung zur Etablierung eines urbanen Stoffstrommanagements und der Erhöhung der Ressourceneffizienz zu nutzen. Im Einzelnen werden die folgenden wissenschaftlich-technischen Arbeitsziele verfolgt:

- Erarbeitung eines ganzheitlichen konzeptionellen Ansatzes zur Bewertung von Ressourceneffizienz und Umsetzung als Instrument eines quartiersbezogenen Stoffstrommanagements,

-
- Bereitstellung eines Gebäude-Material-Katasters zur Zusammenführung analoger und digitaler Gebäudemodelle als einheitliche GIS-basierte Planungsgrundlage für unterschiedliche kommunale Anwendungen,
 - Weiterentwicklung von BIM Modellen zu BIM-basierten Modelltypen unter Nutzung von Instrumenten zur teilautomatisierten Datengewinnung,
 - Quartiersbezogene energetische Analyse der Nutzenphase,
 - Analyse des Beitrags von Sekundärrohstoffen zur Ressourceneffizienz,
 - Integration der entwickelten Ansätze in kommunale Planungsprozesse und Erarbeitung von sektorübergreifenden Planungsinstrumenten und Informationsgrundlagen,
 - Erarbeitung konkreter Lösungsansätze für die als Fallbeispiele untersuchten Quartiere.

2. Stand der Wissenschaft und Technik

Quartierskonzepte und zugehörige Leitlinien finden sich bislang vor allem im Bereich der Energie (BMWSB ,2023; DV, 2012; Projektträger Energie; Forschungszentrum Jülich, 2013). Die Inventare von Rohstoffen im Baubereich wurden in mehreren Forschungsprojekten untersucht; (Kleemann et al., 2016; Michel et al., 2012; Wittmer, 2006; Schiller et al., 2015) bisherige Erkenntnisse sind aber zu wenig detailliert für die Nutzung in der Praxis (Schiller et al., 2010). Der flächendeckende Aufbau von Gebäudeinformationssystemen wird wegen des Umwandlungsaufwandes analoger (z. B. aus Baugenehmigungen) in digitale Daten bislang nicht umgesetzt. In Liegenschaftskatastern finden sich Grundrisse jedes Gebäudes. Wegen energetischer Aspekte sind heute auch Höhenangaben zu finden (Aringer et al., 2013). Zur Erfassung und Sicherung der Rohstoffgehalte eines Gebäudes wird das BIM empfohlen, Vorgehensweisen zur Realisierung fehlen jedoch bislang (Kiefhaber, 2015). Abbruchverfahren wurden in Bezug auf ökonomische und ökologische Aspekte für den Anwendungsfall des Hochbaus im Bestand untersucht (Motzko et al.; 2013).

2.1. Ressourceneffizienz von Quartieren

Die Thematik der Ressourceneffizienz beruht auf dem von der EU entwickelten Konzept der "natürlichen Ressourcen", das aus dem Review verschiedener, die Thematik der Ressourcen tangierenden politischen Strategien der EU entwickelt wurde (European Commission, 2002). Die Definition des Begriffs der natürlichen Ressourcen findet sich in der „Thematic Strategy on the Sustainable Use of Natural Resources (2005/2011)“ und wurde von der deutschen Politik (UBA Glossar) übernommen: *„Ressource, die Bestandteil der Natur ist. Hierzu zählen erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z. B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie die*

Biodiversität. Es ist hierbei unwesentlich, ob die Ressourcen als Quellen für die Herstellung von Produkten oder als Senken zur Aufnahme von Emissionen (Wasser, Boden, Luft) dienen.“ Dieser Definition natürlicher Ressourcen folgt auch die Richtlinie VDI 4800 Blatt 1, die erstmals ein methodisches Vorgehen zur Ermittlung der Ressourceneffizienz beschreibt. Dieses Vorgehen basiert auf einem „Lebenszyklusansatz“ der Ermittlung von Ressourcenverbräuchen auf Basis der Methodik des LCA.

Zur Thematik der Ressourceneffizienz wurde eine Vielzahl von Forschungsprojekten durchgeführt, die sich vorwiegend auf den Bereich von Produktionsprozessen und der Energiebereitstellung beziehen. Das Projekt „Indikatoren zur Messung der Ressourceneffizienz im Bauwesen“ referenziert Umweltauswirkungen des Bausektors auf Indikatoren der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie. Die Studie folgt zwar einem Lebenszyklusansatz, es werden jedoch nur stoffliche Aufwendungen bilanziert und bewertet. Die Nutzenphase der Gebäude, die vor allem durch die energetischen Anforderungen zur Strom- und Wärmeversorgung der Gebäude relevant ist, wird nicht betrachtet (BBSR et al., 2012). Ein ähnliches Konzept wird von der Kurzstudie „Systemische Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen“ verfolgt (Kaiser & Krauss, 2015). Auch hier liegt der Fokus auf der Produktions- und End-of-Life-Phase, ohne dass energetische Aufwendungen integriert mit betrachtet werden. Die „Forschungsinitiative Zukunft Bau“ des BBSR beauftragt die Beforschung von Einzelfragen des ressourceneffizienten Bauens. Bewertungsgrundlage sind hier zum einen das Denken in Lebenszyklen und zum anderen die Nutzung indikatorgestützter Bewertungssysteme. Jedoch wird der Quartiersaspekt hier nicht abgebildet. Relevante Vorteile der Konversion von Flächen zu Wohnquartieren werden so nicht betrachtet (BBSR, 2023). Im Rahmen der Forschungsinitiative „Ressourceneffiziente Stadtquartiere“ der auch dieses Projekt angehört, werden aktuell verschiedene Aspekte der Ressourceneffizienz auf Quartiersebene untersucht und Instrumente zur Erhöhung der Ressourceneffizienz im Quartier entwickelt. Die Projekte beschäftigen sich größtenteils allerdings nicht mit baulichen Stoffressourcen oder beziehen nicht den gesamten Lebenszyklus des Quartiers in Betracht (RESZ, 2023).

Es lässt sich festhalten, dass kein integrierter Ansatz besteht, der übergreifende Ressourcenfragestellungen bei der Quartiersplanung mit einbezieht als auch den gesamten Lebenszyklus indikatorgestützt auf Basis von Nachhaltigkeitszielen bewertet. Dazu nötig ist eine lebenszyklusphasenübergreifende Erfassung sowohl baulicher/stofflicher als auch energetischer Ressourcen. Zusätzlich müssen diese gegenüber einem Referenzzustand definiert werden. Dieser Schritt wird in aktuellen Studien nicht vorgenommen. Des Weiteren fehlen Daten, um den Zusammenhang zwischen stofflichen und energetischen Ressourcenverbräuchen korrekt abzubilden.

2.2. Gebäude-Material-Kataster

Die in diesem Forschungsvorhaben vorgesehene Entwicklung des Gebäude-Material-Katasters (GMK) führt verschiedene Ansätze von analoger und digitaler Gebäudemodellierung für unterschiedliche Aufgabenstellungen zusammen, die bisher zumeist nur eigenständig diskutiert und in einigen Bereichen bisher nur teilweise umgesetzt wurden bzw. werden. Hierzu gehören der Eigentumsnachweis an Gebäuden, die konstruktiven und materialbezogenen Kenntnisse der Gebäude, das Erscheinungsbild eines Gebäudes und die Umweltinformationen zu einem Gebäude.

Neben dem **Nachweis des Eigentümers** im Grundbuch werden im Liegenschaftskataster auch die Lage des Gebäudes auf dem Grundstück bezogen auf den Außenriss geführt, soweit für den Gebäudetyp eine Einmessungspflicht im jeweiligen Bundesland besteht und der Eigentümer der gesetzlichen Einmessungspflicht auch nachgekommen ist. Darüber hinaus wird im Liegenschaftskataster und möglichst übereinstimmend im Grundbuch die Nutzungsart des Gebäudes nach einem vorgegebenen Katalog geführt. Allerdings erfolgt die Aktualisierung der Nutzungsart nur innerhalb mehrjähriger Vor-Ort-Überprüfungen oder im Falle einer ergänzenden Bebauung über eine ergänzende Gebäudeeinmessung.

Zu jedem genehmigten Bauvorhaben wird eine Bauakte geführt, die über die dort abgelegten Unterlagen zur Baugenehmigung auch Informationen zu der zum Zeitpunkt der Antragstellung beabsichtigten Verwendung von Baumaterialien enthält. Ein Nachweis der tatsächlich verwendeten Baumaterialien erfolgt allenfalls dann, wenn im Zuge der Bauabnahme eine Verwendung anderer Baumaterialien festgestellt wird und dies zu einer Änderung der Baugenehmigung führt. Im Zuge der Einführung von BIM bei der Erstellung von Anträgen zu Bauvorhaben müssen für eine weitere Verwendung der Inhalte von BIM bei der nachfolgenden Nutzung, Unterhaltung sowie zukünftiger Sanierungen und Modernisierungen, die tatsächlich verwendeten Baumaterialien im BIM-Modell aufgenommen werden. Insofern kann erwartet werden, dass mit dem Einsatz von BIM zukünftig umfassendere und zutreffendere Informationen zu verwendeten Baumaterialien eines Gebäudes vorliegen werden.

Derzeit liegen in verschiedenen vor allem großen Städten bereits 3D-Darstellungen von Gebäuden (Stadtmodelle) in unterschiedlichen Level of Details (LOD) im Sinne der CityGML-Spezifikation vor. Dabei ist die Darstellung im LOD 1 (Klötzchenmodell, Gebäudeblock (Grundfläche hochgezogen)) oder im LOD 2 (3D-Modell der Außenhülle und Dachstrukturen und einfachen Texturen) regelmäßig anzutreffen, während LOD 3 (Architekturmodell, 3D-Modell der Außenhülle mit Textur) und insbesondere LOD 4 (Innenraummodell, 3D-Modell des Gebäudes mit Etagen, Innenräumen etc. und Texturen) die Ausnahme sind. Verwendete Gebäudematerialien werden hierbei allenfalls anhand einer vorhandenen Textur erkennbar. Umgekehrt kann aber aus einem entsprechend

ausgestalteten Gebäude-Material-Kataster die Ableitung eines Stadtmodells zumindest unterstützt werden.

Ergänzend zum optischen Erscheinungsbild eines Gebäudes können noch andere Messungen an Gebäuden (z.B. Thermographie) vorgenommen werden, aus denen insbesondere Rückschlüsse über die **Umwelteigenschaften eines Gebäudes** gewonnen werden können. Dies ist insbesondere

dann erforderlich, wenn keine umfassenden Kenntnisse über die verwendeten Baumaterialien vorliegen. Das optische Erscheinungsbild, ggf. ergänzt um räumliche Informationen der Umgebung, kann insbesondere für Rückschlüsse hinsichtlich der Nutzung solarer Energie genutzt werden. Aus thermografischen Aufnahmen können beispielsweise Rückschlüsse auf den Energiebedarf eines Gebäudes gezogen werden. Auswertungen der Bauakte eines Gebäudes hinsichtlich verwendeter Baumaterialien oder bei fehlenden Informationen solche ersetzende Raumlufthanalysen können Rückschlüsse auf in Baumaterialien gebundene Schadstoffe geben.

Die in diesem Forschungsprojekt vorgesehene Zusammenführung dieser Ansätze ist bisher nicht erfolgt. Sie zielt auf einen ressourceneffizienten und multifunktionalen Aufbau mit entsprechender nachfolgender Nutzung und Aktualisierung ab.

2.3. Building Information Modeling

Der Begriff des BIM beschreibt eine kooperative, digitale Arbeitsmethodik mit dem Ziel, durch eine digitale Verknüpfung der einzelnen am Bau beteiligten Disziplinen eine reibungslose und effiziente Zusammenarbeit zu ermöglichen und so eine höhere Planungs-, Termin- und Kostensicherheit bei Bauvorhaben über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks hinweg gewährleisten zu können. Den Mittelpunkt dieser Methodik stellen dabei digitale Bauwerksmodelle (BIM-Modelle) dar, die reale Bauwerke in digitalen Modellen abbilden und fachrollenspezifisch erforderliche Bauwerksinformationen über den gesamten Lebenszyklus der Gebäude zur Verfügung stellen (Egger et al., 2013).

Maßgeblich angetrieben durch den im Jahr 2015 vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur herausgegebenen und von der Initiative planen-bauen 4.0 erarbeiteten „Stufenplan Digitales Planen und Bauen“ (BMVI, 2015) schreitet die Anwendung der BIM-Methodik in Deutschland als die Methode zur Digitalisierung der Baubranche immer weiter voran. Verschiedene Normen und VDI-Richtlinien (z. B. DIN EN ISO 29481, DIN EN ISO 19650, VDI 2552) für eine standardisierte Anwendung der BIM-Methodik befinden sich in Anwendung und teilweise noch in der Ausarbeitung.

Der Fokus bei der Anwendung der BIM-Methodik und der einhergehenden Modellierung digitaler Gebäudemodelle liegt bis dato jedoch hauptsächlich auf der Planungs-, Ausführungs- und Betriebsphase (Akinade et al., 2017). Als zentrales Element der Methodik stellen BIM-Gebäudemodelle jedoch bei konsequenter und kontinuierlicher Dokumentation aller nach dem Übergang in die Betriebsphase vorgenommenen Anpassungen, z. B. bei Modernisierungs- oder Sanierungsmaßnahmen, eine bestandsnahe Repräsentation der Bauwerke dar. In dieser Form eignen sich BIM-Gebäudemodelle grundsätzlich zur Ableitung konstruktiver und materialbezogener Kenntnisse über die modellierten Gebäude, auch für Betrachtungen zum Zeitpunkt eines Rückbaus oder anderer baulicher Maßnahmen im Bestand.

In den letzten Jahren setzte sich in Praxis und Forschung die Entwicklung BIM basierter Ansätze zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden fort. Dabei stehen vor allem BIM basierte Gebäudeökobilanzen, materielle Gebäudepässe und Lebenszykluskosten im Fokus (Bartels, 2022). Deren Erstellung ist oftmals komplex und die dafür notwendigen Informationen müssen derzeit aufwendig aus unterschiedlichen, unstrukturierten Quellen verschiedener Projektbeteiligter beschafft werden, weswegen ein BIM basierter Ansatz hohe Potentiale hinsichtlich der Effizienz der Prozesse birgt. Das Forschungsvorhaben „BIMaterial“ (Kovacic et al., 2018) betrachtet sowohl BIM basierte Gebäudeökobilanzen als auch materielle Gebäudepässe während sich das Forschungsprojekt „Building as Material Banks“ (BAMB, 2018) aber auch die bereits etablierte Lösung Madaster (Madaster Germany, 2022) auf BIM-basierte materielle Gebäudepässe konzentrieren. Dabei fokussieren sich diese jedoch auf den Bau neuer Gebäude. Deren Verwendung für Bestandsgebäude ist weiterhin nur durch vor Ort Aufnahmen oder das Aufarbeiten bestehender Unterlagen und deren Überführungen in digitale Formate wie u. a. BIM-Modelle möglich. Eine teilautomatisierte Überführung von analogen Unterlagen bestehender Gebäude mit dem Ziel der Bewertung deren Nachhaltigkeit ist mit dem Forschungsprojekt "AutoBuild3D" (BMBF, 2023) erfolgt, welches die teilautomatische Generierung von BIM-Modellen aus 2D-Zeichnungen verfolgt. Die dabei gewonnenen geometrischen Informationen müssen jedoch mit dem Ziel der Nachhaltigkeitsbewertung noch um Materialinformationen erweitert werden. Neben dem Einsatz von BIM zur Nachhaltigkeitsbewertung sind mit dem Forschungsprojekt „BIM-basierter Bauantrag“ (planen-bauen 4.0, 2023) auch erste Grundsteine zur Verwendung von BIM im Rahmen eines digitalen Bauantragsprozesses gelegt.

2.4. Energetische Quartiersanalyse

In den letzten Jahren wurde die energiebezogene Gebäudebetrachtung auf einen quartiersbezogenen erweitert. Dazu zählen sowohl verschiedene Softwaretools (Modellstadt 25+ (Fraunhofer IBP, 2018), EQ-Tool (IWU, 2017)), Konzepte zur Nachhaltigkeitsbewertung (Karatas, El-Rayes, 2014; Ristimäki et al., 2013; Martini et al., 2016) und Fallstudien energetischer Abschlussbericht „RessStadtQuartier“

Quartierskonzepte. Weißmann (2017) zeigt auf, dass Quartierskonzepte die Integration von erneuerbaren Energieerzeugern vereinfachen. Gleichzeitig wird festgehalten, dass diese energetische Vorteilhaftigkeit nicht zwangsläufig für eine Kostenbetrachtung gilt (Weißmann, C., 2017). Den vorgestellten Ansätzen ist gemein, dass sie eine individuelle Modellierung eines Quartiers erfordern.

Eine am Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft verfasste Dissertation zu ökonomischen und klimatischen Effekten der quartiersbezogenen Sanierung des deutschen Gebäudebestands nutzt erstmals sog. generische Referenzquartiere, die den „Durchschnitt des unsanierten deutschen Wohngebäudebestands“ (Spielmann, 2017) abbilden. In dieser Dissertation wurden vier Typen definiert, die sich an Zeitperioden der durch die Gesetzgebung vorgegebenen energetischen Standards orientieren. Für diese Typen werden zeitlich hochaufgelöste Lastprofile für Wärme und Strom bereitgestellt. Allerdings stellen diese Typen hypothetische „homogene“ Quartiere dar und bieten keine Darstellung von „Mischformen“, wie sie in der Praxis vorkommen.

Ein weiteres Defizit bisheriger Ansätze der energetischen Analyse von Quartieren ist, dass für die ökologische Bewertung der bereitgestellten Energie Mittelwerte, bestenfalls jährlich angepasste Prognosen hinsichtlich der Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung angenommen werden. Eine Kopplung mit einem Strommarktmodell wäre eine Möglichkeit, diesem Umstand entgegenzuwirken. Interessant wäre dies besonders im Hinblick auf den erwarteten Anstieg des Marktanteils der Wärmepumpen. Hinsichtlich der stoffbezogenen Ressourceneffizienz ist beim Stand der Quartiersforschung zudem festzuhalten, dass vor allem für neuartige Technologien genutzte kritische Rohstoffe nicht mit in die Berechnung einbezogen werden. Des Weiteren wird angemerkt, dass das Nutzerverhalten und dessen Einfluss auf den Energiebedarf der Gebäude bisher nur unzureichend abgebildet werden.

2.5. Berücksichtigung von Baumaterialien in der Sanierung

Bisher spielen die in Gebäuden enthaltenen Bauprodukte nur im Zuge von Planungen zum Abbruch sowie zur Renovierung oder Modernisierung von Einzelgebäuden eine Rolle. Aus bauordnungsrechtlicher Sicht dürfen für die Errichtung, Änderung und Instandhaltung baulicher Anlagen nur Bauprodukte verwendet werden, wenn sie die Anforderungen der jeweiligen Landesbauordnung (z. B. § 16 Abs. 1 HBO) einhalten. Diese verweist auf die EU-Bauproduktenverordnung (305/2011 (EU)). Nach deren Nr. 55 sollte als Grundanforderung an Bauwerke im Sinne einer nachhaltigen Nutzung der natürlichen Ressourcen insbesondere der Recyclingfähigkeit des Bauwerks, seiner Baustoffe und Teile nach dem Abriss, der Dauerhaftigkeit des Bauwerks und der Verwendung umweltfreundlicher Rohstoffe und Sekundärbaustoffe für das Bauwerk Rechnung getragen werden. Dementsprechend wird nach dem Bauproduktengesetz vom

05.12.2012 (BGBl. I S. 2449) dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt, 2023) die Aufgabe übertragen, technischen Regeln für Bauprodukte und Bauarten aufzustellen (Bauregellisten A, B und C). Allerdings spielen dort die Wiederverwendung oder Recyclingfähigkeit allenfalls eine untergeordnete Rolle (z. B. DIN EN 13950:2014-09: Gips-Verbundplatten zur Wärme- und Schalldämmung - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 13950:2014).

Im Bauplanungsrecht wird die Verwendung von Bauprodukten in Gebäuden als umweltbeachtlicher Belang im Sinne des § 1 Abs. 6 Nr. 7 BauGB dort nicht ausdrücklich erwähnt. Eine Vermeidung von zukünftigen Abfällen durch Verwendung geeigneter Bauprodukte bei der Errichtung neuer bzw. dem Umbau vorhandener Gebäude ist nämlich, im Gegensatz zum sachgerechten Umgang mit Abfällen (§ 1 Abs. 6 Nr. 7 lfd. Ziffer f), nicht explizit genannt, sondern kann nur unter sonstigen, gesetzlich nicht explizit genannten Aspekten subsumiert werden. Dementsprechend spielt dieser Aspekt aus bauplanungsrechtlicher Sicht in der Beurteilung von Inhalten neuer Bebauungspläne bisher auch in der Praxis keine Rolle. Überlegungen, vorhandene Baumaterialien als umweltbeachtlichen Aspekt in die Abwägung zu Festsetzungen eines Bebauungsplans einzubeziehen, sind nicht bekannt.

Die Inventare von Rohstoffen im Baubereich wurden in mehreren Forschungsprojekten untersucht (Kleemann, et al., 2016; Michel et al., 2012; Wittmer, 2006; Schiller, et al., 2015); bisherige Erkenntnisse sind aber zu wenig detailliert für die Nutzung in der Praxis und in planerischen Prozessen (Lederer et al., 2016). Abbruchverfahren wurden in Bezug auf ökonomische und ökologische Aspekte für den Anwendungsfall des Hochbaus im Bestand untersucht (Motzko et al., 2013). Ein geschlossenes Bewertungsmodell für die gesamte End-of-Life-Phase existiert bislang nicht für den in der ersten Projektphase erreichten Detaillierungsgrad.

2.6. (Gemeinsame) Vorarbeiten

Das **Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft (SuR)** entwickelte im Projekt „LernRess“ eine Methodik zur Ermittlung von Ressourceneffizienz in der Produktion, die an Indikatoren der dt. Nachhaltigkeitsstrategie anschließt (FKZ: TI0011/2014-8/0575/71105845). Dieses Vorgehen wurde schließlich im vom VDI geförderten Projekt „Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0“ genutzt und weiterentwickelt (Abele et al., 2017).

Im Verbundvorhaben SWIVT: Siedlungsbausteine für bestehende Wohnquartiere – Impulse zur Vernetzung energieeffizienter Technologien (FZK 03ET1376C) wird die Verbesserung der Energieeffizienz von Quartieren an einer exemplarischen Siedlung des Bauvereins der Stadt Darmstadt mittels integrierter Analyse und Bewertung verschiedener innovativer Systemkomponenten und Sanierungsstrategien untersucht. Das Fachgebiet SuR ist für die Erstellung der ökologischen Bestandsanalyse, die Erstellung von Ökobilanzen der

Systemkomponenten von Gebäuden und innerhalb der Siedlung bis hin zur kombinierten ökologisch-ökonomischen Bewertung der entwickelten Sanierungsszenarien verantwortlich. In der Umsetzungsphase SWIVT 2 ist das Fachgebiet SuR u. a. für den ökologischen Prognoseabgleich, d. h. die Validierung der prognostizierten ökologischen und ökonomischen Werte, und die ökologische Skalierungsanalyse zuständig.

In einer Dissertation (Graduiertenschule Energy Science and Engineering) wurden Potentiale der Energieeffizienz auf Quartiersebene untersucht (Spielmann, 2017).

Im Hinblick auf die Fragestellungen des Forschungsvorhabens sind vor allem die Projekterfahrungen des Fachgebiets SuR aus den Bereichen Urban Mining, Kreislaufwirtschaft und dem Baubereich generell von Interesse. Eine langjährige Zusammenarbeit besteht mit der Wissenschaftsstadt Darmstadt, insbesondere dem EAD (Eigenbetrieb Abfallentsorgung Darmstadt) und dem Bauverein (Immobilien dienstleister der Wissenschaftsstadt Darmstadt). Im Rahmen von mehreren Forschungsk Kooperationen wurden die vorhandenen Probleme der Darmstädter Abfallbewirtschaftung identifiziert und Strategien entwickelt, die vorhandenen Wertstoffe, im Sinne einer nachhaltigen Ressourcennutzung, zu erschließen und zu verwerten und vorhandene Behandlungsprozesse zu optimieren. Hierbei wurden neben der Untersuchung der Abfallzusammensetzungen von Restabfällen, Wertstoffen (Kunststoffverpackungen, Papier, Pappe und Kartonage) und Abfällen aus öffentlichen Sammelbehältern auch Umweltbewusstseinsuntersuchungen durchgeführt.

Das **Fachgebiet Landmanagement (LM)** forscht bereits seit einigen Jahren an der Erfassung des Baumaterials in vorhandenen Gebäuden sowie in der Baulandentwicklung und der Bauleitplanung. Da Baumaterialien aus vorhandenen Gebäuden regelmäßig nur dann verfügbar werden, wenn die Eigentümer:innen dieser Gebäude sich zu einem Abbruch entschließen, entwickelte LM im abgeschlossenen BMBF-Projekt „AktVis“ (Förderkennzeichen 033L188A, 2017-2019) gemeinsam mit Partnern Strategien zur Aktivierung von Bürger:innen und Immobilieneigentümer:innen in Ortskernen ländlicher Räume zur Umsetzung von Innenentwicklungsprojekte (u. a. unter Entwicklung von 3D-Visualisierungen von Gebäuden und Umbauszenarien) (Dettweiler et al., 2017a, 2017b). Weiterhin berät das Fachgebiet, in Kooperation mit dem Kompetenzzentrum Innenentwicklung (Diedrichsen, 2023) und den dort involvierten Partnern, Städte und Gemeinden (z. B. Alsfeld, Bad Homburg v. d. Höhe, Oberursel (Taunus), Dieburg, Michelstadt) im gesamten Prozess der Baulandentwicklung, d. h. von der Identifizierung und Analyse des Entwicklungsbedarfs über die Erstellung von Bauleitplänen einschl. Bürgerpartizipation und die bodenordnerische sowie erschließungstechnische Umsetzung (Linke, 2016).

Inhaltlich mit diesem Forschungsprojekt eng verbunden ist das vom FG LM koordinierte BMBF Verbundvorhaben „Wiederverwendung Baumaterialien innovativ (WieBauin)“, an dem auch das FG

SuR beteiligt ist. Die parallele Bearbeitung beider Projekte mit unterschiedlichen Ansätzen bietet diverse Synergien.

Das **Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen (IIB)** beschäftigt sich bereits seit geraumer Zeit mit der digitalen Beschreibung und Modellierung der gebauten Umwelt. Insbesondere auf dem Gebiet des BIM und den damit verbundenen Technologien (z. B. Industry Foundation Classes (IFC), ISO 16739) besitzt das IIB, auch als Gründungsmitglied der buildingSMART-Regionalgruppe „Rhein-Main-Neckar“, fundierte Kenntnisse, unterstützt durch Erfahrungen aus der Praxis. Im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsprojekts SolConPro (BMW, FKZ 03ET1290C) trägt das IIB, ergänzend mit seinen Erfahrungen auf dem Gebiet des Semantic Web (z. B. Ontologien), zu einer Weiterentwicklung der BIM-Methodik zur Integration energetisch aktiver Fassadenkomponenten in Bauprozessen bei (Leifgen et al., 2016).

Hinsichtlich der Betrachtung BIM-basierter digitaler Urban Mining Prozesse wurden im Rahmen einer Dissertation am Institut bereits Ansätze für eine Erfassung ausgewählter Materialien und deren Mengenermittlung in Wohngebäuden untersucht und beispielsweise Graphen-basierte Methoden zur Ableitung der Lage elektrischer Leitungen erarbeitet (Petkova, 2016; Petkova et al., 2014). Das IIB besitzt zudem Forschungskennnisse auf weiteren Anwendungsgebieten der BIM-Methodik, wie beispielsweise der Integration von BIM und RFID-Sensortechnologie in Bauprozesse zum Thema „Smart Buildings“ oder der Erforschung BIM-basierter Ansätze für den Brandschutz (Rüppel et al., 2015; Bredehorn et al., 2015). Forschungsarbeiten im Rahmen eines Projekts zur Steigerung der Motivation für energieeffizientes Verhalten von Nutzenden durch Serious Gaming und maschinelle Lernmethoden (SmartER Game; BMUB+BBSR, ZukunftBau, SWD-10.08.18.7-14.21) beschäftigen sich u. a. mit einer mehrwertbringenden Kombination heterogener Datenquellen und typologischer Informationen zur Ableitung energetischer Gebäudemodelle für den Einsatz in Energiesimulationen (Schwöbel & Irmeler, 2015; Irmeler et al., 2016a; 2016b). Auch auf dem Gebiet der digitalen Bestandserfassung („ScanToBIM“) besitzt das IIB Erfahrungen aus abgeschlossener Forschung im Rahmen von Arbeiten zur Erfassung von Gebäudegrundrissen vor Ort mithilfe mobiler Endgeräte und darauf aufbauenden BIM-Modellen. (Franz et al., 2017; Möller, 2017)

Im Rahmen der Forschungsinitiative „ZukunftBau“ des BMUB und BBSR wurde über sechs Jahre die Entwicklung von Smart Buildings mit BIM und der Sensortechnik RFID in den Projekten „Kontextsensitives RFID-Leitsystem zur Navigation und Ortung von Einsatzkräften in Gebäuden (Z6-10.08.18.7-07.30)“, „RFID-Wartungs-Leitsystem Brandschutz (SF-10.08.18.7-09.9)“ und „BIM basiertes Bauen mit RFID (SWD-10.08.18.7-12.03)“ erforscht. Die Kombination von BIM und Sensorik zur Erhöhung der Sicherheit auf Baustellen wurde im DFG-Projekt „iSAM: Integratives Safety-Awareness-Modell zur Vermeidung von Unfällen auf Baustellen (RU 832/9-1)“ erforscht.

Ein weiterer Schwerpunkt stellt die Untersuchung neuer digitaler Ingenieurmethoden zur zivilen Sicherheit (Civil Safety Engineering) dar. Beispielsweise wird seit 2016 im Rahmen des von der DFG geförderten Graduiertenkollegs KRITIS („Kritische Infrastrukturen: Konstruktion, Funktionskrisen und Schutz in Städten“, DFG GRK 2222) die Erforschung digitaler Methoden zur Modellierung, Simulation und Analyse kritischer Infrastrukturen für interdisziplinäre ingenieurtechnische Sicherheitsbetrachtungen im städtischen Kontext, hier vom Übergang Gebäude in BIM zum Stadtmodell in GIS, gefördert.

Die **Fraunhofer-Einrichtung IWKS** führt zahlreiche Forschungsprojekte zu Wertstoffkreisläufen durch und ist ausgewiesen auf dem Gebiet der ganzheitlichen Modellierung von Recyclingprozessen und Kreislaufsystemen.

Aktuell werden in öffentlich geförderten Forschungsprojekten sowie in Industrieprojekten Technologien zur Rückgewinnung spezifischer Zielwertstoffe entwickelt und parallel die Methode der Ökobilanzierung zur Bewertung potentieller Umweltauswirkungen angewendet. Das BMBF-geförderte Projekt „MinSEM - Konzept zur Rückgewinnung von Seltenerdelementen sowie Platingruppenmetallen aus mineralischen Aufbereitungs- und Produktionsrückständen“ (FKZ 033R141G, 2015-2018) adressiert beispielsweise Recyclingtechnologien zur Verwertung von metallurgischen Schlacken und optischen Gläsern. Im ebenfalls BMBF-geförderten Projekt „RECVAl-HPM - Innovative RE-use and reCycling VALue chain for High-Power-Magnets“ (FKZ 033RF002A, 2014-2017) ging es um Verwertungswege für seltenerdhaltige Permanentmagnete. Für Industriekunden wurden darüber hinaus in mehreren Projekten Recyclingtechnologien und -konzepte recherchiert und bewertet. Hier wurde neben Aspekten der Kritikalitätsbewertung ebenfalls die Methode der Ökobilanzierung angewendet. Innerhalb des IWKS besteht eine besonders enge Kooperation zwischen den Abteilungen, wodurch technologische Kompetenz und systemanalytische Erfahrung gebündelt vorliegen. Die Fraunhofer-Einrichtung IWKS ist über zahlreiche Forschungsarbeiten zur Schließung von Wertstoffkreisläufen hinaus in überregionale und regionale Netzwerke zur Steigerung der Ressourceneffizienz eingebunden, z. B. in den Ressourcen-Cluster Rhein-Main.

Die Firma **UMGIS Informatik GmbH** entwickelt seit vielen Jahren datenbankbasierte Geoinformationssysteme für die Bereiche Umwelt, Planungen und Infrastruktur. Im Umweltamt der Landeshauptstadt Wiesbaden wird seit 2002 das ämterübergreifende Umwelt-Fach-Informationssystem (UFIS) aufgebaut, welches regelmäßig bei mehr als 30 Mitarbeiter:innen im Einsatz ist. Es basiert auf amtlichen Liegenschaftsinformationen und Luftbildern verschiedener Jahrgänge und hat die amtlichen Geobasisdaten und Geofachdaten der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG) und die amtlichen Geofachdaten des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) integriert. Das bereits umgesetzte

GMK für die Landeshauptstadt Wiesbaden ist in UFIS integriert. Das für die Wissenschaftsstadt Darmstadt erstellte GMK ergänzt bereits vorliegende von UMGIS erstellte datenbankbasierte Geo-Fachlösungen für z. B. die Grundstücksbewertung, die Kaufpreissammlung und die Ermittlung der Niederschlagswassergebühr.

Amtliche Liegenschaftsdaten und digitale Orthofotos wurden für die Projektpartner Stadt Bensheim, Gemeinde Münster (Hessen) und Gemeinde Otzberg aus anderen Projekten von UMGIS bereits aufbereitet und können für die zu erstellenden GMK genutzt werden.

Die **Wissenschaftsstadt Darmstadt (DA)** ist an mehreren Forschungsprojekten beteiligt. Im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts „Transformative Strategien einer integrierten Quartiersentwicklung“ (TRASIQ2) wird die transformative Entwicklung von Bestandsquartieren mittels eines transdisziplinären Partizipationsformats in den Fokus genommen. Ferner wirkt die Stadt an zwei Forschungsprojekten im Bereich Mobilität (NaMoLi II und QuartierMobil II) und einem im Themenfeld Biodiversität (BiodiWert II) mit.

Die Wissenschaftsstadt Darmstadt liegt an der Schnittstelle zwischen den Metropolregionen Rhein-Main und Rhein-Neckar. Diese Lage bietet hervorragende Voraussetzungen, stellt die Stadt aufgrund der bestehenden Verflechtungen und der hohen Dynamik aber vor umfangreiche Herausforderungen.

Darmstadt ist eine Stadt mit Erfahrung für Veränderungen und stand in ihrer Geschichte oft vor großen Transformationsprozessen: Der Wiederaufbau, der ökonomische Strukturwandel der 1990er-Jahre oder die Konversion ehemaliger militärisch genutzter Flächen durch den Abzug der amerikanischen Streitkräfte Ende 2008. Zur Steuerung künftiger Entwicklungen hat die Stadt im Juni 2020 eine räumliche Entwicklungsstrategie beschlossen: Der Masterplan DA 2030+ ist das Ergebnis eines umfassenden Prozesses mit intensiver Beteiligung der Bürgerschaft.

Stadtumbau im Bestand war und ist ein wesentliches Planungselement in Darmstadt. Aktuell sind der Umbau der Lincoln-Siedlung für 5.000 Menschen und die Planungen für das Ludwigshöviertel (ehemals Cambrai-Fritsch-Kaserne/Jefferson-Siedlung) für ca. 3.000 Menschen Beleg und Anspruch für eine nachhaltige Quartiersentwicklung. Beide Projekte stehen beispielgebend für die wohnungsbaupolitischen Zielsetzungen der Stadt, qualitativen und bedarfsgerechten Wohnraum für alle zu schaffen.

Vor dem Hintergrund des anhaltenden Wachstums muss sich Darmstadt u. a. auch der Nachfrage nach neuen gewerblichen Flächen stellen. Um dafür mögliche Entwicklungspotenziale auszuloten, wird im Norden des Stadtgebietes derzeit die Durchführung einer möglichen städtebaulichen Entwicklungsmaßnahme vorbereitet.

Die **Landeshauptstadt Wiesbaden (WI)** engagiert sich schon seit einiger Zeit im Bereich der nachhaltigen Stadtentwicklung. Das Forschungsprojekt „KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz – Stadtklima in der kommunalen Praxis“ wurde bereits erfolgreich abgeschlossen. Hier erfolgten in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD), der Landeshauptstadt Wiesbaden, der Landeshauptstadt Mainz, dem Landesamt für Umwelt, Rheinland-Pfalz, dem Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen und dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie/Fachzentrum Klimawandel und Anpassung Untersuchungen des gegenwärtigen und zukünftigen Stadtklimas, die Ermittlung des Handlungsbedarfs sowie die Formulierung von Empfehlungen für die kommunale Praxis. Darüber hinaus wurde 2015 das erste Wiesbadener Klimaschutzquartier entwickelt. Mit dem hier erarbeiteten integrierten Quartierskonzept entsteht die Möglichkeit, modellhafte Lösungsansätze im Bereich Energieeffizienz und Gebäudesanierung für die historischen Gebäudebestände Wiesbadens zu erarbeiten. Die Entwicklung nachhaltiger, ressourceneffizienter Stadtquartiere gewinnt in der Stadtplanung, gerade auch angesichts des ausgerufenen Klimanotstandes, immer mehr an Bedeutung.

Um die angestrebte Klimaneutralität zu erreichen, bedarf es verstärkter Bemühungen CO₂-Reduktionen zu erzielen. Der Gebäudesektor spielt hierbei eine große Rolle, sodass sich aus den Erkenntnissen des Forschungsprojektes eine Unterstützung zur Zielerreichung erhofft wird.

Die Landeshauptstadt Wiesbaden hat als Konsortialpartner bereits in der Forschungs- und Entwicklungsphase von RessStadtQuartier zu der Entstehung der Tools im „Werkzeugkasten Ressourceneffizienz“ beigetragen. Insbesondere bei der Identifizierung von Anwendungsmöglichkeiten einzelner Tools und der Ausarbeitung von Anforderungsbedarfen. Somit ist mit dem Tool LC-Quartier bereits ein anwendungsnahes Instrument entstanden, das direkt in den alltäglichen Arbeiten des Umweltamts integriert werden kann. Daher wird die Stadt Wiesbaden in der Umsetzungsphase als assoziierter Partner an den weiteren Arbeiten teilnehmen.

Gemeinsame Vorarbeiten

FG SuR, FG LM und weitere Partner untersuchten im BMBF-Projekt „PRRIG“ (FKZ 033R100A, 2013-2016) die Rohstoffinventare des Industrie- und Gewerbegebäude-Bereichs, dessen Ergebnisse unmittelbar als Vorarbeiten zum hier geplanten Vorhaben genutzt werden. U. a. wurde ein Konzept für ein flächendeckendes Gebäudekataster exemplarisch erprobt und Rohstoffgehalte von Gewerbegebäuden ermittelt.

Dieser Ansatz wird in dem durch das FG LM geleitete BMBF-Projekt „WieBauln“ (2018-2023) u. a. gemeinsam mit FG SuR um die Entwicklung eines Geschäftsmodells zur Wiederverwendung von Bauprodukten in einer Stadt-Land-Beziehung ergänzt. Hier wird das Konzept des

Gebäudekatasters aus dem Projekt PRIGG zu einem GMK mit dem Ziel der Wiederverwendung von Bauprodukten weiterentwickelt und praktisch erprobt.

2.7. Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Es wurden keine FE-Ergebnisse bekannt, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

3. Verwendung der Zuwendung

3.1. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises zur Verwendung der Zuwendung

Für die komplette Projektlaufzeit waren die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises die Personalausgaben. Im Folgenden sind die Gesamtkosten aufgelistet:

- Beschäftigte E12-E15: 775.181,94 €
- Sonst. Beschäftigungsentgelte: 67.523,50 €

3.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um ein erfolgreiches Abschließen des Projektes und der gesetzten Projektziele zu gewährleisten. Die hierfür geplanten und aufgewendeten finanziellen Ressourcen waren notwendig und für das Projekt angemessen. Trotz der Herausforderungen der Corona-Pandemie wie nationale Lockdowns und Kontaktbeschränkungen konnte das Projekt nach einer kurzen Anpassungsphase und Umstellung auf digitale Videokonferenzsysteme und Medien mit einer halbjährlichen Verzögerung erfolgreich abgeschlossen werden, ohne zusätzliche finanzielle Ressourcen zu benötigen.

Die Projektergebnisse und deren Verwertbarkeit werden im Folgenden vorgestellt.

4. Methodisches Vorgehen zur Bewertung der Ressourceneffizienz von Quartieren

4.1. Grundlagen und Nomenklatur

Als gemeinsame Grundlage synonyme Begriffe und zum Zusammenführen von Nomenklaturen der unterschiedlichen Disziplinen wurde ein MediaWiki (im Folgenden als Wiki bezeichnet) erstellt. Dieses dient den Projektpartnern als gemeinsame arbeitspaketübergreifende Wissensgrundlage. Im Rahmen des Wikis werden die in den einzelnen Disziplinen identifizierten Nomenklaturen, synonyme Begrifflichkeiten, Beziehungen und bestehende Wissensstände in einer digitalen Ontologie zusammengeführt, sodass diese in formaler und für Maschinen interpretierbarer Form vorliegen.

Der Begriff „Quartier“, auch Stadtviertel, Stadtquartier oder Wohnviertel, stammt aus der Disziplin „Stadtaufbau und Baukonstruktion“ und wird innerhalb von RessStadtQuartier folgendermaßen definiert:

- sozialen Raum,
- besteht aus mehreren flächenmäßig zusammenhängenden privaten und/oder öffentlichen Gebäuden (einschl. öffentlicher Infrastruktur),
- Gebiet unterhalb der Stadtteilgröße.
- Das Gebiet wird durch seine Bewohner definiert und ist unabhängig vom Gebiet eines Stadtteils oder Stadtbezirks.

Die Bewertung der Ressourceneffizienz beruht auf der Definition von Ressourceneffizienz nach VDI 4800:

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Aufwand}}{\text{Nutzen}}$$

Im Kontext der Ressourceneffizienzbewertung bezieht sich der Aufwand auf die natürliche Ressource. Natürliche Ressourcen sind definiert als:

- “Ressource, die Bestandteil der Natur ist; hierzu zählen erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z.B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie Ökosystemleistungen und Biodiversität.“ [in Anlehnung an KOM (2005) 670: Thematische Strategie zur Nutzung natürlicher Ressourcen]

Im Kontext der Wohnquartiere bezieht sich der Nutzen auf die Wohnraumbereitstellung. Eine höhere Ressourceneffizienz ergibt sich demnach entweder aus der Erhöhung der Wohnraumbereitstellung, der Reduktion des Ressourceneinsatzes oder einer Kombination hieraus. Eine höhere Auslastung von Wohnraum oder die Betrachtung von Suffizienz ist nicht Teil des Betrachtungsgegenstandes dieses Forschungsthemas. Demnach ergibt sich eine höhere Effizienz durch einen geringeren Einsatz an natürlichen Ressourcen. Dies beinhaltet eine Verminderung des Ressourcenbedarfs aber auch eine Verminderung der mit dem Einsatz von Rohstoffen verbundenen Umweltwirkungen (wie z.B. Treibhausgasemissionen).

Für die Bewertung der Ressourceneffizienz wird eine Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040/44 durchgeführt. Hierfür werden unterschiedliche Zustände definiert und miteinander verglichen:

- Ausgangszustand: Bestandsquartiere unsaniert bzw. teilsaniert

- Referenzzustand: Sanierung von Einzelgebäuden im Quartier nach aktuellem Stand der Technik (nach GEG und KfW-Standards)
- Zielzustand: („nahezu“) klimaneutrale Quartierssanierung

Innerhalb des Wikis werden weitere Begriffe aus den folgenden Disziplinen/Bereichen definiert:

- Bauinformatik
- Bau- und Planungsrecht
- Sekundärbaustoffe, Rückbau und Verwertung

4.2. Quartiers- und Gebäudetypologie und Datengrundlage

Die Entwicklung einer Quartierstypologie basierend auf generischen Quartierstypen zielt auf der Abbildung eines durchschnittlichen deutschen Wohngebäudebestands auf Quartiersebene ab. Als Basis hierzu wurde zunächst eine Gebäudetypologie mit 20 synthetischen Gebäudetypen entwickelt, wobei der Begriff „synthetisches Gebäude nach der Bauwerksdaten-Definitionen des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR, 2023) als Repräsentant, „typischer Vertreter einer Gebäude-Gruppe“, definiert wird und „den Durchschnitt der im jeweiligen Bauzeitraum üblichen Gebäude- und Wohnungsgrößen, Baukonstruktionen sowie verwendeten Materialien widerspiegelt“ (IÖR, 2023). Innerhalb von RSQ wurden 20 synthetische Gebäudetypen nach Gebäudeklasse und Baualterklasse definiert (Tabelle 1). Weitere Merkmale zu Flächenangaben (z.B. Grundflächen) oder energetischen Informationen (z.B. Beheizungsstruktur oder Sanierungsstand) wurden für die 20 synthetischen Gebäudetypen in Steckbriefen festgelegt. Basierend auf diesen Gebäudetypen werden unter 6.3.1 eine Quartierstypologie entwickelt. Diese dient in den folgenden entwickelten Werkzeugen zunächst als Datenbasis für den Fall, dass Realdaten nicht zur Verfügung stehen. Der Vorteil ist, dass der Werkzeugkasten auch mit einer geringen Datenbasis anwendbar ist und stückweise mit realen Daten erweitert werden kann.

Tabelle 1 Einteilung der 20 synthetischen Gebäudetypen in RSQ

	Vor 1948	1948 - 1978	1979 - 1994	1995 - 2009	Nach 2009
Einfamilienhaus	SG1.1	SG2.1	SG3.1	SG4.1	SG5.1
Zwei- familienhaus / Reihenhaus	SG1.2	SG2.2	SG3.2	SG4.2	SG5.2
Kleines Mehrfamilien- haus	SG1.3	SG2.3	SG3.3	SG4.3	SG5.3
Großes Mehrfamilien- haus	SG1.4	SG2.4	SG3.4	SG4.4	SG5.4

4.3. Werkzeugkasten für Ressourceneffizienz

Innerhalb RessStadtQuartier wurde eine umfassende Analyse kommunaler Planungsaufgaben in Kooperation mit den beteiligten Kommunen und unter Auswertung der Fallstudien vorgenommen. Mehr Informationen hierzu sind in Kapitel 10 zu finden. Auf dieser Grundlage wurden die einzelnen Module für einen „Werkzeugkasten Ressourceneffizienz“ konzipiert und softwaretechnisch als Pilotversion implementiert. Tabelle 2 stellt die Module im Überblick dar, gibt die in der Analyse kommunaler Planungen als relevant identifizierten Aufgaben an und ordnet die Module Solution Readiness Levels (SRL) zu. Die einzelnen Module, das methodische Vorgehen bei der Entwicklung und deren Anwendung werden in den Kapiteln 6-9 vorgestellt.

Tabelle 2 Übersicht der Module mit Solution Readiness Level des entwickelten „Werkzeugkasten Ressourceneffizienz“

Modulbezeichnung SRL	Beschreibung	Anwendung
LC-Quartier-Tool SRL 6	<p>LC-Quartier ist ein lebenszyklusbasiertes Berechnungstool für Klimagasemissionen, kumulierten Energieaufwand, biotischen und abiotischen Ressourcenverbrauch sowie Flächenverbrauch für Wohnquartiere. Es basiert auf „synthetischen Quartieren“ für generische Berechnungen. Die hinterlegten Default-Daten können in Planungsprozessen sukzessiv durch Realdaten ersetzt werden bzw. durch Schnittstellen zu dem GMK eingepflegt werden. LC-Quartier besteht aus drei Teil-Modulen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Accounting: Status-Quo Ermittlung der Klima-/Ressourceneffizienz der Nutzenphase von Bestandsquartieren - Sanierung: Evaluation von Sanierungsvarianten über den gesamten Lebenszyklus hinsichtlich ihrer Ressourceneffizienz und 	<p>Anwender:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kommunen <p>Planungsaufgaben:</p> <ul style="list-style-type: none"> - CO2-Bilanzen in Umweltberichten - Maßnahmen- und Kennwertentwicklung für Klimaschutzkonzepte - Stellungnahmen zu Bauvorhaben - Sanierungsberatung für Gebäudeeigentümer:innen

	<p>Identifizierung optimaler Varianten für konkrete Sanierungsvorhaben.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Neubau: Bewertung von Neubauplanungsszenarien hinsichtlich ihrer Ressourceneffizienz über den gesamten Lebenszyklus 	
<p>Materialdatenbank SRL 4-5</p>	<p>Die Materialdatenbank ist eine systematische Sammlung zu Rohstoffinventaren mit folgenden Elementen und bildet die Datenbasis für die Auswertungen der zuvor beschriebenen Tools:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Beschreibung der Zusammensetzung von Bauteilen, Bauteilschichten, Baustoffen und Rohstoffen und deren Zusammenhänge - Datensätze für synthetische Bauelemente, die den identifizierten Gebäudetypologien zugeordnet sind <p>Die Datenbank bietet die Möglichkeit, Realdaten auf beliebiger Stufe zu integrieren bzw. fehlende Realdaten durch synthetische Daten zu ersetzen</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Datengrundlage für Informations- und Berechnungswerkzeuge
<p>Circular-Modul SRL 5</p>	<p>Das Circular-Modul ist ein Informations- und Bewertungstool zur Analyse des Beitrags von Sekundärrohstoffen zur Ressourceneffizienz. Es ist als weiteres Teil-Modul für LC-Quartier oder als eigenständiges Tool nutzbar und hat die folgenden Funktionen:</p>	<p>Anwender:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kommunen - Bauherren, Planer <p>Planungsaufgaben:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bewertung von

	<ul style="list-style-type: none"> - Berechnung des Treibhausgas- und Ressourceneinsparpotenzials verschiedener Maßnahmen des Rückbaus und Recyclings von Abfällen aus Sanierung und Abbruch bis hin zur Aufbereitung zu Sekundärmaterial - Identifizierung optimaler Verwertungsvarianten 	<p>Kreislaufmaßnahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Planung von Abbruchvorhaben
<p>Gebäude-Material-Kataster (GMK^{®1}) SRL 6</p>	<p>Das GMK ist ein GIS-basiertes Tool zur Kategorisierung von Wohngebäuden und zur Ermittlung der darin zu erwarteten Baustoffarten und –mengen. Dieses vereint amtliche Geodaten und synthetische gebäudebezogene Daten. Mittels praxiserprobter Algorithmen werden alle Wohngebäude nach Gebäudetypen und Baualtersklassen kategorisiert und anschließend mit Attributen aus den anderen Tools/Modulen ergänzt.</p> <p>Dank der Integration der Materialdatenbank ermöglicht das GMK die Auswertung von Baustoffarten und –mengen auf der Gebäude- und Quartiersebene. Eine bidirektionale Schnittstelle zum BIM ermöglicht zum einen die für die BIM-Rekonstruktion erforderlichen Informationen aus dem GMK zu entnehmen, zum anderen auch die präzisierten Angaben zum Gebäude in das GMK zurückzugeben.</p>	<p>Anwender:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kommunen - Immobilieneigentümer:innen <p>Planungsaufgaben:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erfassung der im Gebäude enthaltenen Baustoffarten und –mengen - Entscheidungsunterstützung zu ressourcensparenden Sanierungsmaßnahmen

¹ UMGIS Informatik GmbH: Wortmarke „GMK“: Deutsches Patent- und Markenamt, Registernummer: 30 2023 202 590, Anmeldetag: 20.01.2023

<p>RSQ-BIM-Viewer (RessStadtQuartier-Building Information Modelling-Viewer) SRL 6</p>	<p>- Der RSQ-BIM-Viewer erlaubt die Analyse der Materialinventare einzelner Gebäude und deren Bauteile in einem teilautomatisierten rekonstruierten BIM-Modell. Dieses vereint geometrische und synthetische materialbezogene Daten. Die bidirektionale Schnittstelle zum GMK ermöglicht zum einen die für die Rekonstruktion erforderlichen Informationen aus dem GMK zu entnehmen, zum anderen auch die präzisierten Angaben zum Gebäude in das GMK zurückzugeben. Das BIM-Modell ermöglicht die Auswertung von Baustoffarten und –mengen auf der Gebäude- und Bauteilebene. Weitere eingebundene Schnittstellenformate wie das IFC geben die Möglichkeit weitere Verwendungen des BIM-Modells offen zu halten.</p>	<p>Anwender:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gebäudeeigentümer:innen - Planer <p>Planungsaufgaben:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Quantifizierung von Baumaterialien im Gebäude
--	---	---

5. Ergebnisse und Verwertbarkeit

In den nächsten Kapiteln werden die entwickelten Module des Werkzeugkastens aus Tabelle 2 und deren Verwertbarkeit beschrieben.

Über die Entwicklung der Module des Werkzeugkastens hinaus wurden die folgenden Ergebnisse erzielt:

- Erarbeitung konkreter Lösungsansätze für die als Fallbeispiele untersuchten Quartiere: Für das Untersuchungsquartier Ludwigshöhviertel/Darmstadt wurden Neubauvarianten hinsichtlich der Kombination von Gebäudekonstruktion, Baustandard und Energiekonzept durchgeführt und im Ergebnis eine Variante für den Neubau empfohlen. Für das zu sanierende Untersuchungsquartier Biebrich-Mitte in Wiesbaden wurden verschiedene

Kombinationen aus passiver Sanierung der Gebäude und der Bereitstellung von Wärme und Strom untersucht.

- Entwicklung einer Quartierstypologie/Synthetische Quartiere: Um bereits zu Beginn einer Sanierungsplanung erste valide Aussagen trotz fehlender realer Daten treffen zu können, wurden sogenannte synthetische Quartiere auf Basis einer Quartierstypologie entwickelt. Die zu untersuchenden Quartiere können anhand der Baualtersklasse der Gebäude, der Bebauungsdichte und der Quartiersgröße in die Typologie eingeordnet werden. Somit können auf Basis von generischen Daten der Energiebedarf im Quartier sowie die verbauten Materialien abgeschätzt werden und grundlegende Aussagen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz getroffen werden.
- Erarbeitung von Leitlinien und Handlungsbausteinen als Grundlage eines zukünftigen Leitfadens: Für kommunale Verwaltungsträger wurden Leitlinien und Handlungsbausteine entwickelt. Die Leitlinien stellen die rechtlichen Leitplanken für die kommunale Bauleitplanung dar. Mithilfe städtebaulicher Instrumente wie Bebauungspläne, Satzungen und städtebaulicher Verträge können Festsetzungen getroffen werden, die die Anforderungen der eigenen Konsistenzstrategie erfüllen, gleichzeitig aber auch technische, wirtschaftliche und rechtliche Vorgaben einhalten. Weiterhin dienen die Leitlinien dem Prozessmanagement, um alle an Vorhaben beteiligten Akteure einzubinden und Akzeptanz für die Thematik zu schaffen. Die Handlungsbausteine werden individuell für die zu entwickelnden Stadtquartiere zusammengesetzt und zeigen die aus ökobilanzieller Sicht effizienteste Strategie bei der Weiterentwicklung der Quartiere auf. Sie geben zudem Hinweise zur Modernisierung bzw. Umnutzung von einzelnen Gebäuden.

Über die direkten Projektarbeiten hinaus erfolgte die Mitwirkung von Prof. Dr. Schebek in der projektübergreifenden Arbeitsgruppe des Begleitvorhabens der Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Stadtquartiere“ für das Querschnittsthema (QT) „Indikatoren und Bewertung“. Als Ergebnis wurde eine Handreichung zur Typologie von Indikatoren sowie ihrer Anwendung in Planungsprozessen und Projekten zur nachhaltigen Quartiersentwicklung erarbeitet und auf der Seite des Begleitvorhabens publiziert:

https://ressourceneffiziente-stadtquartiere.de/wp-content/uploads/2022/03/Handreichung_Indikatoren_2022_01_18_TUprints.pdf

Zusätzlich flossen Projektergebnisse in der Entwicklung der DIN SPEC 91468 mit ein. Diese ist kostenlos zu finden unter: <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91468/360180083>

6. LC-Quartier-Tool

Für die Ressourceneffizienzbewertung von Wohnquartieren wurde vom Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft das Excel-Tool LC-Quartier entwickelt.

6.1. Hintergrund der Ressourceneffizienzbewertung von Wohnquartieren

Der Gebäudebestand in Deutschland hat in allen Phasen des Lebenszyklus einen hohen Ausstoß an Treibhausgasen sowie einen hohen Bedarf an Ressourcen. Dabei ist sowohl für die Reduktion von Treibhausgasen als auch des Rohstoffverbrauchs das Energiesystem und die urbane Planung von großer Bedeutung.

Um diese Reduktion zu erreichen, gibt es in Deutschland aktuell viele Ansätze auf Gebäudeebene für die verschiedenen Lebensphasen des Gebäudes. Dazu gehören beispielsweise hohe Gebäudestandards, Strategien für höhere Sanierungsraten und die Reduzierung von fossilen Heizsystemen. Nichtsdestotrotz sind beispielsweise Sanierungen in ihrer Quantität und Qualität ungenügend, um die Ziele der Treibhausgasneutralität bis 2045 und einer Reduktion der Ressourceninanspruchnahme zu erreichen.

Um die Entwicklung zu einem klimaneutralen Gebäudebestand zu unterstützen, findet Stadtplanung immer häufiger auf Quartiersebene statt. Hier können quartiersbezogene Gesamtkonzepte (z.B. Energiekonzepte) entwickelt werden und es entstehen sowohl ökonomische als auch ökologische Skaleneffekte. Durch den hohen Veränderungsdruck bei bestehenden Quartieren, vor allem in den Ballungsräumen, können bestehende Entwicklungen genutzt werden, um eine klimaneutrale und ressourceneffiziente Entwicklung der Quartiere zu unterstützen.

6.1.1. Bestehende Möglichkeiten zur Bewertung der Ressourceneffizienz

Es gibt bereits bestehende Tools zur CO₂ Bilanzierung von Quartieren und Kommunen. Eine übergeordnete Empfehlung zur Methodik der kommunalen Treibhausgasbilanzierung für Energie- und Verkehrssektor in Deutschland wurde vom ifeu festgehalten und nennt sich BSKO-Methodik (Bilanzierungs-Systematik Kommunal), damit Ergebnisse konsistent und vergleichbar sind. Tools, die nach dieser Methodik agieren sind CACP (Clean Air Climate Protection Software), Praxisleitfaden Kommunalen Klimaschutz, die Software "Klimaschutz-Planer", ECORegion und ECOSPEEDRegion. Die Länder schlagen den Kommunen unterschiedliche Methoden vor, empfehlen oder stellen eine Software bereit sowie Vorlagen für Excelberechnungen.

CACP ist ein Managementtool, welches die Bilanzierung von Treibhausgasen aus Stromverbrauch, Energieverbrauch sowie Abfalllagerung und -verarbeitung betrachtet. Es werden einzelne Liegenschaften oder gesamte Kommunen betrachtet und eine Analyse des IST-Zustandes sowie zukünftige Entwicklungen durchgeführt. Der Praxisleitfaden Kommunalen

Klimaschutz basiert auf dem DIFU-Leitfaden und wurde für Kommunen weiterentwickelt. Die Software "Klimaschutz-Planer" hat das Ziel des Monitorings des kommunalen Klimaschutzes. Viele Länder verwenden ECORegion und/oder ECOSPEED. Diese haben das Ziel mithilfe von LCA eine transparente Energie- und CO₂-Bilanzierung für Regionen sowie ein Monitoring von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen zu gewährleisten. Der Vorgang sieht folgend aus. Zuerst wird mit regionalen Kennzahlen eine Startbilanz erstellt. Daraufhin werden lokale Daten von den Kommunen und Städten für eine höhere Genauigkeit erfasst. An dieser Stelle lassen sich bei ECOSPEED Entwicklungsszenarien erstellen. Nun wird die Bilanzierung überprüft und gegebenenfalls verbessert und eine Berichterstattung folgt. Auch gibt es Bundesländer, die auf Bilanzierungstools über Excel zurückgreifen, die beispielsweise vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH erstellt wurden. Auf städtischer Ebene werden teilweise andere Bilanzierungstools verwendet. Hier als Beispiel die Stadt Darmstadt. Sie hat 1998 unter Betreuung des Öko-Instituts eine grobe Klimabilanz erstellt. Bei dieser Bilanzierung wurden als erstes die Emittenten in Sektoren eingeteilt, danach die Daten in unterschiedlichen Näherungsstufen aufgenommen und daraufhin über GEMIS die Daten in CO₂-Äquivalente umgerechnet. GEMIS ist ein Globales Emissions-Modell integriertes System, welches frei verfügbar ist und eine integrierte Datenbank für die Lebensweg- und Stoffstromanalyse beinhaltet. 2013 führte Darmstadt seine CO₂-Bilanzierung mit der Software ECORegion fort. Es besteht einen Länderarbeitskreis, der Erstellung von Energie und CO₂-Bilanzen der Bundesländer koordiniert, sodass die Methodik innerhalb der Länder abgestimmt ist. Es sollen bei der Bilanzierung die energiebedingten Emissionen, die Quellenbilanz (CO₂-Emissionen aus Primärverbrauch), die Verursacherbilanz (CO₂-Emissionen aus dem Endenergieverbrauch) sowie die prozessbedingten CO₂-Emissionen mit einfließen.

6.1.2. Weiterer Forschungsbedarf

Wenn der Gebäudesektor betrachtet wird, steht die Treibhausgasreduzierung immer im Vordergrund der Betrachtung. Der Gebäudesektor bewegt sich allerdings zunehmend in einem Spannungsfeld zwischen Energie- und somit Treibhausgaseinsparungen und dem Verbrauch an Rohstoffen. Durch das politische Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestands bis 2045 werden lediglich die Treibhausgasemissionen in Scope 2 betrachtet. Das Problem hierbei ist, dass nicht der gesamte Lebenszyklus der Gebäude und auch keine weiteren Umweltwirkungen und Ressourcenverbräuche von Entwicklungsmaßnahmen betrachtet werden. Da allerdings von Trade-Off Effekten in andere Lebensphasen und Wirkungskategorien auszugehen ist, bedarf es einer Betrachtung von Gebäude-/Quartiersentwicklungsmaßnahmen über den gesamten Lebenszyklus und über die gesamte Ressourceninanspruchnahme.

Bestehende Tools zur Quartiersbilanzierung durch Kommunen, bewerten allerdings lediglich die Treibhausgasemissionen und diese oftmals nur über die Nutzenphase des Gebäudes/Quartiers. Zudem ist oftmals lediglich eine verbrauchsorientierte Bilanzierung möglich. Das bedeutet, dass lediglich über die Verbräuche an Gas, Öl, Strom, etc. eine Berechnung der Treibhausgasemissionen möglich ist. Dadurch lässt sich jedoch nicht bedarfsorientiert Bilanzieren und eine Untersuchung und Bewertung von spezifischen bedarfsreduzierenden Maßnahmen wie Quartiersentwicklungsmaßnahmen ist nicht möglich.

Dies zeigt, dass eine bedarfsorientierte Quartiersbilanzierung über den gesamten Lebenszyklus von Quartiersentwicklungsmaßnahmen zur Bewertung der Ressourceneffizienz und nicht nur der Treibhausgasbilanzierung nötig ist.

6.2. Zielstellung und Mehrwert von LC-Quartier-Tool

Das LC-Quartier-Tool bietet eine Möglichkeit die Ressourceneffizienz von Wohnquartieren in den unterschiedlichen Lebensphasen zu erfassen und verschiedene Quartiersentwicklungsmaßnahmen zu bewerten. Das bedeutet, dass das LC-Quartier-Tool Kommunen oder andere Entscheidungsträger befähigt Entwicklungsmaßnahmen so auszuwählen, dass die politischen Ziele zur Treibhausgasreduktion erfüllt werden bei gleichzeitig möglichst hoher Ressourceneffizienz. Dabei wird der gesamte Lebenszyklus der Entwicklungsmaßnahmen erfasst und bewertet. Somit sollen neben wichtigen Erkenntnissen zu Treibhausgasen und Ressourceneffizienz auch Substitutionseffekte und Trade-Off Effekte betrachtet werden.

Das Tool kann somit Informationen über Quartiere wie zum Beispiel zum Nutzenergiebedarf und den Treibhausgasemissionen bereitstellen, Entscheidungen zu Quartiersentwicklungsmaßnahmen unterstützen und allgemeine Empfehlungen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz geben.

Das Besondere an LC-Quartier ist dabei, dass die Umweltwirkungen der Sanierungsmaßnahmen über den gesamten Lebenszyklus analysiert werden. Somit werden Umweltwirkungen wie THG nicht nur für die Nutzenphase der Gebäude im Quartier ermittelt. Über das Tool können insbesondere auch zentrale Maßnahmen zur Strom- und Wärmebereitstellung im Quartier analysiert werden, wodurch die Skaleneffekte die im Quartier auftreten ausgenutzt werden können.

Das Tool wird für Kommunen und ihre Entscheidungsträger entwickelt, kann aber auch durch andere Quartiersplaner wie Entwicklungsgesellschaften oder Wohnbaugesellschaften mit Quartiersbezug verwendet werden.

Es werden folgende kommunale Planungsaufgaben unterstützt:

- CO₂-Bilanzen in Umweltberichten
- Maßnahmen- und Kennwertentwicklung für Klimaschutzkonzepten

-
- Stellungnahmen zu Bauvorhaben
 - Sanierungsberatung für Gebäudeeigentümer

6.3. Methodisches Konzept

Das LC-Quartier-Tool ist modular in die beiden folgenden Teilmodule unterteilt:

- Accounting-Modul: Status-Quo Ermittlung der Klima-/Ressourceneffizienz der Nutzenphase von Bestandsquartieren
- Sanierungsmodul: Evaluation von Sanierungsvarianten über den gesamten Lebenszyklus hinsichtlich ihrer Ressourceneffizienz und Identifizierung optimaler Varianten für konkrete Sanierungsvorhaben.

Die beiden Module sind isoliert aufgebaut, greifen dabei aber auf eine gemeinsame Datenbasis zurück.

In der prototypischen Umsetzung des LC-Quartier-Tools basiert die Bewertung der Ressourceneffizienz zunächst auf der erarbeiteten Quartierstypologie, welche auf synthetischen Gebäuden und Quartieren aufbaut. Zusätzlich lassen sich spezifische Quartiersdaten manuell eintragen, um auch reale Quartiersdaten miteinzubeziehen.

In der Quartierstypologie sind 36 Typen von Bestandsquartieren berücksichtigt, die über die drei Merkmale Baualterklasse, Quartiersdichte und Quartiersgröße definiert sind. Jedes der 36 Quartierstypen wird über ein generisches Quartier beschrieben. Dieses generische Quartier repräsentiert den jeweiligen Quartierstyp und ist als Durchschnittsquartier aufgebaut.

Das zu untersuchende reale Quartier kann anhand der drei Merkmale in die Quartierstypologie eingeordnet werden. Dies hat den Vorteil, dass selbst bei wenig vorliegenden Daten und Informationen über das Untersuchungsquartier erste Aussagen über Treibhausgasemissionen und ressourceneffiziente Entwicklungsmaßnahmen getroffen werden können. Eine extra für die Nutzung des Tools durchzuführende Datenaufnahme /-recherche ist nicht notwendig. Sollten jedoch weitere Daten zum Beispiel zur Gebäudeanzahl nach Bautyp oder zum Anteil der Sanierung vorliegen, können diese dennoch auch eingegeben werden. Somit ist die Nutzung von LC-Quartier sowohl mit wenig vorliegenden Daten als auch mit genaueren Erkenntnissen über das Untersuchungsquartier nutzbar. Aufgrund der hinterlegten Daten zu den generischen Quartieren sind die Ergebnisse auch bei wenigen Informationen über das Untersuchungsquartier hinreichend genau. Umso mehr Daten vorliegen und eingetragen werden können, umso genauer werden die Ergebnisse.

Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen und weiterer Umweltwirkung werden Ökobilanz-Datensätze mittels der Ecoinvent Datenbank 3.8 generiert. Hierfür wurde zunächst der

Nutzenergiebedarf für Wärme und Strom der generischen Quartiere bestimmt. Über eine Kopplung zur Beheizungsstruktur im Quartier werden die Umweltwirkungen berechnet.

Für die Bewertung der Sanierung werden zunächst verschiedene Sanierungsszenarien entwickelt und anschließend die damit verbundenen Änderungen des Nutzenergiebedarfs und der Energiebereitstellung definiert, um somit die Umweltwirkungen der Maßnahmen zu berechnen.

6.3.1. Entwicklung einer Quartierstypologie

Definition von Quartieren

Für die Definition von Stadtquartieren wurden unterschiedliche bestehende Definitionen betrachtet. Für dieses Projekt wird der Stadtteil als räumliche Struktur mit einer Ansammlung verschiedener Wohngebäude definiert. Die wichtigsten Merkmale zur Unterscheidung der Typen auf die Bewertung der energetischen Leistung sind die Größe in Form der Anzahl der Gebäude und das Alter der Gebäude (Galster, 1986; Scheiner, 2000; Alisch, 2002; Nonnenmacher, 2007; Eckardt, 2012; Schnur, 2012).

Da der Nutzenergiebedarf von den Wohngebäuden abhängig ist und die Informationen über die Anzahl von Gebäuden nicht direkt zugänglich sind, außer es liegt ein Gebäudekataster vor, gibt es Merkmale und Kennzahlen, die eine Quartierstypologie ausmachen. Die Anzahl der Gebäude kann durch die Größe des Quartiers (Quartiersgröße) und überbaute Fläche (Quartiersdichte) bestimmt werden. Außerdem ist das Gebäudealter zur Bestimmung des Wärmeverlustes wesentlich, weswegen eine weitere Kennzahl das Baualter (Construction time period (CTP)) ist (Siedlecki et al., 2023).

Quartiersgröße

Die Bestimmung der Quartiersgröße erfolgt auf Literatur bestehender räumlicher Definitionen von Gebäudeclustern oder Quartieren und Quantifizierung generischer Quartiersgrößen anhand von Fallstudien zu energetischen Quartierkonzepten. Die räumliche Obergrenze der Quartiersausdehnung wird bei 50 Hektar festgelegt, orientiert an Nonnenmacher (2007) und Scheiner (2000). Folgend wurden 104 Fallstudien, insbesondere aus dem KfW-Förderprogramm ausgewertet und 52 berücksichtigt, aufgrund der festgelegten Maximalgröße. Die Analyse der Literatur und Studien zeigt, dass es keine dominierende Größe für Quartiere in der Quartierstypologie gibt (Abbildung 1). Die Größe variiert aufgrund der unterschiedlichen Siedlungsstrukturen.

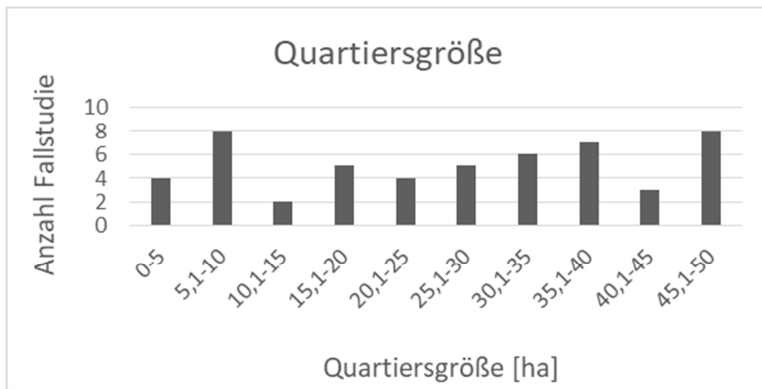


Abbildung 1 Untersuchte Einzelfallstudien und ihre jeweilige räumliche Ausdehnung [ha] (Siedlecki et al., 2023)

Nach einer statistischen Auswertung, wurden drei Quartiersgrößen ermittelt. Die durchschnittlicher Quartiersgröße wurde über den Mittelwert bestimmt, das kleinere Quartier entsprechend der 25 % und das größere der 75 %.

Die drei Größen sind:

- Kleine Quartiergröße (small district size (SDS)): 13 Hektar
- Mittlere Quartiergröße (average district size (ADS)): 25 Hektar
- Große Quartiergröße (large district size (LDS)): 39 Hektar

Quartiersdichte

Die Quartiersdichte wird durch den Anteil der bebauten Fläche in den genannten generischen Quartieren dargestellt, der den Anteil der physisch bebauten Grundfläche beschreibt. Es wurden statistische Daten von Meinel (2015) und Spielmann (2018) ausgewertet, um den Anteil der überbauten Flächen innerhalb der architektonisch geprägten Siedlungsbereiche für alle deutschen Quartiere zu quantifizieren. Abbildung 2 zeigt die Verteilung. Diese Analyse zeigt, dass keine durchschnittliche Quartiersdichte quantifiziert werden kann.

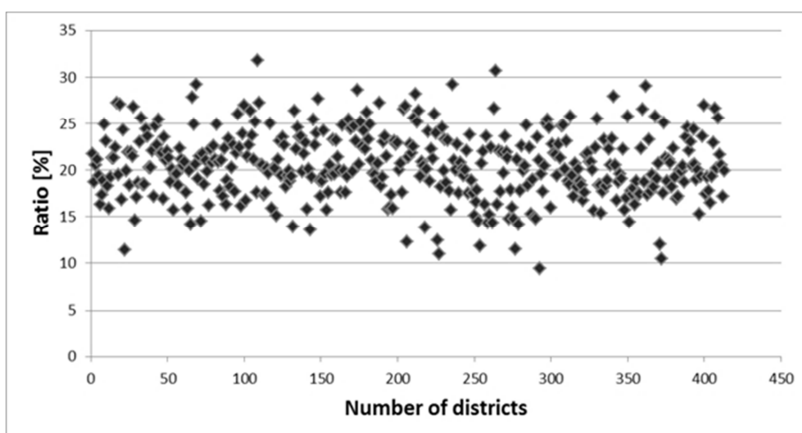


Abbildung 2 Verteilung der bebauten Fläche innerhalb der architektonisch geprägten Siedlungsgebiete (Siedlecki et al., 2023)

Analog zur Quartiersgröße wurden drei statistische Dichten gewählt. Die durchschnittliche Quartiersdichte wird durch den Mittelwert beschrieben. Die Werte für niedrige und hohe Quartiersdichten entsprechen dem kleinsten und höchstem Wert (Siedlecki et al., 2023):

- Niedrige Quartiersdichte (Low district density (LDD)): 9,4 %
- Mittlere Quartiersdichte (Average district density (ADD)): 19,9 %
- Hohe Quartiersdichte (High district density (HDD)): 31,8 %

Quartiersbaualtersklassen

Die Baualtersklassen der Gebäude haben einen großen Einfluss auf die Wärmeverluste. Für die Klassifizierung der CTP wurden deutsche Gesetze und Förderprogramme, die Gebäude und deren energetische Performance betreffen, recherchiert und ausgewertet. Die Klassifizierung orientiert sich analog zu den deutschen Gesetzesversionen der Wärmeeinsparverordnungen (WärmeschutzV, 1982, 1994) sowie der ersten Novelle der Energieeinsparverordnung (EnEV, 2009). Es wurden folgend vier verschiedene CTP für Quartiere entwickelt:

- Vor 1948 (CTP48)
- 1948-1978 (CTP79)
- 1979-1994 (CTP95)
- 1995-2009 (CTP10)

Da Gemeinden regelmäßig neue Quartiere entwickeln, können diese Gebiete als weitgehend homogen in Bezug auf ihre Altersstruktur angesehen werden. Gebäude, die nach 2009 errichtet wurden, erfüllen einen strengen maximalen Wärmedurchgangswert, weswegen in den nächsten Jahren keine Sanierung dieser Baualtersklasse zu erwarten ist (EnEV, 2009). Außerdem macht diese Baualtersklasse nur 2,5 % des gesamten Wohngebäudebestands in Deutschland aus (Walberg & Gniechwitz, 2016). Aus diesem Grund werden diese Gebäude nicht berücksichtigt.

Quartierstypologie

Auf der Grundlage der drei zuvor beschriebenen Merkmale kann die Quartierstypologie formuliert werden. Wie in Tabelle 3 zu sehen ist, können neun verschiedene Spezifikationen innerhalb der Merkmale oder Quartiere in jeder CTP definiert werden. Daher wurden 36 generische Quartiere entwickelt, die auf Kombination der neun Spezifikationen und der CTP basieren, beginnend bei der ältesten Altersklasse (CTP48) mit geringer Größe und Dichte (generisches Quartier 01) bis zur jüngsten Altersklasse (CTP10) mit großer Größe und hoher Dichte (generisches Quartier 39).

Tabelle 3: Quartierstypologie (Siedlecki et al., 2023)

Generisches Quartier	Quartiersgröße (klein)			Quartiersgröße (mittel)			Quartiersgröße (groß)		
	Quartiersdichte (niedrig)	Quartiersdichte (mittel)	Quartiersdichte (hoch)	Quartiersdichte (niedrig)	Quartiersdichte (mittel)	Quartiersdichte (hoch)	Quartiersdichte (niedrig)	Quartiersdichte (mittel)	Quartiersdichte (hoch)
Before 1948	01	02	03	04	05	06	07	08	09
1948 – 1978	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1979 – 1994	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1995 – 2009	31	32	33	34	35	36	37	38	39

Die Typologie ist systematisch mit zwei Ziffern aufgebaut. Die erste Ziffer beschreibt die CTP (0 bis 3) aufsteigend mit der Altersklasse. Die zweite Ziffer beschreibt die Angabe zu Größe und Dichte (1 bis 9).

6.3.2. Erarbeitung der Kenngrößen der Nutzenphase

Identifizierung energiebezogener Parameter

Energiebezogene Parameter sind jene, die das Energieverhalten eines Gebäudes charakterisieren und somit auch für Quartiere angewendet werden kann. Für die einheitliche Berechnung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden wird in Deutschland die nationale Norm DIN V 18599 angewendet (DIN V 18599-1, 2018). Diese Norm liefert eine Methodik, wie sie in Artikel 3 der Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) aus dem Jahr 2002 in allen Mitgliedstaaten der EU gefordert wird. Die genannte Norm kann als nationale Berechnungsnorm zur Umsetzung der europäischen Richtlinie für Wohn- und Nichtwohngebäude sowie Bestands- und Neubauten angewendet werden. Demnach sind die für die Charakterisierung von Gebäuden zu berechnende Energiebilanzen die folgenden:

- Primärenergiebedarf: Energiemenge, die sich aus dem Energiegehalt des benötigten Brennstoffs, der Hilfsenergie und der Energiemenge der vorgelagerten Prozesse zusammensetzt (DIN V 18599-1, 2018).
- Endenergiebedarfs: Menge der Energie, die der Anlagentechnik des Gebäudes zugeführt wird (DIN V 18599-1, 2018)
- Nutzenergiebedarf: Hauptbegriff für den Nutzenergiebedarf für
 - Heizung: Wärmebedarf zur Aufrechterhaltung des thermischen Raumzustandes

-
- Lüftung: Kühlbedarf zur Aufrechterhaltung des thermischen Raumzustandes
 - Warmwasserbereitung: Energiebedarf für die Versorgung mit Warmwasser bei vorgegebener Temperatur
 - Beleuchtung: Energiebedarf zur Erreichung der vorgegebenen Beleuchtungsqualität (DIN V 18599-1, 2018)

Hier wird nur der Nutzenergiebedarf betrachtet, da dieser nur den Bedarf des Quartiers unabhängig von der Energiebereitstellung darstellt. Kühlung und Lüftung werden nicht berücksichtigt, weil sie nur einen sehr geringen Anteil am Energiebedarf von Wohngebäuden haben. Außerdem wird hier auch der Nutzenergiebedarf von elektrischen Geräten berücksichtigt. Es wurden vier Kategorien identifiziert, für die Werte zur Berechnung des Nutzenergiebedarfs von generischen Quartieren benötigt werden:

- Gebäudegröße
- Renovierungsstand
- Verteilung und Quantifizierung von Gebäuden
- Anzahl und Größe von Haushalten

Zur Charakterisierung generischer Quartiere sollen generische Daten für die Werte der genannten Kategorien abgeleitet werden. Die Gesamtheit der Werte aller Kategorien für einen Quartierstyp wird als generisches Quartier definiert. Die generischen Quartiere sind deskriptiv, denn es werden keine Daten aus realen Quartieren verwendet. Die Beschreibung erfolgt daher über die Darstellung und Charakterisierung der Quartiere mit „gemittelten“ d.h. typischen Daten und Annahmen. Jedes generische Quartier ist somit eine quantitative Beschreibung der Wohngebäude der deutschen Quartiere mit ihren wichtigsten Eigenschaften hinsichtlich des Nutzenergiebedarfs (Siedlecki et al., 2023).

Bestimmung von Kenngrößen energiebezogener Parameter

Es wird auf bestehende, generische Wohngebäudetypen bzw. Gebäudetypologien zurückgegriffen (WärmeschutzV, 1982, 1994; Klauß, 2010; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung., 2011). Als bestehende Einzelgebäudetypologie wurde die Typologie von Klauß (2010) gewählt, da sie umfassend und kompakt sowie einen normativen Top-Down -Ansatz hat. Klauß (2010) analysierte eine große Anzahl deutscher Gebäude und fasst typische Gebäude (Archetypen) in folgende Kategorien zusammen: Einfamilienhaus (single family house (SFH)), Doppelhaus (semi-detached house(SDH)), kleines Mehrfamilienhaus (small multi-family house (SMH)), und großes Mehrfamilienhaus (LMH)). Jeder Gebäudetyp muss durch die Geometrie, Wärmedurchgangskoeffizienten, den Sanierungsstand und die Anzahl der Haushalte beschrieben werden. Klauß (2010) liefert bereits statistische Daten zur Geometrie, welche um eigene Daten ergänzt werden mussten, um sie auf die Baualtersklassen zu übertragen.

Wärmedurchgangskoeffizienten sowie Sanierungszustände wurden von Klauß (2010) und Bettgenhäuser (2013) entnommen.

Gebäudegröße

Der Raumwärmebedarf hängt von der Größe der Wohnfläche des Gebäudes ab. Da sich die meisten Studien zu Gebäudearchetypen nicht in der entsprechenden Wohnfläche in einem Gebäudetyp unterscheiden, wird hier eine Literaturrecherche sowie eine Analyse der wichtigsten deutschen Gebäudeverkaufsportale wie Immowelt AG und ImmoScout24 GmbH (2020) durchgeführt. Die Auswahl der Beispielgebäude erfolgte nach Gebäudetyp und -alter sowie dem Kriterium, sodass Gebäude aus dem gesamten Bundesgebiet vertreten sind. Die Wohnflächen von über 1000 Vertretern wurden ausgewertet und Ausreißer statistisch entfernt. Da es nicht möglich war, eine ausreichende Datenmenge zu Wohnflächen großer Mehrfamilienhäuser zu gewinnen, um eine statistisch verlässliche Auswertung vorzunehmen, wurde für die folgende Analyse die von Klauß (2010) vordefinierte Wohnfläche großer Mehrfamilienhäuser verwendet. Die Auswertung der gemittelten Wohnflächen in den betrachteten CTPs tatsächlich unterschiedlich sind (Abbildung 3). Die Wohnfläche wurde zunächst größer, bevor sie sich in den neusten CTP verringert.

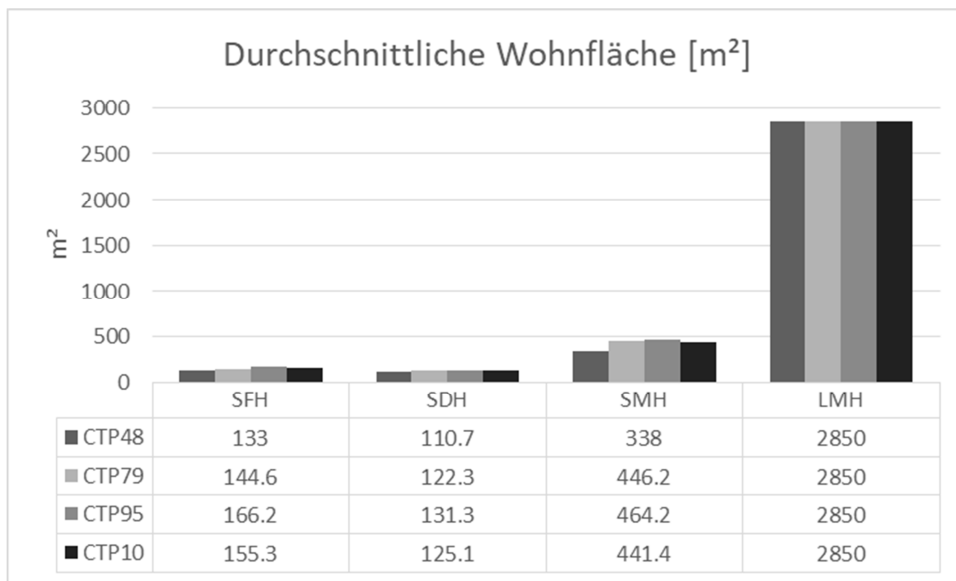


Abbildung 3 Durchschnittliche Wohnfläche [m²] für die verschiedenen Gebäudetypen für jede CTP (Siedleck et al., 2023)

Die durchschnittliche Wohnfläche von SFH und SDH liegt in einem ähnlichen Größenbereich, während SDH immer etwas kleiner sind. Die Gesamtwohnfläche von SMH bleibt für alle Haushaltseinheiten unter 500 m², während die Gesamtwohnfläche über von LMH über 2500 m² liegt. Für LMH ist aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit keine Variation für die CTPs möglich. Daher wird für alle CTPs eine durchschnittliche Wohnfläche angenommen. Da die Wohnfläche eine wichtige Rolle bei der Berechnung des Raumwärmebedarfs spielt, ist dieser Parameter für die Bewertung von Bedeutung.

Ausmaß der Sanierung

In Deutschland werden insbesondere Teilsanierungen durchgeführt, auch wenn die Sanierungsquoten zu niedrig sind. Um diesen Aspekt in die generischen Quartiere einzubringen, wurden die Sanierungsgrade für die vier energetisch relevantesten Bauteile eines Gebäudes bewertet. Dazu sind die energetischen Leistungen der vier Bauteile Dach, Wand, Fenster und Keller notwendig, da sie die Schnittstelle zur äußeren Umgebung darstellen, die für die Betrachtung der Wärmeverluste entscheidend ist. Nach Bettgenhäuser (2013) kann die Sanierung von Gebäuden in vier verschiedene Stufen beschrieben werden:

- Nicht saniert (r0)
- Dach saniert (r1)
- Dach und Wand saniert (r2)
- Dach, Wand und Keller saniert (r3)

Bettgenhäuser (2013) stellt detaillierte Daten über den gesamten deutschen Gebäudebestand zur Verfügung, wie z.B. die sanierte Geschossfläche für Wohngebäude für die verschiedenen Sanierungsstufen. Aus diesen Daten wurden die Anteile der sanierten Gebäude für die Studie berechnet (Tabelle 4).

Tabelle 4: Anteil der Sanierungen in deutschen Wohngebäuden nach Sanierungsgrad, CTP und Gebäudetyp [%]. (Siedlecki et al., 2023)

Baualters- klasse	Sanierungs- grad	SFH [%]	SDH [%]	SMH [%]	LMH [%]
CTP48	r0	53	53	52	52
	r1	27	27	22	22
	r2	10	10	15	15
	r3	10	10	11	11
CTP79	r0	53	53	52	52
	r1	27	27	22	22
	r2	10	10	15	15
	r3	10	10	11	11
CTP95	r0	71	72	62	63
	r1	17	17	15	14

	r2	9	9	12	12
	r3	3	4	10	11
CTP10	r0	95	95	87	0
	r1	4	5	3	0
	r2	0	0	3	0
	r3	0	0	7	0

Mit diesen Anteilen kann die Menge der sanierten Wohngebäude nach Sanierungsgraden in den generischen Quartieren berechnet werden. Zur Berechnung der Energie- und insbesondere der Wärmeverluste werden Wärmedurchgangswerte für die verschiedenen Gebäudetypen und deren Sanierungsgrade benötigt. Bettgenhäuser (2013) liefert diese für die Gebäudetypen und Altersklassen, die nach Sanierungsgraden differenziert sind.

Verteilung und Quantifizierung der Gebäude

Zur Beschreibung der generischen Quartiere ist die Anzahl der generischen Gebäude in jedem Quartier entscheidend. Die Gebäudeverteilung und -quantifizierung wurde auf der Grundlage der Quartiersmerkmale Größe, Dichte und Grundfläche berechnet. Zunächst wurde die Grundfläche für alle Gebäudetypen ermittelt. Im nächsten Schritt wurde die Grundfläche für die verschiedenen Gebäudetypen auf Basis der recherchierten durchschnittlichen Wohnfläche und entsprechenden Daten von Klauß (2010) skaliert (Ergebnis in Abbildung 4)

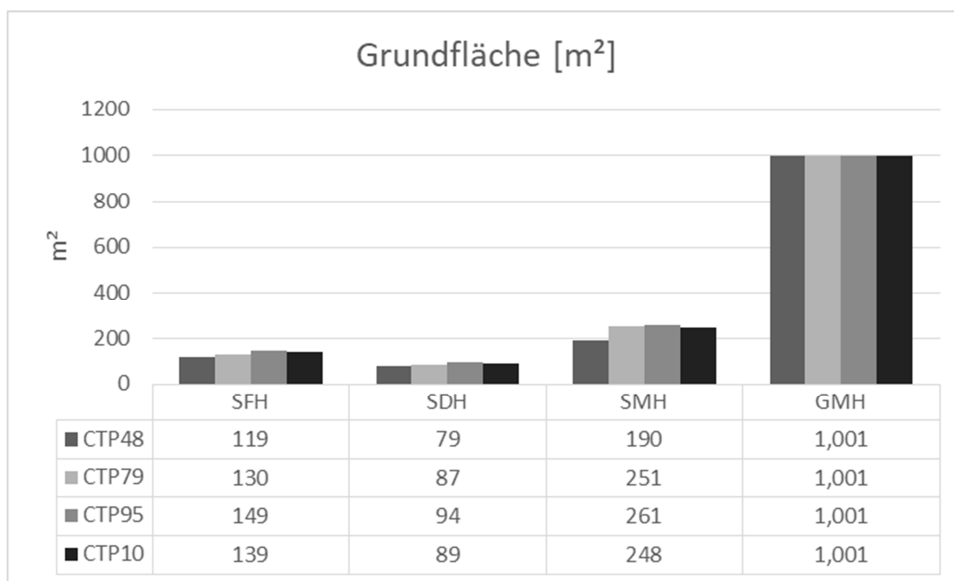


Abbildung 4 Grundfläche [m²] der Gebäudetypen (Siedlecki et al., 2023)

Zusätzlich wurden die Bruttogeschossfläche von Bettgenhäuser (2013) nach den verwendeten Gebäudeklassen und CTP in Deutschland sowie berechnete Wohnfläche in jedem CTP verwendet. Außerdem wurde die Anzahl der sanierten Häuser in den generischen Quartieren auf Grundlage bestehender Daten zur sanierten Wohnfläche für Wohngebäude berechnet. Die generischen Quartiere sind in Bezug auf das CTP homogen und ausschließlich Gebäude einer Altersklasse sind vertreten. Die generischen Quartiere können für Mischungen, die realistische Einstellungen darstellen, verwendet werden.

Anzahl und Größe der Haushalte in jedem generischen Quartier

Um den Strombedarf der Haushalte zu ermitteln, werden die Anzahl und Größe der Haushalte innerhalb der generischen Quartiere benötigt. Die Anzahl der Haushalte pro Gebäudetyp wurde über die Analyse der Wohnfläche quantifiziert. Die Daten zeigen, dass SFH und SDH jeweils einen Haushalt und SMH im Durchschnitt fünf Haushalte haben. Die für das LMH von Klauß (2010) verwendeten Daten geben an, dass LMH im Durchschnitt 40 Haushalte haben.

Mit den Daten der Haushalte und Anzahl der Gebäude wurde die Anzahl der Haushalte innerhalb der Quartiere berechnet (Abbildung 5). Kleine Quartiere haben immer die geringste Anzahl von Haushalten, angefangen bei 145 bis Maximum 635 Haushalten. Die größten Quartiere weisen mit bis zu 2147 Gebäuden die höchste Zahl an Haushalten auf. CTP79 hat immer die höchste Anzahl an Haushalten, da es den höchsten Anteil an MFH und LMF aufweisen. Im Gegensatz weist CTP10 aufgrund des Fehlens von LMH und des hohen Anteils von SFH und SDH stets die niedrigste Anzahl von Haushalten auf.

Die für Deutschland verfügbaren statistischen Daten zeigen die Verteilung der Haushaltsgrößen: Der größte Anteil mit 41,9 % der Haushalte sind Ein-Personen-Haushalte. Auf Zwei-Personen-Haushalte entfallen 33,8 %. Die restlichen 24,3 % entfallen auf \geq Drei-Personen-Haushalte.

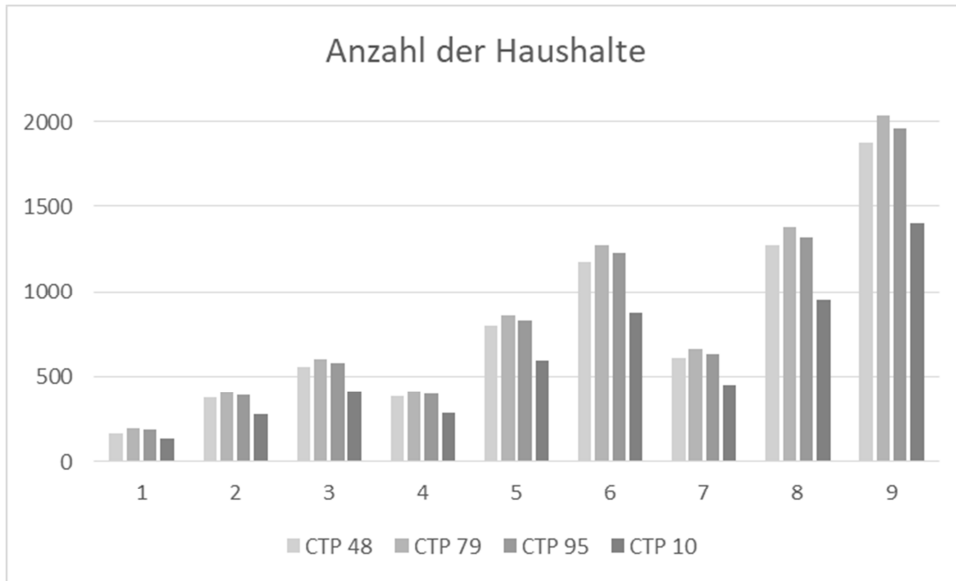


Abbildung 5 Anzahl der Haushalte in den generischen Quartieren (Siedlecki et al., 2023)

Berechnung des Nutzenergiebedarfs der generischen Quartiere

Im letzten Schritt wird der Nutzenergiebedarfs jedes generischen Quartiers nach Formeln [1] und [2] berechnet:

$$Q_{b,district} = \sum_{i=1}^n Q_{b,building} \quad [1]$$

$Q_{b,district}$: Nutzenergiebedarfs Quartier

$Q_{b,building}$: Nutzenergiebedarfs Gebäude

$$Q_{b,building} = Q_{w,b} + Q_{h,b} + Q_{l,b} + Q_{el,b} \quad [2]$$

Q: Energiebedarf

W: Warmwasser

H: Heizung

I: Beleuchtung

El: elektrische Geräte

B: Nutzenergie

Für die Berechnung des Nutzenergiebedarfs von Warmwasser, Raumheizung und Beleuchtung wird die DIN V 18599 („Energieeffizienz von Gebäuden-Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Warmwasserbereitung und Beleuchtung“) verwendet. Da Berechnungen mit der DIN V 18599 sehr komplex sind, wurden verschiedene Tools

für Berechnungen sowohl auf Gebäude- als auch auf Quartiersebene entwickelt z.B. Dämmwerk, IBP:18599 und DistrictECA. Für die exemplarische Berechnung des Nutzenergiebedarfs wurde die von Markus Lichtmeß entwickelte Software EnerCalc (EnerCalc, 2020 © Markus Lichtmeß, www.enec.de) gewählt. Das Tool ist leicht zu bedienen und die Berechnungen sind nachvollziehbar. Zudem ermöglicht es die Gebäudedaten individuell einzugeben und verschiedene Sanierungsstufen können separat dargestellt werden. Es kann mit EnerCalc also mit wenig Aufwand der Energiebedarf eines Gebäudes berechnet werden, wenn Daten vorhanden sind (Lichtmeß, 2020).

Da in der DIN V 18599 und EnerCalc der Haushaltsstrombedarf für Elektrogeräte nicht enthalten ist, muss dieser individuell berechnet werden. Die Quantifizierung des Haushaltsstrombedarfs erfolgte anhand verfügbarer statistischer Daten, die den durchschnittlichen Strombedarf pro Haushalt in Abhängigkeit von der Haushaltsgröße analysieren (Tabelle 5).

Tabelle 5: Jährlicher Strombedarf der Haushalte (Statistisches Bundesamt, 2020)

Haushaltsgröße	Jährlicher Energiebedarf pro Haushalt [kWh]
1 Person	1551
2 Personen	2656
3 oder mehr Personen	4283

6.3.3. Energiekonzepterstellung für generische Quartiere

Erweiterung der Sanierungs- und Gebäudeverteilung sowie Quantifizierung

Die Quartierstypologie bildet die Grundlage für die Berechnung der Anzahl der verschiedenen Gebäude, die für die endgültige Berechnung des Energiebedarfs des Quartiers erforderlich sind. Die Anzahl der Gebäude in den Quartieren steigt mit der Größe und Dichte der generischen Quartiere. Ausgehend von einem Minimum von 69 Gebäuden in der X1-Serie bis zu einem Maximum von 972 Gebäuden in der X9er – Serie. Die Zusammensetzung der Gebäudetypen variiert in den jeweiligen Altersklassen, bedingt durch die unterschiedlichen Gebäudepräferenzen. Bspw. sind in CTP48 und CTP10 keine Gebäude des Typen LMH vertreten. Auch in CTP79 und CTP95 sind LMH nur in geringem Umfang vertreten. Trotzdem liegt der Anteil von SFH in allen CTPs bei etwa 50 %.

Das Sanierungsniveau r0 (unsaniert) hat in allen Quartierstypen den größten Anteil an den jeweiligen Gebäudetypen: z.B. 51,9 % bis 53 % für Gebäude in CTP48 oder 62 % bis 72 % in

CTP95. Der zweitgrößte Anteil entfällt auf die Sanierungsstufe r1. Zwischen Sanierungsstufe r2 und r3 gibt es nur geringe Unterschiede. Diese Verteilung der Sanierungsgrade zeigt sich sowohl in der Gesamtheit der Gebäude als auch in den jeweiligen Gebäudetypen. Ebenso ist der Anteil von r0 umso größer, je neuer das CTP ist. Aufgrund des Erreichens der maximalen Nutzungsdauer verschiedener Komponenten in älteren Gebäuden ist ein Austausch oder eine Erneuerung erforderlich und die damit einhergehende Sanierung wahrscheinlicher. Aufgrund der relativen Neuheit der Gebäude gibt es in einigen generischem Quartieren des CTP10 keine Gebäude der Sanierungsstufe r2 und r3.

Anzahl und Größe der Haushalte

Für die spätere Berechnung des Nutzenergiebedarfs für elektrische Geräte wurden die entwickelten generischen Quartiere mit den individuellen Zahlen der drei verschiedenen Haushaltsgrößen versehen. Die Anteile der Ein- und Zwei-Personen-Haushalte sind höher als die der drei- und Mehr-Personen-Haushalte. Die Zahl der Haushalte steigt mit der Größe und dichte der Bezirke innerhalb einer CTP, da die Bezirke mehr Gebäude enthalten. In CTP79 ist die Zahl der Haushalte am höchsten, was auf die große Anzahl von Gebäuden und die Gebäudetypen zurückzuführen ist. Bei den neueren CTPs nimmt die Zahl der Haushalte ab. Der Grund für den Unterschied in der Anzahl der Haushalte liegt in der Verteilung der Gebäude. Zum Beispiel haben CTP79 und CTP95 mehr größere Gebäude wie LMH.

Berechnung Nutzenergiebedarf

Nach Formel 2 umfasst der Nutzenergiebedarf den Nutzenergiebedarf für Warmwasser, Raumheizung, Beleuchtung und elektrische Geräte. Zunächst wird der Nutzenergiebedarf für eklektische Geräte dargestellt:

Ausgehend von den dargestellten Daten zu den Personen-Haushalten im generischen Quartier kann der monatliche Strombedarf für elektrische Geräte für jedes generisches Quartier durch Multiplikation der Anzahl der Personen-Haushalte mit den statistischen Daten berechnet werden. Es wird davon ausgegangen, dass der Bedarf das ganze Jahr über konstant ist. Der Energiebedarf steigt mit der Anzahl der Gebäude: kleine Quartiere haben einen jährlichen Strombedarf zwischen 2248 kWh/a und 982141 kWh/a und große Quartiere zwischen 760494 kWh/a und 3322560 kWh/a. Darüber hinaus gibt es eine starke Korrelation mit der Anzahl der Haushalte. Quartiere mit einem größeren Anteil von MFH und LFH haben demnach einen höheren Strombedarf.

Der Nutzenergiebedarf, der sich aus den EnerCalc-Berechnungen für den Heizbedarf, Warmwasserbedarf und den Beleuchtungsbedarf sowie dem Nutzenergiebedarf für elektrische Geräte zusammensetzt, schwankt zwischen 52324 kWh im Juli für das Quartier 31 und 124457190 kWh im Dezember für den Bezirk 09. Je nach Größe und Dichte des Quartiers steigt der

Nutzenergiebedarf mit zunehmender Anzahl der Gebäude innerhalb des generischen Quartiers. Es zeigt sich, dass die Wintermonate, insbesondere Januar und Dezember, in allen Altersgruppen durch einen hohen Energiebedarf gekennzeichnet sind. Dies zeigt, dass der Nutzenergiebedarf stark vom Raumwärmebedarf abhängig ist. Es lässt sich ein Rückgang des Nutzenergiebedarfs von CTP48 zu CTP10 feststellen. Es wird deutlich, dass der monatliche Nutzenergiebedarf hauptsächlich durch den Raumwärmebedarf geprägt ist.

Bei der Analyse der Abbildung fällt auf, dass die Abstufung des Energiebedarfs in den Quartieren unabhängig vom CTP gleichbleibt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Bedarf stark von der Anzahl der Gebäude abhängt. Der Bedarf steigt nicht automatisch mit der generischen Quartierzahl, da z.B. ein kleines Quartier mit hoher Dichte mehr Gebäude enthält als ein durchschnittlich großes Quartier mit geringer Dichte. Bei der Jahresnutzenergiebetrachtung weist das generische Quartier 09 mit 68,6 Mio. kWh/a den größten Jahresnutzenergiebedarf der generischen Quartiere auf. Dies ist bedingt durch das ältere BHKW und die hohe Gebäudeanzahl. Darüber hinaus weist das generische Quartier 31 mit 2,8 Mio. kWh/a den geringsten Bedarf auf. Abbildung 6 zeigt den jährlichen Nutzenergiebedarf der generischen Quartiere.

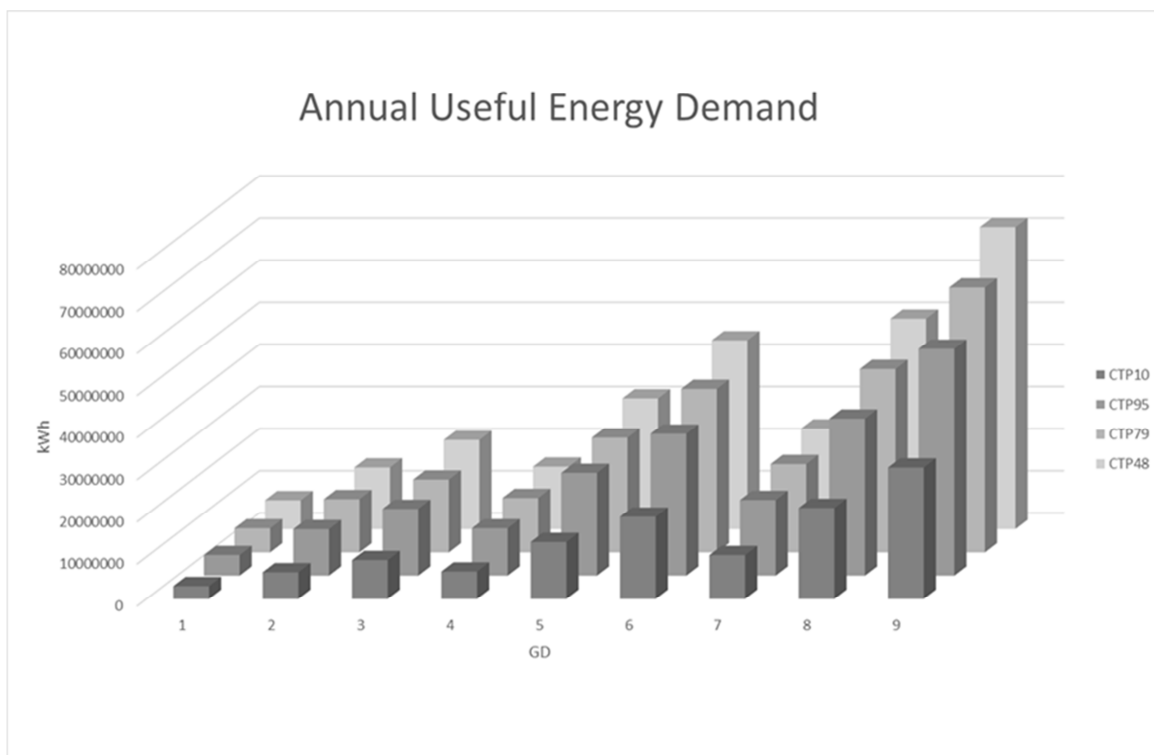


Abbildung 6 Jährlicher Nutzenergiebedarf der generischen Quartiere (Siedlecki et al., 2023)

6.3.4. Identifizierung von klima-ressourceneffizienten Sanierungsvarianten

Für die passive Sanierung im Quartier werden neun verschiedene Sanierungsvarianten entwickelt (Tabelle 6). Diese bauen auf den drei Stufen der Energiestandards für Gebäude auf:

- Sanierung nach Mindeststandard GEG,
- Sanierung nach KfW-Effizienzhaus 70 und
- Sanierung nach KfW-Effizienzhaus 40.

Diese drei Sanierungsstufen können in drei unterschiedlichen Sanierungsanteilen auftreten, wodurch sich neun Sanierungsszenarien bilden. Die Sanierungsszenarien setzen sich aus der Sanierungstiefe (Standard) und Sanierungsrate (Anteil der sanierten Gebäude) zusammen. Somit entstehen neun passive Sanierungsszenarien, die von A1 mit einer geringen Sanierung bis C3 mit einer hohen Sanierung in der Sanierungsintensität steigen.

Innerhalb der neun Szenarien werden die vier konventionellen und ökologischen Dämmmaterialien unterschieden. Die konventionellen Dämmstoffe XPS und EPS sowie die ökologischen Dämmstoffe Holzfaser und Zellulose.

Tabelle 6 Übersicht der entwickelten Sanierungsvarianten

	GERINGE SANIERUNGSRATE 50 %	MITTLERE SANIERUNGSRATE 65 %	HOHE SANIERUNGSRATE 90 %
Niedrige Sanierungstiefe GEG	A1	A2	A3
Mittlere Sanierungstiefe KfW70	B1	B2	B3
Hohe Sanierungstiefe KfW40	C1	C2	C3

Beispielhafte Erläuterung der Szenarien

A1: In Variante A1 werden 50 % der unsanierten Gebäude nach den definierten Vorgaben zum GEG vollsaniert.

C3: In Variante C3 werden 90 % der unsanierten Gebäude nach den definierten Vorgaben zu KfW40 vollsaniert.

Um die Aspekte der Sektorkopplung zu untersuchen, wird die aktive Sanierung unterteilt nach Wärmebereitstellung und Strombereitstellung. Die aktive Sanierung zur Wärmebereitstellung enthält die Technologien:

- Wärmepumpe
- Blockheizkraftwerk
- Fernwärmenutzung

Für die aktive Sanierung zur Strombereitstellung wird zunächst nur die Deckung des Strombedarfs mittels Photovoltaiktechnologien betrachtet.

6.4. Anwendung und Verwertung der prototypischen Umsetzung

6.4.1. Hinweise zur Anwendung

Das Tool hat farblich hinterlegte Felder, mit unterschiedlichen Bedeutungen:

Grau: Drop-Down Menü

Es handelt sich hierbei um Eingabefelder, in denen eines der im Drop-Down Menü dargestellten Merkmale ausgewählt werden muss. Eine eigenständige Eingabe weiterer Merkmale ist nicht notwendig/möglich.

Blau: Berechnung durch Excel-Tool

In diesen Felder stehen Berechnungen des Excel-Tools die als Zwischeninformationen genutzt werden. Diese Felder sind mit Werten aus den generischen Quartieren und generischen Gebäuden hinterlegt. Wenn genauere Daten zum Untersuchungsquartier vorliegen, können diese in den blau hinterlegten Feldern eingetragen werden. Das Tool nutzt dann automatisch die händisch eingetragenen Werte für die weiteren Berechnungen.

Grün: Ergebnisse

Bei grün hinterlegten Feldern handelt es sich um Berechnungsergebnisse von LC-Quartier.

6.4.2. Accounting-Modul

Im Accounting-Modul wird die Nutzenphase im aktuellen IST-Zustand abgebildet. Dabei werden die Treibhausgasemissionen, die in einem Jahr durch den Energiebedarf für Warmwasser, Heizen, Beleuchtung und elektrische Geräte entstehen berechnet. Zudem lässt sich mit dem Modul bestimmen, wie weit das untersuchte Quartier von den Klimazielen 2030 und 2045 entfernt ist, indem die politisch festgelegten Zielwerte für den deutschen Gebäudesektor über die Einwohnerzahl auf die Quartiere skaliert werden. Die gewonnen Ergebnisse lassen sich zum Beispiel für den Umweltbericht nutzen. Im Vergleich mit mehreren Untersuchungsquartieren lässt sich ermitteln, welche Quartiere einen besonders hohen Ausstoß an Treibhausgasemissionen haben und somit priorisiert in ein Städtebauliches Entwicklungsprogramm aufgenommen werden sollten.

Anleitung zur Verwendung

- 1.) Das Untersuchungsquartier muss mittels der Merkmale zur Quartierstypologie einem Quartierstyp zugeordnet werden.
 - a. Hierfür in den Drop-Down Menüs zu Quartiersgröße, Quartiersdichte und Baualtersklasse die entsprechende Auswahl treffen.

b. LC-Quartier ermittelt automatisch den entsprechenden Quartierstyp innerhalb der Quartierstypologie und gibt das generische Quartier als Referenzquartier an.

- 2.) Bei vorliegenden Daten zu Anzahl der Gebäude im Quartier, der einzelnen Bautypen oder der Sanierungsstufen, können diese eingetragen werden. Ansonsten werden automatisch die Werte des Referenzquartiers verwendet.
- 3.) Der Nutzenergiebedarf für das Quartier wird als Ergebnis dargestellt.
- 4.) Die Beheizungsstruktur muss ausgewählt werden. Hier kann zwischen dem deutschen Durchschnitt mit und ohne Fernwärme ausgewählt werden. Wenn genauere Daten zur Beheizungsstruktur im Quartier vorliegen können diese ebenfalls eingetragen werden.
- 5.) Die Treibhausgasemissionen pro Jahr Nutzenphase werden für eine Scope 1 und Scope 2 Betrachtung berechnet. Ebenso werden die Zielwerte für 2030 und 2045 ausgegeben.

I. THG-Accounting-Modul

Quartiersgröße klein (5 - 15 ha) Referenzquartier 1

Quartiersdichte niedrig (9 - 15 %)

Baualtersklasse Vor 1948

Anzahl Gebäude im Quartier 96

	r0	r1	r2	r3
EFH	46	24	12	5
RH	16	8	4	2
MFH	31	16	7	5
GMFH	3	2	1	0

Nutzenergiebedarf ges. 9661108.767 kWh/a
 Nutzenergiebedarf Strom 393204.5873 kWh/a
 Nutzenergiebedarf Wärme 9267904.18 kWh/a

Beheizungsstruktur Durchschnitt Deutschland ohne Fernwärme

	%
Erdgas	56.2
Wärmepumpe	4.3
Heizöl	36.2
Holz-/Pellet	3.3
Fernwärme	0

Abbildung 7 LC-Quartier-Tool: Eingabe- bzw. Auswahlmaske des Accounting-Moduls, (vgl. Schritt 1.)-4.)

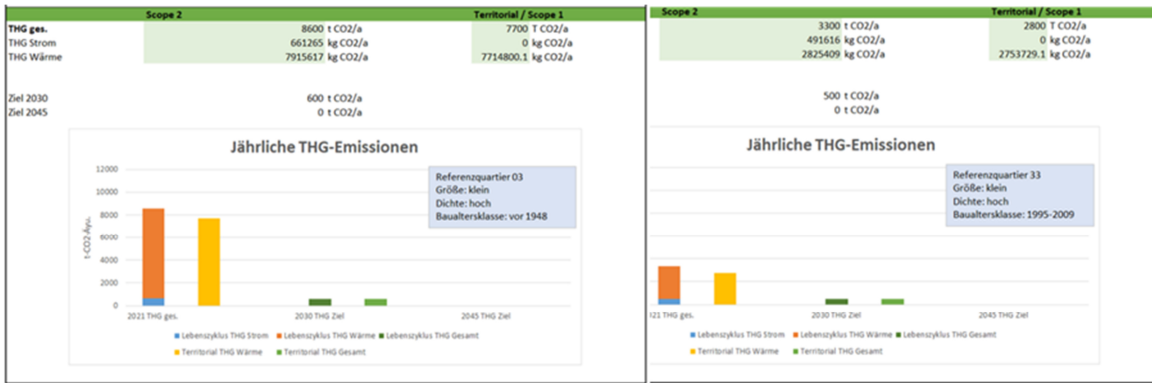


Abbildung 8 LC-Quartier-Tool: Ergebnisdarstellung innerhalb des Accounting-Moduls, (vgl. Schritt 5.) beispielhaft für zwei Referenzquartiere mit Quartiersgröße 5-15 ha (klein), Quartiersdichte 25-35% (hoch) und unterschiedlicher Baualtersklassen: Referenzquartier 3: vor 1948 und Referenzquartier 33: 1995-2009

Zukünftige Verwertung und Weiterentwicklung

Für die zweite Förderphase ist angedacht die Betrachtungsebene auf weitere Indikatoren der Ressourceneffizienz zu erweitern. Die hierfür nötigen ökobilanziellen Berechnungen sind in den Backgrounddaten bereits vorhanden. Es fehlt daher lediglich die Implementierung in der Auswertung. Ebenso ist angedacht die Eingabe zu automatisieren, sodass im GMK lediglich ein Quartier ausgewählt wird und dann ein Datenimport zu den Gebäuden stattfindet. Ein Blatt mit den benötigten Daten aus dem GMK ist bereits angelegt.

6.4.3. Sanierungsmodul

Das Sanierungsmodul evaluiert Sanierungsvarianten für Quartiere über gesamten Lebenszyklus, d.h. inklusive der Aufwendungen für Herstellung von Materialien sowie des End-of-Life. Entsprechend können Trade-Offs z.B. zwischen Energiereduktion in der Nutzenphase und höheren Aufwänden in der Herstellungs- bzw. Entsorgungsphase identifiziert werden. Das Modul bietet vordefinierte Sanierungsvarianten an, die aus drei Komponenten zusammengestellt werden können: „passive Maßnahmen Gebäude“, „aktive Maßnahmen Strom“ und „aktive Maßnahmen Wärme“. Der Anwender kann bei wenig vorliegenden Informationen auf die vordefinierten Varianten zurückgreifen und diese auf das Untersuchungsquartier abstimmen. Alternativ können eigene Sanierungsvarianten definiert werden. Über LC-Quartier kann bestimmt werden, welche zusätzlichen THG-Emissionen mit den Sanierungsmaßnahmen verbunden sind und welche Einsparungen in der Nutzenphase gemacht werden können. Die verschiedenen Varianten werden hinsichtlich der Ressourceneffizienz bewertet und somit die bestmögliche Variante für das jeweilige Untersuchungsquartier identifiziert. Außerdem lässt sich auswerten, ob das untersuchte Quartier nach Anwendung der Maßnahmen den Klimazielen 2030 und 2045 entspricht und welche Trade-Off Effekte zwischen Reduzierung der Treibhausgasemissionen, des Ressourcenverbrauchs und weiteren Umweltwirkungen entstehen.

Anleitung zur Verwendung

Der Aufbau des Sanierungsmoduls gleicht dem des Accounting-Moduls und die Verwendungsschritte 1.) bis 4.) sind somit identisch. Folgende Schritte sind hier zusätzlich notwendig:

- 1.) bis 4.) siehe Accounting-Modul
- 5.) Auswahl der passiven und aktiven Sanierungsmaßnahmen und Sanierungsmaterial (Abbildung 9)
- 6.) Die Treibhausgasemissionen pro Jahr Nutzenphase werden für eine Scope 1 und Scope 2 Betrachtung berechnet. Ebenso werden die Zielwerte für 2030 und 2045 ausgegeben.

Abbildung 9 LC-Quartier-Tool: Zusätzliche Eingabe- bzw. Auswahlmaske des Sanierungsmoduls, vgl. Schritt 5.)

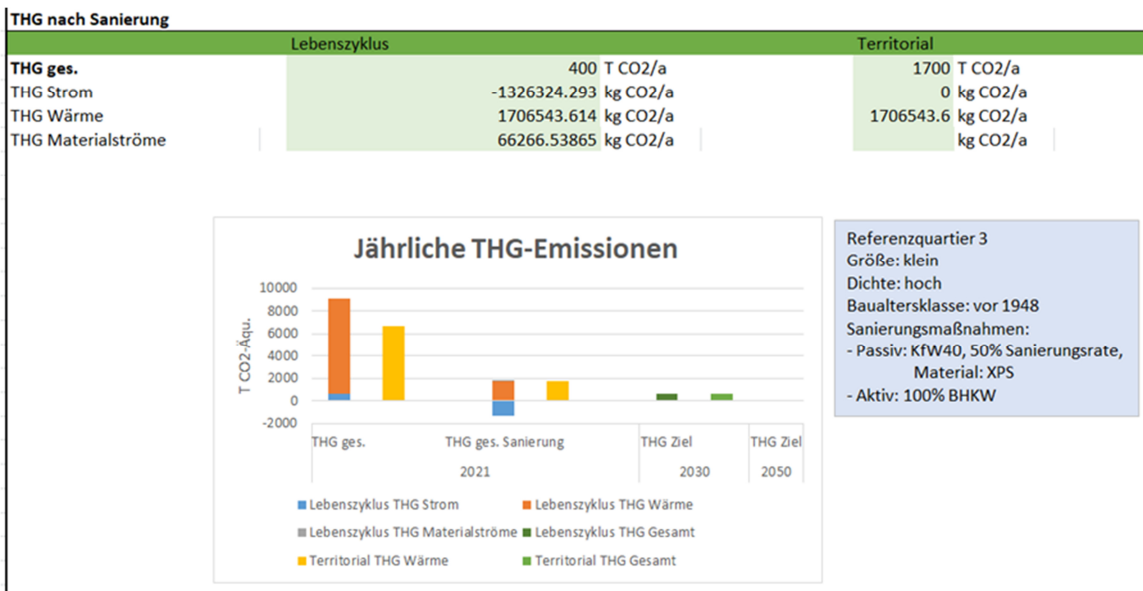


Abbildung 10 LC-Quartier-Tool: Ergebnisdarstellung des Sanierungsmoduls, vgl. Schritt 6.)

Über eine Erweiterung mit Sanierungsmaßnahmen können in Drop-Down Menüs die einzelnen Komponenten miteinander kombiniert werden und die Ergebnisse verglichen werden.

Zukünftige Verwertung und Weiterentwicklung

Ein Vergleich von Sanierung mit einem Abriss und anschließendem Neubau des Quartiers ist noch nicht möglich. In der zweiten Förderphase soll das Circular-Modul des IWKS in das LC-Quartier integriert werden. Erst dann ist es möglich das Szenario Abriss und Neubau anzulegen.

Aktuell ist das Tool LC-Quartier in Excel umgesetzt. In der zweiten Förderphase von RessStadtQuartier wird überprüft, ob eine softwaretechnische Umsetzung sinnvoll ist und diese dann gegebenenfalls umgesetzt.

7. Materialdatenbank und Circular-Modul

Zur Bewertung des Beitrags von Sekundärrohstoffen zur Ressourceneffizienz wurde ein Gesamtmodell entwickelt, das die End-of-Life-Phase von Gebäuden auf Materialebene vollständig abbildet. Dieses ist in Abbildung 11 gezeigt. Das Modell orientiert sich an den Phasen (Materialien im Gebäude, Abbruch, Aufbereitung/Verwertung) und unterscheidet zwischen der Modell- und Datenebene. Auf Modellebene werden Prozessketten aus Abbruch- und Verwertungsverfahren gebildet. Prozesse werden durch Input- und Outputflüsse beschrieben, die je nach gewähltem Bauteil, Gebäude oder Quartier variieren. Die entsprechenden Daten für die im Gebäude verbauten Materialien und die daraus entstehenden Abfallstoffe sind in der Materialdatenbank hinterlegt.

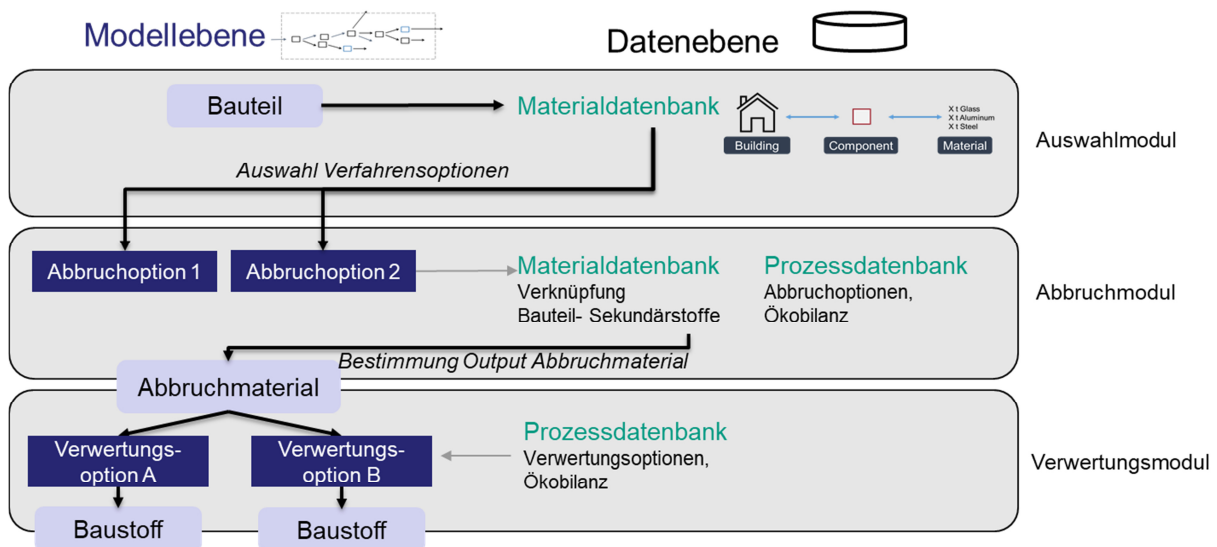


Abbildung 11 Überblick Prozessmodell der EoL-Phase und Verknüpfung mit der Datengrundlage

Die Prozessbeschreibungen für Abbruch- und Verwertungsoptionen sind mit ökobilanziellen Datensätzen hinterlegt, um Prozessketten nach dem Materialgehalt und ökologischen Auswirkungen bewerten zu können.

Systemgrenzen und Nomenklatur

Systemgrenze des Modells sind die entstehenden Baustoffe, die in der jeweiligen Anwendung eingesetzt werden. Materialtransport auf der Baustelle wird nicht betrachtet, da dieser bei allen Verfahren notwendig ist und sich daher nicht unterscheidet. Für jede Modellkomponente wurden eindeutige Bezeichner festgelegt, sodass der Fluss eines Materials durch die gesamte EoL-Phase für jede Verfahrenskombination nachvollzogen werden kann. Die jeweiligen Bezeichner sind in Abbildung 12 dargestellt.

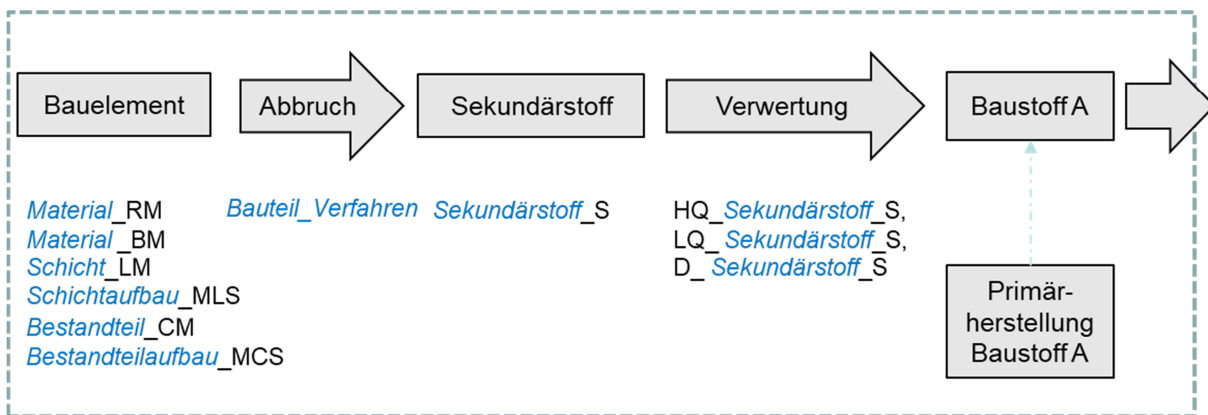


Abbildung 12 Systemgrenzen des Gesamtmodells und Bezeichner der jeweiligen Komponenten

7.1. Entwicklung von Rohstoffkennwerten

Aufkommen und Entwicklung von Baustoffen

Da Gebäude eine gewisse Lebensdauer aufweisen, ist der Abbruch dem Neubau immer einige Jahre hinterher. In den Experteninterviews wurde geschätzt, dass sich der Abbruch momentan im Bereich der Nachkriegszeit bis zu den 70er Jahren bewegt, dem Neubau in der Regel 40 Jahre hinterher ist. Vorrangige Materialien sind Beton, Ziegel, Mauerwerke, selten neuere Entwicklungen. Neuere Materialien treten eher im Umbau und Bauen im Bestand auf (Wärmedämmverbundsysteme, Photovoltaikanlagen). Die energetische Sanierung tritt vor allem in Gebäuden ab den 60er Jahren bis heute auf. Nach dem Monitoring-Bericht der KRW-Bau (Kreislaufwirtschaft Bau, 2021) stellt mineralischer Bauschutt den größten Anteil neben Bodenmassen dar. Als typische Bestandteile mineralischer Fraktionen wurden in den Experteninterviews Beton, Ziegel, Kalksandstein, Klinker, Natursteine, Gips, Ytong, Bims, Asphalt, Störstoffe wie Kunststoffe, Metalle, Holz gesehen. Eine Unterteilung erfolgt dabei primär in Beton und Mauerwerk. Als schadstoffhaltige Komponenten wurden insbesondere Spachtelmassen Fliesenkleber hervorgehoben. Da im Parallelprojekt *WieBauln* eine ausführliche Analyse möglicher Schadstoffe in Bauteilen durchgeführt wurde, wurde dieser Schritt hier nicht weiter vertieft. Das Prozessmodell und die zugrundeliegende Materialdatenbank sind so aufgebaut, dass eine Integration schadstoffhaltiger Komponenten möglich ist.

In den Experteninterviews wurden Hybridkonstruktionen, beispielsweise Hybridkombinationen aus Holz und Beton, als zukünftige Entwicklung hervorgehoben. Trotz vorhandener Bestrebungen zu einstofflichen Konstruktionen, wird diese nicht als zukünftig flächendeckend angesehen. Dies wurde mit der Problematik bestimmter Funktionen wie des Brandschutzes, Schallschutzes, etc. begründet. Der Trend eher zur Entwicklung intelligenter Verbindungen gesehen. Außerdem wurden Weiterentwicklungen im Bereich Klimatisierung und Heizungen vorhergesagt.

Identifikation von Baustoffen und Materialien mit Recyclingpotenzial

Die Vorauswahl der Sekundärstoffe erfolgte nach (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) 2016) und (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2018) und wurde aus den Recherchen sukzessive an die Struktur des RSQ-Modells angepasst. Stoffe, die in der Praxis gesammelt erfasst und verwertet werden können, werden daher zusammengefasst, soweit die Zuordnung zu Bauteilschichten dies ermöglicht (Beispiel: Betonplansteine, Betonhohlblocksteine → Beton). Für die Ermittlung der Rohstoffkennwerte wurden eine Materialauswahl getroffen, die für die Modellierung der Gebäude hinreichend genau ist und mindestens eines der folgenden Kriterien erfüllen:

- Materialien mit hohem Aufkommen (Kriterium 1)
- Materialien mit hohem Recyclingpotenzial (Trennbarkeit, vorhandene Verfahren für die Aufbereitung) oder (Kriterium 2)
- hoher wirtschaftlicher Bedeutung (Kriterium 3)
- Materialien, die kritisch für ein effektives Recycling sind (z. B. Gips) (Kriterium 4)

Der Schwerpunkt der folgenden Untersuchungen wurde auf mineralische Abfälle gelegt, da diese den größten Massenstrom darstellen. Abgebildet sind diese in Tabelle 7.

Kategorie	Bezeichner	Beschreibung	Abfallschlüssel
Mineralik	Betonbruch_S	Betonbruch ohne grobe Anhaftungen	17 01 01
Mineralik	BetonbruchMix_S	Betonbruchgemisch mit groben Anhaftungen	17 01 01
Mineralik	Porenbeton_S	Porenbetonbruch ohne grobe Anhaftungen	17 01 07
Mineralik	Ziegel_S	Mauerziegel und Klinker mit geringen Anhaftungen	17 01 02
Mineralik	MWZiegel_S	Mauerwerksbruch, Ziegel	17 01 03

Mineralik	Kalksandstein_S	Kalksandstein	17 01 07
Mineralik	MWKalksandstein_S	Mauerwerk, Kalksandstein	17 01 07
Mineralik	Naturstein_S	Naturstein	17 01 03
Mineralik	MixMineral_S	Gemischter, sortenreiner mineralischer Bauschutt	17 01 07
Mineralik	MixBauschutt_S	Bauschutt mit hohem Anteil an verwertbarer Mineralik	17 09 04
Mineralik	MixMinBel_S	Mit nichtmineralischen Baustoffen verunreinigter Bauschutt	17 09 04, 17 09 03
Mineralik	FliesenBruch_S	Fliesen und Keramik	17 01 03
Mineralik	GipsK_S	Gipskarton	17 08 02
Mineralik	GipsMix_S	Gipsabfälle	17 08 02, 17 08 01
Mineralik	DämmMin_S	Dämmstoffe mineralisch, sortenrein	17 06 01, 17 06 03, 17 06 04
Mineralik	DämmMinUn_S	Dämmstoffe mineralisch, verunreinigt	17 06 03
Metalle	Stahl_S	Stahl	17 04 05
Metalle	Kupfer_S	Kupfer	17 04 01
Metalle	Zink_S	Zink	17 04 04
Metalle	Alu_S	Aluminium	17 04 02
Metalle	MixMetall_S	Metall Mix	17 04 07
Metalle	MetallBel_S	Metall belastet	17 04 09
Kunststoffe	DämmKst_S	Dämmstoffe, Kunststoff	17 06 01, 17 06 03, 17 06 04
Kunststoffe	PVCBoden_S	Bodenbelag Kunststoff	17 02 03
Kunststoffe	RahmenPVC_S	s. ecoinvent	17 02 03
Kunststoffe	Dachbahn_S	Dachbahn	17 02 03
Kunststoffe	KstFolie_S	Dichtungsbahnen	17 02 03
Kunststoffe	MixKst_S	Kunststoff Mix	17 02 03

Kunststoffe	KstBel_S	Kunststoff Belastet	10 02 04
Holz	Holz_1_S	unbehandeltes Holz	17 02 01
Holz	Holz_2_S	verleimtes/gestrichenes Holz	17 02 01
Holz	Holz_3_S	beschichtetes Holz	17 02 01
Holz	Holz_4_S	mit Holzschutzmittel behandeltes Holz	10 02 04
Holz	MixHolz_S	Holz Mix unbelastet	17 02 01
Holz	MixHolzBel_S	Holz Mix belastet	10 02 04
Glas	Flachglas_S	Flachglasbruch	17 02 02
Glas	Flachglas_beschichte t_S	Glasbruch, verunreinigt	17 02 02
Verbund	Rahmen_HolzAlu_S		

Tabelle 7 Schwerpunkt der mineralischen Abfälle mit Abfallschlüssel

Entwicklung synthetischer Rohstoffkennwerte

Die entwickelten Rohstoffkennwerte sind in ihrer Struktur so aufgebaut, dass einzelne Schichten und Komponenten der Bauelemente variiert werden können. d. h. die generischen Werte sind an die entwickelten Modellierungsstufen (*MaterialLayerSet*, *LayerMaterial*, *BuildingMaterial*, *RawMaterial*) angepasst. Je nach Datenverfügbarkeit können Gebäudekomponenten näher spezifiziert werden. Außerdem können BIM-Modelle aus generischen oder konkreten Gebäudedaten erstellt werden. Die hier entwickelten synthetischen Rohstoffkennwerte bilden altersklassenspezifische Durchschnittswerte für reale Konstruktionsvarianten ab. Damit bietet die Struktur eine höhere Transparenz als die Ermittlung theoretischer Kennwerte auf Gebäudeebene.

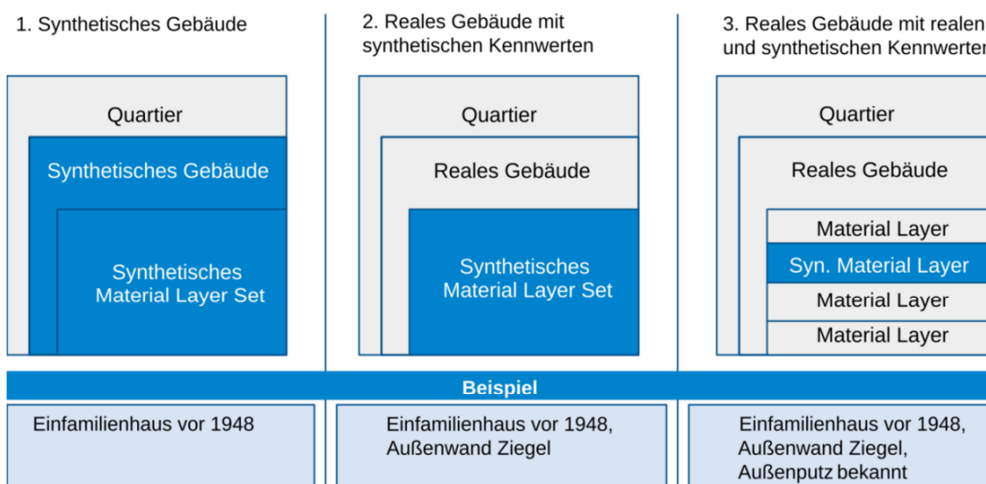


Abbildung 13 Aufbau und Anwendung synthetischer Rohstoffkennwerte

Um die heterogene Verteilung der Materialien und Baukonstruktionen deutscher Wohngebäude zu abstrahieren, wurden die synthetischen Rohstoffkennwerte in zwei Schritten entwickelt:

Aus der Literatur wurden aus Gebäudesteckbriefen und -repräsentanten sowie altersklassenspezifischen Merkmalen Regelmäßigkeiten abgeleitet und den definierten synthetischen Gebäudetypen zugeordnet. Für jede Gebäudeklasse wurden somit die qualitativ charakteristischste Bauweisen erfasst. Die repräsentativen Bauweisen wurden durch Expertenmeinungen und Statistiken zum Baustoffaufkommen validiert. Die erhobenen Daten aus der Bauakteneinsicht wurden ebenfalls zur Validierung verwendet (Abbildung 13). Die Menge der Datensätze aus der Bauakteneinsicht erwies sich allerdings als nicht ausreichend für eine repräsentative Aussage. Eine quantitative Zuordnung statistischer Anteile erfolgt, soweit möglich, durch Marktstatistiken und Erhebungen des statistischen Bundesamts. Insgesamt konnten wenige quantitative Daten zur Verteilung der Konstruktionsvarianten gefunden werden. Eine weitere Überprüfung und Anpassung in der praktischen Anwendung wird daher empfohlen. Liegen für Bauteilarten keine statistischen Informationen vor, wurden über die Auswertung der Daten eine Einschätzung für die Häufigkeit des Vorkommens (Skala von 1-3) gegeben. Die Zuweisung der Detailtiefe ist in Tabelle 8 aufgeführt.

Altersklassen						
Bauteil	Vor 1948	1949 -1978	1979 - 1994	1995 - 2009	Nach 2009	Quellen
Fundament/Bodenplatte	Q	Q	Q	Q	Q	Klauß, Loga, Leibnitz, Baunetz, Buchert, PRRIG
Außenwand	S	Q	S	S	S	Klauß, Loga, Leibnitz, Baunetz, Statista 2020, Buchert, Weglage, BBSR
Innenwand	Q	Q	Q	S	Q	Klauß, Loga, Leibnitz, Baunetz, Buchert, IRB
Kellerdecke	S	Q	Q	Q	Q	Klauß, Loga, Leibnitz, Baunetz, Weglage
Zwischendecke	S	Q	Q	S	Q	Klauß, Loga, Leibnitz, Baunetz, Weglage

Oberste Geschosdecke	S	Q	Q	Q	Q	Klauß, Loga, Leibnitz, Baunetz, Weglage
Dach	Q	Q	Q	S	Q	Klauß, Loga, Leibnitz, Baunetz, Buchert
Tür	E	E	E	E	E	Klauß, Loga, Leibnitz, Baunetz, Bauteilnetz
Fenster	S	S	S	S	S	Weglage 2010, IWU, VFF
Treppe	Q	Q	Q	Q	Q	Klauß, Loga, Leibnitz, Baunetz
Balkon	Q	Q	Q	Q	Q	Klauß, Loga, Leibnitz, Baunetz

Tabelle 8 Detailtiefe der Bestimmung repräsentativer Bauteilarten für den Gebäudetyp Einfamilienhaus geordnet nach quantitativen Erhebungen durch Statistiken (s), qualitativen Darstellungen (Q) und Abschätzungen (E)

Für jede der identifizierten repräsentativen Konstruktionsvarianten wurde ein synthetisches **MLS** entwickelt. Die Zusammensetzung wird auf die Referenzgröße einer Bauteileinheit bezogen (Menge pro m² Wand), sodass diese mit den Dimensionen der Bauteile skaliert werden können. Synthetische **MLS** können aus generischen (altersklassenspezifischen) oder und konkreten **LM** aufgebaut sein. Generische **LM** definieren für die spezifische Altersklasse häufig eingesetzte Ausführungen bestimmter Baustoffe (Lochziegel, Vollziegel) und die quantitativen Anteile der eingesetzten **BM**. Die Auswahl der Schicht erfolgt nach dem am häufigsten eingesetzten Material in der Altersklasse. Charakteristika der verwendeten **BM** (z. B. Rohdichte) sind den jeweiligen BM hinterlegt. Für die Rohdichten wurden Durchschnittswerte des verwendeten Baustoffs angegeben. Die Detailtiefe der Kennwerte und der ermittelten Werte orientiert sich am Rückbau und Verwertungspotenzial und nicht an speziellen Konstruktionstypen (Rippendecke, Balkendecke etc.). Dies gilt sowohl für die im Gebäude verbauten Baustoffe (BM) als auch für die nach dem Abbruch freiwerdenden Stoffe (SM).

Beschreibung generischer MLS, LM, BM und RM am Beispiel Außenwand

Der übliche Schichtaufbau einer Außenwand gliedert sich in die Wandkonstruktion und Wandbekleidungen. Für die Konstruktionsvariante Ziegelwand wurde jeweils ein synthetisches MLS für die jeweilige Altersklasse entwickelt (Tabelle 9). Aus repräsentativen Bauteilen wurde eine durchschnittliche Dimension einer Schicht für eine Altersklasse bestimmt.

Daten- typ	Kategorie	Alters- klasse	Bezeichnung MLS	Bezeichnung ML	Dicke [cm]
MLS	330_Aussenwand	1949 bis 1978	330_MW_Ziegel1979_MLS	Put_PutzGips_LM	1
MLS	330_Aussenwand	1949 bis 1978	330_MW_Ziegel1979_MLS	Mau_Ziegelmauer1979_L M	30
MLS	330_Aussenwand	1949 bis 1978	330_MW_Ziegel1979_MLS	Däm_DämmMin_LM	3
MLS	330_Aussenwand	1949 bis 1978	330_MW_Ziegel1979_MLS	Put_Kalkzementputz_LM	1,5

Tabelle 9 Beschreibung des synthetischen MLS „Ziegelwand 1949 – 1978“

Für die Wandkonstruktion wurden „bottom-up“ synthetische LM entwickelt, die jeweils das Verhältnis des Ziegelmaterials zum Mörtel bestimmen. Die **BM** skalieren dabei linear mit der Dimension des Bauteils. Diese sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Altersklasse	Bezeichnung ML	Bezeichnung BM	Anteil [%]
Vor 1948	Mau_Ziegelmauer1948_LM	Min_Ziegel_BM	82
Vor 1948	Mau_Ziegelmauer1948_LM	Min_KalkZemMörtel_BM	18
1949 bis 1978	Mau_Ziegelmauer1979_LM	Min_Lochziegel_BM	82
1949 bis 1978	Mau_Ziegelmauer1979_LM	Min_MörtelNN_BM	18
1979 - 1994	Mau_Ziegelmauer1995_LM	Min_Lochziegel_BM	89
1979 - 1994	Mau_Ziegelmauer1995_LM	Min_MörtelNN_BM	11
1995 - 2010	Mau_Ziegelmauer2010_LM	Min_Lochziegel_BM	99
1995 - 2010	Mau_Ziegelmauer2010_LM	Min_MörtelNN_BM	1
2010 - 2021	Mau_Ziegelmauer2021_LM	Min_Lochziegel_BM	99
2010 - 2021	Mau_Ziegelmauer2021_LM	Min_MörtelNN_BM	1

Tabelle 10 Beschreibung synthetischer LM für den Konstruktionstyp Ziegelwand 1949 - 1978

Den BM werden Raw Materials (RM) zugeordnet, die aus typischen Zusammensetzungen gewonnen wurde. Die Zusammensetzung der BM wurde über die Altersklassen als konstant angenommen. Diese sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Bezeichner BM	Rohdichte	Bezeichner Rm	Anteil
Min_Kalkmörtel_BM	1700	Min_Sand_RM	78
Min_Kalkmörtel_BM	1700	Min_Kalk_RM	22
Min_Zementmörtel_BM	1900	Min_Zement_RM	20
Min_Zementmörtel_BM	1900	Min_Sand_RM	80
Min_MörtelNN_BM	1600	Min_Zement_RM	7
Min_MörtelNN_BM	1600	Min_Sand_RM	77
Min_MörtelNN_BM	1600	Min_Kalk_RM	16

Tabelle 11 Beschreibung generischer BM für das Material „Mörtel“

Abgleich mit den erhobenen Bauakten

Für die ermittelten Kennwerte wurde ein Abgleich mit den in den Bauakten erhobenen Daten durchgeführt. Für das Bauelemente SFH1995_Aussenwand bzw. MFH1995_Aussenwand war die Anzahl der erhobenen Bauakten hinreichend groß, um eine Überprüfung der Anteile der entwickelten MLS durchführen zu können. Es zeigte sich, dass in etwa der Hälfte der jeweiligen Bauakten keine Angaben zu spezifischen Materialien vorhanden waren und daher keine verlässlichen Aussagen generiert werden können. Allerdings wurde bestätigt werden, dass die Zuordnung der MLS grundsätzlich plausibel ist. Der Abgleich der Daten ist in Abbildung 14 grafisch dargestellt.

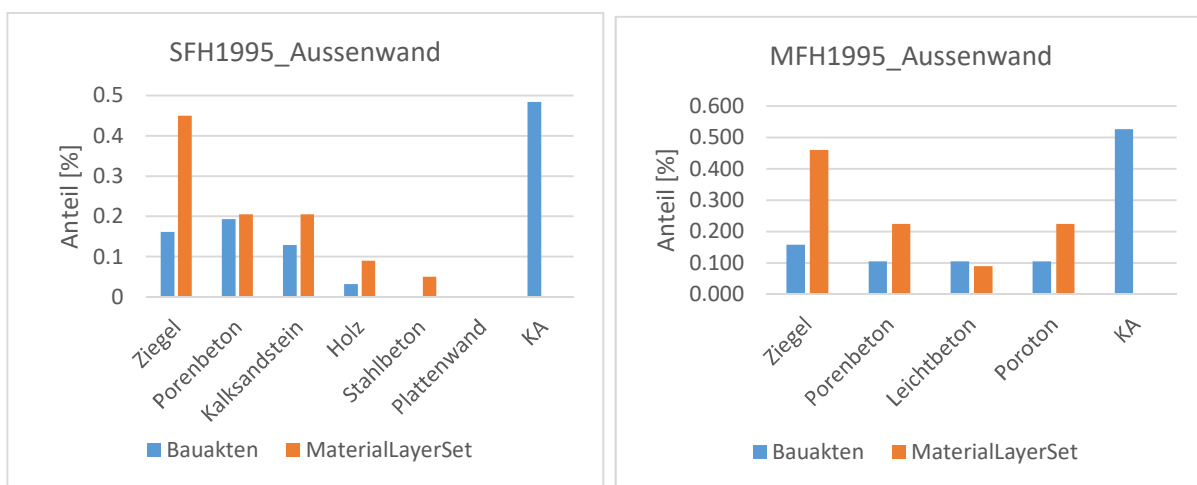


Abbildung 14 Abgleich der im Projekt empirisch erhobenen Daten mit den entwickelten generischen MLS

Für die generischen MLS *Stahlbeton1979_MLS* und *Beton1979_MLS* wurde ein Abgleich mit den in den Bauakten erhobenen Schichten und Schichtdicken durchgeführt, dies ist in Abbildung 15 abgebildet. Die Abweichungen der Werte wurden im Rahmen der erforderlichen Genauigkeit als gering identifiziert.

	Schicht	Dic	Schicht	Dic	Schicht	Dic	Schicht	Dic
		ke		ke		ke		ke
		[m]		[m]		[m]		[m]
<i>Mittelwert Bauakten</i>	Estrich	0,0	Dämmung	0,0	Beton	0,1	Putz	0,0
		34		21		57		16
<i>Stahlbeton1979_MLS</i>	Est_EstrichNN_04_ML	0,0	Däm_DämmNN_2.25_ML	0,0	Mas_Stahlbeto_n_16_ML	0,1	Put_PutzGip_s_1_ML	0,0
		4		25		5		1
<i>Beton1979_MLS</i>	Est_EstrichNN_04_ML	0,0	Mas_DämmNN_03_ML	0,0	Mas_Beton_15_ML	0,1	Put_PutzGip_s_1_ML	0,0
		4		3		6		1

Abbildung 15 Abgleich der im Projekt empirisch erhobenen Daten mit den entwickelten generischen LM

7.2. Verwertungstechnologien

Einordnung der Abbruchverfahren

Nach der Baufachlichen Richtlinie Recycling umfasst der Begriff Rückbau "alle Maßnahmen zur teilweisen oder vollständigen Beseitigung von baulichen Anlagen, Bauwerken oder Einbauten. Rückbau umfasst die Teilleistungen Entrümpelung, Demontage, Entkernung und Abbruch. Diese sind in Abbildung 16 grafisch dargestellt. Abbruch bezieht sich im Rahmen dieser Baufachlichen Richtlinien ausschließlich auf die Beseitigung der konstruktiven Elemente eines Bauwerkes." (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2018) Da im Projekt RessStadtQuartier ebenfalls Sanierungsmaßnahmen adressiert werden, wurde neben konstruktiven Elemente auch der Rückbau der Gebäudehülle betrachtet.

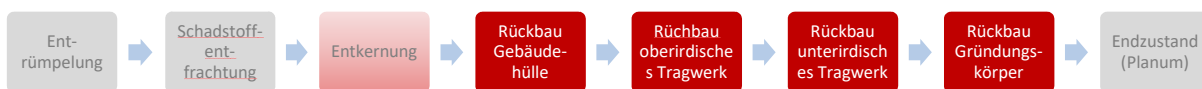


Abbildung 16 Phasen des Rückbaus. Phasen, die im Projekt RSQ betrachtet wurden, sind rot hervorgehoben.

Bewertung und Modellierung der Abbruchoptionen

Bei der Wahl des Abbruchverfahrens wurden folgende Einflussgrößen als relevant eingestuft, auf die der Entscheider im Vorfeld keinen Einfluss hat (Wöltjen 2016; Krause und Ulke 2016):

- Bauwerksart und Bauweise
- Bauteiltyp und Geometrie des Bauteils
- Baustoff
- Einsatzhöhe
- Sicherheitsbestimmungen
- Umgebungsbedingungen

Als Entscheidungsparameter, die einen wesentlichen Einfluss auf die Bilanzierung des Verfahrens haben, wurden folgende identifiziert ((Wöltjen 2016), Experteninterviews):

- Einsatz der spezifischen Technologie
- Abbruchart und Selektivität der Abbruchabfälle
- Betriebsbedingungen

Beim Gebäudeabbruch wird in der Praxis meist unterschieden zwischen dem **konventionellen Abbruch** (ohne Vorarbeiten zur Separierung und/oder Wiedergewinnung des Abbruchmaterials,

heterogenes Baustoffgemisch wird erzeugt (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2018) dem **teilselektiven Abbruch** (Maßnahmen zur selektiven Trennung der Baustoffe werden teilweise durchgeführt) und dem **selektiven Abbruch/Rückbau** (zerstörungssarmer Abbruch von Bauteilen mit dem Ziel der Wieder- oder Weiterverwendung (VDI 2016)). Da nach aktuellem Stand der konventionelle Abbruch kaum mehr angewandt (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE) 2019) und eine Separierung der Baustoffe nach KrWG gefordert ist, wurde im Projekt der teilselektive und selektive Abbruch betrachtet.

Nach diesen Entscheidungskriterien wurden für das EoL-Modell zwei Varianten für den Abbruch entwickelt:

Option 1: Selektiver Abbruch	Option 2: Teilselektiver Abbruch
Modellierung: Stufenweise Entfernung der ML	Modellierung: Entfernung gesamtes MLS

Auswahl der bewerteten Verfahren und Zuordnung der Technologien zu Baustoffen

Nach DIN 18007:2000-05 sind Abbruchverfahren untergliedert in die Hauptgruppen mechanische Verfahren, thermische Verfahren, chemische Verfahren und hydrodynamische Verfahren. Um Abbruchverfahren bewerten zu können, muss eine Zuordnung zu konkreten Technologien und deren technischen Kenngrößen erfolgen. Die verwendeten Technologien zur Durchführung werden hier unterteilt in:

- maschinelle Abbruchverfahren mit Träger- und Anbaugerät (Hydraulikbagger, Seilbagger, Radlader)
- Handmaschinen
- Abbruchroboter
- Manuelle Verfahren

Für die Bewertung erfolgte eine Auswahl von Verfahren, die nach der Erhebung von (Wöltjen, 2016) als modern angesehen werden oder eine besondere Eignung für einen bestimmten Baustoff aufweisen. Nach (Wöltjen, 2016) wurde in 83% der Fälle der verwendeten Geräte ein Hydraulikbagger mit Anbaugerät verwendet. Seilbagger verlieren an Bedeutung (Krause und Ulke, 2016) und werden daher nicht betrachtet. Aus den Experteninterviews ergab sich, dass in den letzten 5-6 Jahren keine wesentlichen Neuerungen zu verzeichnen waren. Lediglich die Verbesserung der Leistung und Energieeffizienz der Geräte sowie der Einsatz von Hybrid-Geräten kann als Neuerung angesehen werden. Insbesondere im innerstädtischen Bereich werden

lärmschonende Anbaugeräte wie Greifer, Zangen und Scheren bevorzugt, sofern das spezifische Gebäude dies zulässt.

Auf Grundlage der ermittelten Verfahren für den Abbruch wurde eine Zuordnungsmatrix erstellt, die die Materialschichten geeigneten Rückbautechnologien zuordnet. Diese ist in Abbildung 17 aufgezeigt. Die Zuordnung berücksichtigt die besondere Eignung der Verfahren für den selektiven Rückbau. Da eine absolute Abgrenzung der Eignung eines Verfahrens schwer möglich ist, dient sie vor allem als Orientierung für die Auswahl der Technologien.

Trägergerät	Anbaugerät	Schicht		Kategorie	
		1	2	1	2
Hydra ulkibagger	Hydraulika mmer				
Hydra ulkibagger	Abbruchange/schere				
Hydra ulkibagger	Pulverisierer				
Hydra ulkibagger	Schrottschere/Stahlschere				
Hydra ulkibagger	Abbruchstift				
Hydra ulkibagger	Reißzahn				
Hydra ulkibagger	Abbruch-/Sortiergreifer				
Hydra ulkibagger	Fräse				
Hydra ulkibagger	Tiefloßel				
Hydra ulkibagger	Abrißsäge				
Hydra ulkibagger	Kranhaken				
Hydra ulkibagger	Abbruchstift				
Seilbagger	Abbruchange/schere				
Seilbagger	Abbruch-/Sortiergreifer				
Seilbagger	Reißsäge				
Seilbagger	Kranhaken				
Radlader	Hydraulika mmer				
Radlader	Ladeschaufel				
Abbruch-Roboter	Hydraulika mmer				
Abbruch-Roboter	Abbruchange/schere				
Abbruch-Roboter	Schrottschere/Stahlschere				
Abbruch-Roboter	Abbruch-/Sortiergreifer				
Abbruch-Roboter	Fräse				
Wasserstrahlgerät	Brennschneider				
Schleifgerät					
Minibagger	Tiefloßel				
Handabbruch					

Abbildung 17 Zuordnungsmatrix von Materialschichten zu geeigneten Rückbautechnologien

LCA-Datensätze für den Abbruchvorgang

Die Erstellung der Sachbilanz erfolgte aus den Ergebnissen der Experteninterviews, Vor-Ort-Beobachtung, technischen Datenblättern, Literaturwerten und LCA-Datenbanken. Wesentliche Erkenntnisse aus den empirischen Untersuchungen sind wie folgt dargestellt:

- Die Technologie (Anbaugerät + Operation) und der Vorgang bzw. der Art der Tätigkeit sind für den Energieverbrauch entscheidend, der Baustoff hat einen weniger signifikanten Einfluss.
- Der Einfluss weiterer Verbrauchsmaterialien (z. B. Schmiermittel für den Maschinenbetrieb) ist gering.
- Die Staubentwicklung ist von der Geräteführung abhängig. Zur Eindämmung der Staubemissionen wurde die Bedüsung mit Wasserschlauch als die am häufigsten angewandte Methode identifiziert. Staubkanonen sowie Bedüsen direkt am Abbauwerkzeug werden als Neuerungen gesehen. Bei höheren Gebäuden werden

Druckerhöhungsanlagen verwendet. Diese werden im Bereich der Wohngebäude allerdings als vernachlässigbar angesehen.

Berechnungsmethodik für die verfahrensspezifische Bewertung der Abbruchverfahren

Da für die Erstellung des LC-Quartier-Tools die Datenbank ecoinvent gewählt wurde, wurde aus Konsistenzgründen für die EoL-Phase ebenfalls auf ecoinvent zurückgegriffen.

In der Datenbank ecoinvent wurden Datensätze für spezifische Materialien identifiziert und entsprechenden Bauteilen zugeordnet. Da diese Datensätze wenig detailliert und flexibel in Bezug auf die Wahl der spezifischen Abbruchtechnologie sind, wurden Datensätze aus empirischen Abbruchvorgängen nach (Motzko et al. 2016) erstellt. Diese bilden Durchschnittswerte für konkrete Verfahren für eine bestimmte Gerätekonfiguration ab. Hierzu wird der Zusammenhang zwischen Energie- und Materialverbrauch und Maschinendaten hergestellt, um die Sachbilanz für bestimmtes Abbruchverfahren schnell ermitteln zu können. Die Einflussgrößen, auf die der Entscheider keinen Einfluss hat, können über die **Grundleistung** eines Abbruchgeräts abgebildet werden. Betriebsparameter und Baustellenbedingungen werden über die **Nutzleistung des Grundgeräts** abgebildet. Mit der **Kenngröße** wird eine Gerätegröße innerhalb einer Geräteart gekennzeichnet (König 2014). Der abgeschätzte Energiebedarf ergibt sich aus der Motorenleistung p und der Nutzleistung der Gerätekombination Q_a :

$$W = \frac{p \text{ [kW]}}{Q_a \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right]}$$

Nach (Motzko et al. 2016) wurde für den Vorgang eine durchschnittliche Verteil- und Erholzeit von 25% der Gesamtzeit angenommen. Die Datensätze für die jeweiligen Abbruchvorgänge, beispielsweise *Abbruch Mauerwerk mit Sortiergreifer* beinhalten die Nutzleistung der jeweiligen Kombination Anbaugerät-Bauteil /Konstruktion-Verfahren in m^2/h . Da im Projekt vereinbart wurde, dass in den laufenden Betrieb der Abbrucharbeiten nicht eingegriffen wird, konnte eine Erhebung realer Energieverbräuche im Projekt nicht erfolgen. Daher wurde als Motorenleistung jeweils die Maximalleistung verwendet. Dieser Wert kann in Folgeprojekten durch die Erhebung von Messdaten überprüft werden. Die Beschreibung der Abbruchverfahren ist in Abbildung 18 aufgelistet.

#	Name	Beschreibung	FE
1	Abbruch_Wand_Putz_Daemmung	Putz abschaben und Daemmaterial mit Handgeraeten entfernen	m ² Bauteil
2	Abbruch_Wand_Gipsplatte	Rückbau Gipskarton mit Vorschlaghammer und Stemmeisen und Entsorgung	m ² Bauteil
3	Abbruch_Wand_MW_1_Abgreifen	Abgreifen des Mauerwerks mit Sortiergreifer	m ² Bauteil
4	Abbruch_Wand_MW_2_Einschlagen	Einschlagen von Mauerwerkswänden	m ² Bauteil
5	Abbruch_Wand_MW_3_Pressschneiden	Pressschneiden von Mauerwerkswänden	m ² Bauteil
6	Abbruch_Wand_MW_4_Abgreifen	Abgreifen des Mauerwerks mit Sortiergreifer und verladen mit Tieflöffel	m ² Bauteil
7	Abbruch_Wand_MW_5_Eindruecken	Eindrücken von Mauerwerkswänden	m ² Bauteil
8	Abbruch_Wand_MW_6_Rueckbau	Rückbau (pressschneiden, eindrücken und einziehen) der Mauerwerkswände	m ² Bauteil
9	Abbruch_Wand_Stahlbeton_1_Pressschneiden	Pressschneiden der Außenwand und Sortieren des Materials	m ² Bauteil
10	Abbruch_Wand_Stahlbeton_2_Pressschneiden	Pressschneiden der Außenwand und Sortieren des Materials	m ² Bauteil
11	Abbruch_Wand_Stahlbeton_3_Pressschneiden	Pressschneiden der Außenwand und Aussortieren der Dämmung	m ² Bauteil
12	Abbruch_Decke_Deckenbelag_Manuell	Reissklaue	m ² Bauteil
13	Abbruch_Decke_Deckenbelag_Abgreifen	Hydraulikbagger mit Abbruch-/Sortiergreifer	m ² Bauteil
14	Abbruch_Decke_Estrich_Abstemmen	Estrich mit Stemmhammer entfernen	m ² Bauteil
15	Abbruch_Decke_Estrich_Abgreifen	Estrich mit Hydrauligbagger und Sortiergreifer abgreifen	m ² Bauteil
16	Abbruch_Decke_Stahlbeton_1_Pressschneiden	Pressschneiden der Decke und verladen	m ² Bauteil
17	Abbruch_Decke_Stahlstein_2_Stemmen	Stemmen der Decke mit Hydraulikbagger und Anbaugeräten	m ² Bauteil
18	Abbruch_Decke_Stahlbeton_3_Pressschneiden	Pressschneiden der Decke Hydraulikbagger und Anbaugeräten	m ² Bauteil
19	Abbruch_Decke_Stahlbeton_4_Stemmen_Pressschneiden	Stemmen/Pressschneiden der Decke Hydraulikbagger und Anbaugeräten	m ² Bauteil
20	Abbruch_Decke_Mauerwerk	Hydraulikbagger mit Abbruch-/Sortiergreifer	m ² Bauteil
21	Abbruch_Fenster_Scherschneiden	Scherschneiden des Fensterrahmens mit Hydraulikbagger mit Abbruchzange/schere & Tieflöffel	m ² Bauteil
22	Abbruch_Fenster_Demontage	Abstemmen der Fenster mit Stemmeisen	item Bauteil
23	Abbruch_Fenster_Ausbau	Bohrmaschine, Hammer, Meißel	item Bauteil
24	Abbruch_Dachziegel_Dämmung_abstossen	Dachziegel und Dämmung mit Handwerkzeug abstoßen	m ² Bauteil
25	Abbruch_Dach_Holzkonstruktion_Abgreifen	Dachkonstruktion abgreifen mit Hydraulikbagger und Sortiergreifer	m ² Bauteil

Abbildung 18 Beschreibung der Abbruchverfahren

Prozess: Abbruch_Bauteil_Konstruktion_Verfahren

Referenzfluss: 1m² Bauteil

Datensätze Betrieb der Technologie

Für die Modellierung beliebiger Abbruchgeräte wurde ein Datensatz erstellt, der den **Betrieb einer Technologie** abhängig vom Gewicht bzw. der Motorenleistung des Geräts abbildet. Die Methodik ist auf alle Abbruchverfahren anwendbar, indem die **Leistung des Trägergeräts** und der **Nutzleistung des Abbruchverfahrens** bzw. des abzubrechenden Bauteils eingegeben wird. Der Datensatz beruht auf folgenden Grunddaten:

- Kraftstoffverbrauch 0,15 – 0,18 l /kWh (Krause und Ulke, 2016)
- Zusammenhang zwischen Kraftstoffverbrauch und Größe des Trägergeräts linear (Wöltjen, 2016)
- Schmier- und Pflegestoffe sowie die Produktion der Maschine sind im Datensatz enthalten

Prozess: Abbruch_Bauteil_Verfahren

Referenzfluss: 1 m² Bauteil

Verwertungswege und -technologien

Für die im Gesamtmodell beschriebenen Sekundärstoffe wurden Verwertungsoptionen identifiziert und in einer Zuordnungsmatrix nach vier Kategorien klassifiziert

- Stoffliche Verwertung in einer gleichen oder gleichwertigen Anwendung, Einsatz im Hochbau

- Stoffliche Verwertung in einer anderen Anwendung mit geringeren Qualitätsanforderungen
- Energetische Verwertung
- Sonstige Verfüllung oder Beseitigung

Für das jeweilige Verfahren wurde bestimmt, ob es derzeit als üblich gilt, technisch möglich, jedoch noch wenig angewandt oder nicht zulässig bzw. technisch eingeschränkt ist. Hierfür wurden vorwiegend die Quellen (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) 2016; Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat 2018; Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB); Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V. 2018; Hopkinson et al. 2019; Hillebrandt et al. 2018; Bundesministerium der Justiz 2002) sowie die Experteninterviews herangezogen.

Da die Wiederverwendung auf der Bauteilebene stattfindet, wurde eine Einschätzung für die Wiederverwendbarkeit der aus einem bestimmten Material bestehenden Bauteile gegeben (Tabelle 12). Zu Handlungsempfehlungen zur Wiederverwendbarkeit von Bauteilen kann direkt auf die Ergebnisse des Projekts WieBauln zurückgegriffen werden.

Kategorie	ID	Wiederverwendung	Verwertung			Beseitigung
			Stofflich hochwertig	Stofflich minderwertig	Energetisch	
						Verfüllung
Mineralik	Betonbruch_S	möglich	üblich	üblich	nicht möglich	-
Mineralik	BetonbruchMix_S	-	möglich	üblich	nicht möglich	möglich
Mineralik	Porenbeton_S	möglich	technisch eingeschränkt	möglich	nicht möglich	üblich
Mineralik	Ziegel_S	möglich	möglich	üblich	nicht möglich	üblich
Mineralik	MWZiegel_S	-	möglich	üblich	nicht möglich	üblich
Mineralik	Kalksandstein_S	möglich	möglich	üblich	nicht möglich	üblich
Mineralik	MWKalksandstein_S	-	möglich	üblich	nicht möglich	üblich
Mineralik	Naturstein_S	möglich	möglich	üblich	nicht möglich	-
Mineralik	MixMineral_S	-	technisch eingeschränkt	möglich	nicht möglich	üblich
Mineralik	MixBauschutt_S	-	technisch eingeschränkt	üblich	nicht möglich	üblich
Mineralik	FliesenBruch_S	-	möglich	üblich	nicht möglich	üblich
Mineralik	GipsK_S	möglich	möglich	möglich	nicht möglich	üblich
Mineralik	GipsMix_S	-	nicht möglich	möglich	nicht möglich	üblich
Mineralik	DämmMin_S	möglich	möglich	möglich	nicht möglich	möglich
Metalle	Stahl_S	möglich	üblich	-	nicht möglich	-
Metalle	Kupfer_S	-	üblich	-	nicht möglich	-
Metalle	Zink_S	-	üblich	-	nicht möglich	-
Metalle	Alu_S	-	üblich	-	nicht möglich	-
Metalle	MixMetall_S	-	üblich	-	nicht möglich	-
Kunststoffe	DämmKst_S	möglich	möglich	möglich	üblich	-
Kunststoffe	PVCBoden_S	-	üblich	-	möglich	-
Kunststoffe	Dachbahn_S	-	möglich	möglich	üblich	-
Kunststoffe	KstFolie_S	-	-	möglich	üblich	nicht möglich
Kunststoffe	MixKst_S	-	technisch eingeschränkt	möglich	üblich	-
Holz	Holz_1_S	möglich	möglich	üblich	üblich	nicht möglich
Holz	Holz_2_S	möglich	möglich	möglich	üblich	nicht möglich
Holz	Holz_3_S	möglich	möglich	möglich	üblich	nicht möglich
Holz	Holz_4_S	-	nicht möglich	nicht möglich	üblich	nicht möglich
Holz	MixHolz_S	-	möglich	möglich	üblich	nicht möglich
Glas	Flachglas_S	-	möglich	möglich	nicht möglich	üblich
Glas	Flachglas_beschichtet_S	-	möglich	möglich	nicht möglich	üblich
Verbund	Rahmen_HolzAlu_S	-	-	möglich	-	möglich
Verbund	RahmenPVC_S	möglich	-	möglich	-	möglich
Verbund	Rahmen_Holz_S	-	-	möglich	-	möglich

Tabelle 12 Kategorisierung der Wiederverwendung von Baustoffen

Für die ökologische Bewertung des jeweiligen Verfahrens wurden drei Faktoren als entscheidend identifiziert:

- Der Einsatz der spezifischen Technologie

- Das zu bearbeitende Material
- Mobile oder stationäre Aufbereitung

Für die klassifizierten Verwertungsverfahren wurden für die beschriebenen Sekundärbaustoffe Datensätze bereitgestellt, die entweder modelliert wurden oder der Datenbank ecoinvent 3.7 entstammen. Die Modellierung von Ökobilanzdatensätzen erfolgte für Materialien aus der fokussierten Stoffgruppe Mineralik oder die Relevanz für Sanierungsmaßnahmen (z. B. Fensterglas, Dachziegel). Die Datensätze beinhalten den durchschnittlichen Transport zur Aufbereitungsanlage bzw. den Transport der Aufbereitungsanlage zur Baustelle sowie die Aufbereitung des Materials bis zum einsatzbereiten Baustoff. Für Datensätze, die keinen Transport abbilden, wurde ein generischer Transportprozess bereitgestellt.

Für die modellierten Verfahren wurden Steckbriefe erstellt (Tabelle 13), die das jeweilige Verfahren nach den Eigenschaften des Eingangsmaterials und des Ausgangsmaterials beschreiben und die Substitutionseffekte bezüglich einer möglichen Anwendung angeben. Außerdem sind weitere Informationen zum Status des Verfahrens beschrieben. Die Steckbriefe wurden für die Materialgruppen Beton, Ziegel, Kalksandstein, mineralischer Bauschutt, Dämmung, Gipskarton und Flachglas entworfen. Exemplarisch sind die Möglichkeiten der Stoffgruppe Ziegel abgebildet.

Ziegel					
Verwertungsoption	HQ_Ziegel_S	LQ_Ziegel_S	HQ_MWZiegel_S	LQ_MWZiegel_S	D_MWZiegel_S
Beschreibung	Vorabsiebung, Zerkleinerung und Klassierung, zweistufig	Aufbereitung ohne optische Sortierung, mehrstufige Klassierung und Siebung	Aufbereitung mit optischer Sortierung, einstufige Klassierung	Aufbereitung ohne optische Sortierung, mehrstufige Klassierung und Siebung	Verfüllung
Eingangsmaterial Bezeichner	Ziegel_S	Ziegel_S	MWZiegel_S	MWZiegel_S	MWZiegel_S

Eingangsmaterial Beschreibung	Mauerziegel und Klinker mit Anhaftungen	Mauerziegel und Klinker mit Anhaftungen	Mauerwerksbruch, Ziegel	Mauerwerksbruch, Ziegel	Mauerwerksbruch, Ziegel
Ausgangsmaterial	RC-Gesteinskörnung Typ 1 und Typ 2	RC-Gesteinskörnung	RC Gesteinskörnung Typ 2	RC Ziegel	
Nebenprodukte	Brechsand	Brechsand	Brechsand	Brechsand	-
Substitut für	Gesteinskörnung 2/8 mm, 8/16 mm und 16/22	Gesteinskörnung 0/45	Gesteinskörnung 8/22 (IFEU 2017)	Gesteinskörnung 0/32	
Anwendung	Bestandteil von RC-Gesteinskörnung Typ 1 und Typ 2, Einsatz im Hochbau	Einsatz in Schichten ohne Bindemittel	RC Gesteinskörnung Typ 2, Einsatz im Hochbau	Straßen-, Wege- und Verkehrsflächenbau Erdbau, Baustoff Recycling Bayern	Verfüllung
Anteil	Anteil von <= 10 % in RC-GK Typ 1	Max. 30 %	Anteil von <= 30 % in RC-GK Typ 2	Nach Anwendung; 5 M% erlaubt; 40 M% technisch möglich	
Status	Nicht wirtschaftlich, Nachfrage gering	Nicht wirtschaftlich, Nachfrage gering	Nicht wirtschaftlich, Nachfrage gering	Nicht wirtschaftlich, Nachfrage gering	Üblich
Potenzial	Das Recycling kann in denselben Anlagen erfolgen, die für das Betonrecycling konzipiert sind				
Einschränkungen			Feinfraktion mindert die technische	Feinfraktion mindert die technische Qualität	



			Qualität		
--	--	--	----------	--	--

Tabelle 13 Steckbriefe der modellierten Verwertungsverfahren

Die Stoffgruppen, die nicht in den Steckbriefen beschrieben sind, werden im Folgenden kurz erläutert.

Leichtbaustoffe (Porenbeton, Leichtbeton, Bims): Die Eignung von Leichtbetonstoffen für RC-Gesteinskörnung ist nicht gegeben, da die Festigkeit daraus hergestellter Körnungen gering ist. Einsatzgebiete im Straßenbau und bei der Betonherstellung sind daher nahezu ausgeschlossen (Hillebrandt et al. 2018). Es wurde daher ein Datensatz für die Verfüllung bzw. Beseitigung bereitgestellt.

Altholz: Der größte Anteil der Altholzfraktionen wird derzeit energetisch verwertet, was auf die Holzbehandlung in allen Altersklassen zurückzuführen ist. Der Einsatz in Spanplatten ist nahezu unbegrenzt möglich. Derzeit ist ein Altholz-Einsatz in der Holzwerkstoffindustrie von ca. 30% üblich. Es wird bereits nachgewiesen, dass ein Anteil von 90% technisch möglich ist. (Hillebrandt et al. 2018) Das betrachtete Verfahren zum hochwertigen Recycling betrachtet die Herstellung von Holzspänen zur Holzwerkstoffherzeugung. Als Alternative wird die energetische Verwertung betrachtet.

Kunststoffrezyklate: Für Kunststoffabfälle existieren etablierte Recyclingsysteme, allerdings Downcycling, da enthaltene Additive sowie physikalische und chemische Alterung die Eigenschaften verschlechtern können (Hillebrandt et al. 2018). Daher werden Kunststoffabfälle häufig thermisch verwertet. Für reine Kunststoffe wurde ein Datensatz zum stofflichen Recycling bereitgestellt. Für alle Kunststoffe, insbesondere Gemische, wurden Datensätze zur thermischen Verwertung bereitgestellt.

Metalle: Für Metalle sind bereits funktionierende Materialkreisläufe vorhanden. Metalle wurden im Projekt nicht näher betrachtet, da im Vorgängerprojekt PRRIG der Schwerpunkt bereits auf diesem Materialstrom lag (IWAR 2016). Für die ökologische Betrachtung wurden Datensätze für ein stoffliches Recycling aus der Datenbank ecoinvent bereitgestellt.

Kategorie	Bezeichner	S_ID	Option A	Datensatz	Systemgrenzen	Option B	Datensatz	Systemgrenzen	Option C	Datensatz	Systemgrenzen	Option D	Datensatz	Systemgrenzen
			Gebundene Anwendung /Hochbau											
Mineralik	Min. Betonbruch S	1	möglich	HQ_Betonbruch_S	Transport + Verwertung	üblich	IQ_Betonbruch_S	Transport + Verwertung	nicht möglich					
Mineralik	Min. Betonbruch/Mix S	2	möglich	HQ_Betonbruch/Mix_S	Transport + Verwertung	üblich	IQ_Betonbruch/Mix_S	Transport + Verwertung	nicht möglich			möglich	markt für inert wa	Transport + Verwertung
Mineralik	Min. Porebeton S	3	technisch eingeschränkt		Transport + Verwertung	möglich		Transport + Verwertung	nicht möglich			üblich	markt für inert wa	Transport + Verwertung
Mineralik	Min. Ziegel S	4	möglich	HQ_Ziegel_S	Transport + Verwertung	möglich	IQ_Ziegel_S	Transport + Verwertung	nicht möglich			üblich	markt für inert wa	Transport + Verwertung
Mineralik	Min. MWZiegel S	5	möglich	HQ_MWZiegel_S	Transport + Verwertung	möglich	IQ_MWZiegel_S	Transport + Verwertung	nicht möglich			üblich	markt für inert wa	Transport + Verwertung
Mineralik	Min. Kalksandstein S	6	möglich	HQ_Kalksandstein_S	Transport + Verwertung	möglich	IQ_Kalksandstein_S	Transport + Verwertung	nicht möglich			üblich	markt für inert wa	Transport + Verwertung
Mineralik	Min. MWKalksandstein S	7	technisch eingeschränkt		Transport + Verwertung	möglich	IQ_MWKalksandstein_S	Transport + Verwertung	nicht möglich			üblich	markt für inert wa	Transport + Verwertung
Mineralik	Min. MixMineral S	8	technisch eingeschränkt			möglich	IQ_MixMineral_S	Transport + Verwertung	nicht möglich			üblich	markt für inert wa	Transport + Verwertung
Mineralik	Min. Fliesenbruch S	9	möglich			nicht betrachtet	IQ_MixMineral_S	Transport + Verwertung	nicht möglich			üblich	markt für inert wa	Transport + Verwertung
Mineralik	Min. Gipsk S	10	möglich	HQ_Gipsplatten_S	Transport + Verwertung	nicht betrachtet		Transport + Verwertung	nicht möglich			üblich	markt für waste g	Transport + Verwertung
Mineralik	Min. GipsMix S	11	nicht möglich		Transport + Verwertung	nicht betrachtet		Transport + Verwertung	nicht möglich			üblich	markt für waste m	Transport + Verwertung
Mineralik	Min. DämmMin S	12	möglich	HQ_DämmMin_S	Transport + Verwertung			Transport + Verwertung	nicht möglich			üblich		
Metalle	Met. Stahl S	13	üblich		markt für waste reinfonen			markt für waste reinfonen	nicht möglich					
Metalle	Met. Kupfer S	14	üblich		markt für scrap copper 1. se			markt für scrap copper 1. se	nicht möglich					
Metalle	Met. Alu S	15	üblich		markt für zirc scrap post-c	Transport + Verwertung		markt für zirc scrap post-c	nicht möglich					
Metalle	Met. Alu S	16	üblich		treatment of aluminum scrap			treatment of aluminum scrap	nicht möglich					
Metalle	Met. MixMetall S	17	üblich		treatment of metal scrap			treatment of metal scrap	nicht möglich					
Kunststoffe	Kun. Dämmkfst. S	18	möglich		Verwertung	möglich		Verwertung	üblich	markt für	Transport + Verwertung			
Kunststoffe	Kun. PVC S	19	möglich			möglich			üblich	markt für	Transport + Verwertung			
Kunststoffe	Kun. Dachbahn S	20	möglich			möglich			üblich	markt für	Transport + Verwertung			
Kunststoffe	Kun. KstFolie S	21	möglich			möglich			üblich	treatment of waste po	Verwertung			
Kunststoffe	Kun. Mixkfst. S	22	nicht möglich			möglich			üblich	treatment	Verwertung	nicht möglich		
Holz	Hol. Holz 1 S	23	möglich		treatment of waste wood			treatment of waste wood	üblich	treatment	Verwertung	nicht zulässig		
Holz	Hol. Holz 2 S	24	möglich		treatment of waste wood			treatment of waste wood	üblich	treatment	Verwertung	nicht zulässig		
Holz	Hol. Holz 3 S	25	möglich						üblich	treatment	Verwertung	nicht zulässig		
Holz	Hol. Holz 4 S	26	nicht möglich			nicht möglich			üblich	treatment	Verwertung	nicht zulässig		
Holz	Hol. MixHolz S	27	möglich			möglich			üblich	treatment	Verwertung	nicht zulässig		
Glas	Gla. Flachglas bes. S	28	möglich	HQ_Flachglas_S	Transport + Verwertung	möglich	IQ_Flachglas_S	Transport + Verwertung	nicht möglich			üblich	treatment of waste	Transport + Verwertung
Glas	Gla. Flachglas S	29	möglich			möglich	IQ_Flachglas_S	Transport + Verwertung	nicht möglich			üblich	treatment of waste	Transport + Verwertung
Verbund	Ver. Rahmen_HolzAlu S	30	technisch eingeschränkt			möglich			üblich	id metal, collection for final disposal	used window	üblich		Transport + Verwertung
Verbund	Ver. Rahmen_Holz S	31	technisch eingeschränkt			technisch eingeschränkt			üblich	e. wood, collection for final disposal	used window	üblich		
Verbund	Ver. RahmenPVC S	32	möglich						üblich	p. plastic, collection for final disposal		üblich		

Tabelle 14 Steckbrief für die modellierten Verwertungsverfahren der Stoffgruppe Ziegel

Die Modellierung der Verwertungsoptionen wurde prozessscharf durchgeführt. Die Modellierung ist in Abbildung 19 und Tabelle 14 aufgeführt. Für die ermittelten Datensätze wurde eine Bewertung des Treibhauspotenzials durchgeführt, um die Datensätze auf ihre Gültigkeit zu prüfen. Für die Auswertung wurde die Methode EF 2.0 mit der Wirkungskategorie *climate change, total* verwendet. Die Bewertung wurde mit dem Systemmodell consequential durchgeführt. Konkret wurde die Veränderung der Umweltwirkungen mit der Verschiebung des Stoffstroms zur nächsthöheren Aufbereitungsstufe untersucht. Für alle stofflichen Verwertungsverfahren wurde eine Verminderung des Treibhauspotenzials festgestellt.

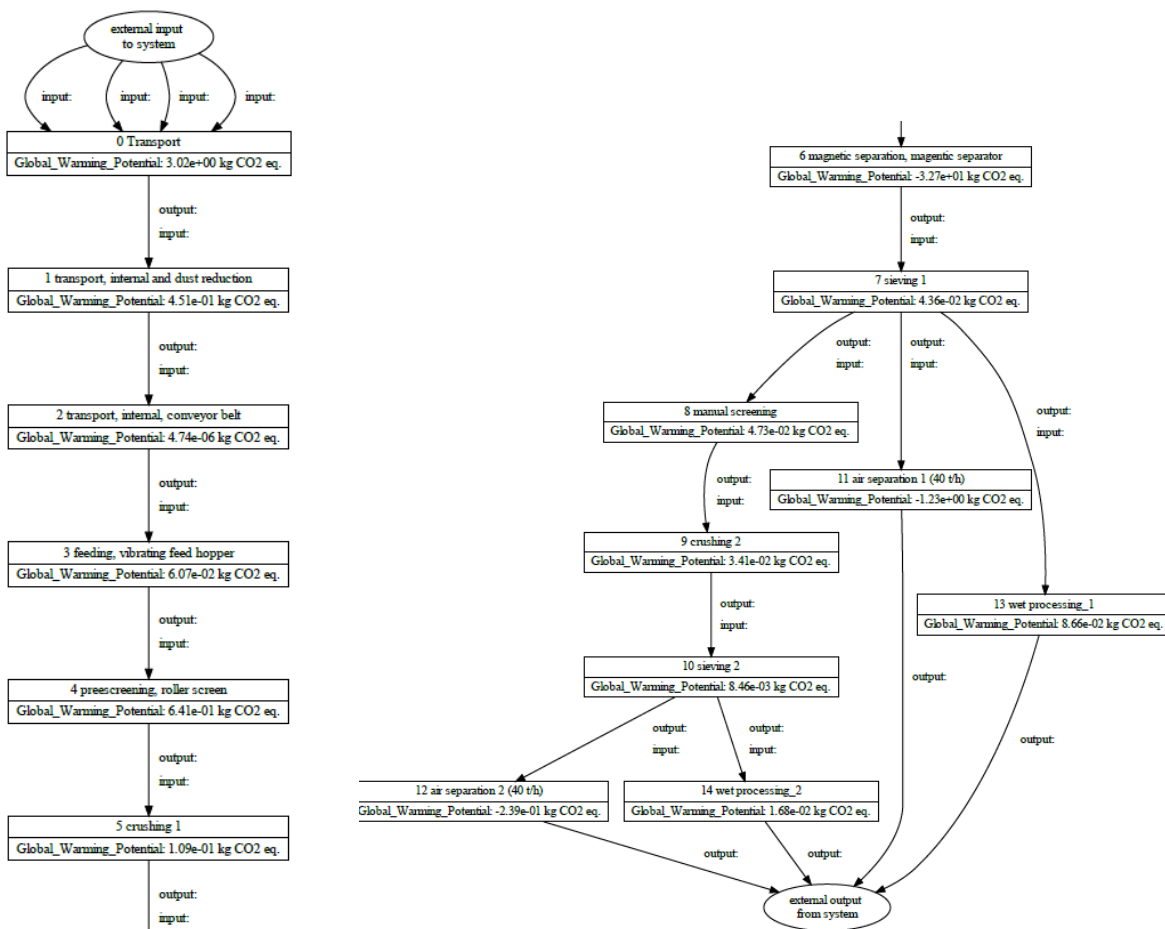


Abbildung 19 Fließbild der Aufbereitung von gemischtem Betonbruch

Es wurde außerdem ermittelt, dass die Transportdistanz von der Baustelle zur Aufbereitungsanlage bzw. zum Ort der Verfüllung den größten Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz hat. Exemplarisch ist das Prozessschema für die hochwertige Aufbereitung von gemischtem Betonbruch in Abbildung 20 dargestellt. Substitutionseffekte wurden durch eine Substitution der am Markt befindlichen Primärrohstoffe abgebildet.

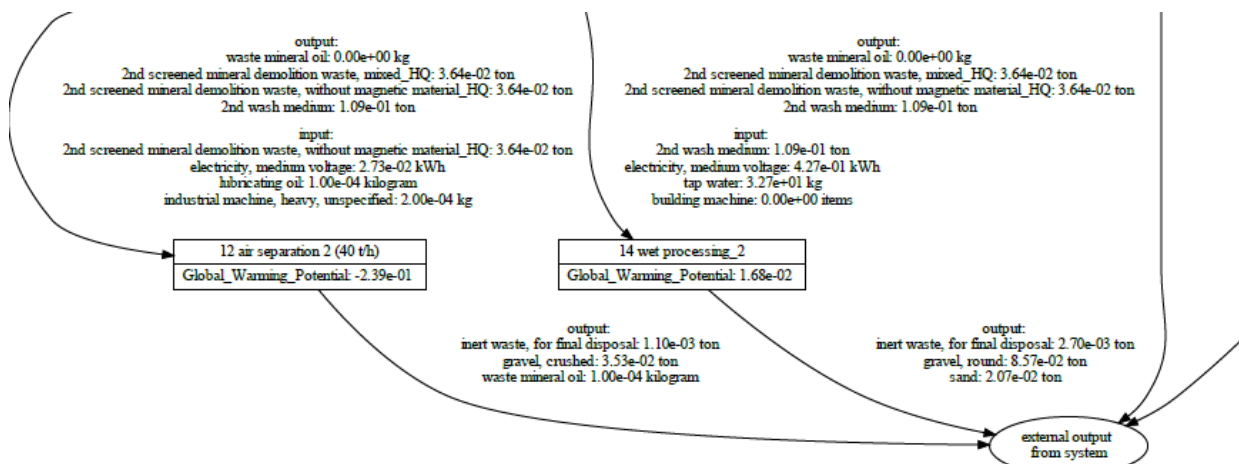


Abbildung 20 Ausschnitt aus dem Fließbild zur Aufbereitung von gemischtem Betonbruch mit Angabe der Sekundärstoffe

7.3. Handlungsoptionen

Zur Entwicklung konkreter Handlungsoptionen wurden zunächst aktuelle Herausforderungen und Einflussfaktoren für den Bereich Rückbau und Recycling von Baustoffen identifiziert. Hierfür wurden Experteninterviews mit Vertretern verschiedener Institutionen der Bereiche Abbruch, Entsorgung/Recycling, Neubau und kommunaler Planung durchgeführt. Als zentrale Einflussfaktoren wurden die Wirtschaftlichkeit und die Akzeptanz von Sekundärbaustoffen identifiziert. In Tabelle 15 wurden weitere Kriterien erarbeitet, die sich direkt oder indirekt auf jene auswirken. Die Ergebnisse entstammen den Experteninterviews und wurden mit den Ergebnissen des Projekts WieBauIn validiert.

Einflussfaktoren	Beschreibung
„Konkurrenzprodukt“ Primärmaterial	Die Preise von Primärmaterial sind teilweise noch gering, sodass sich ein Recycling nicht lohnt. Die Aufbereitung ist in der Regel teurer als der Einsatz von neuwertigem Material. Die Knappheit von Primärmaterial könnte dem entgegenwirken.
Eingangsqualität	Bei guter Eingangsqualität ist das Sortierverfahren weniger entscheidend. Je sauberer die Trennung, desto einfacher das Recycling.
Transport	Der Transport ist entscheidend für die gesamte Lieferkette von der Anlieferung des Bauschutts bis zur Lieferung der RC-Gesteinskörnung. Durch die hohen Massen, die transportiert werden müssen, können durch eine ortsnahe Aufbereitung sowohl Kosten als auch erhebliche CO2-

	Emissionen eingespart werden. Günstige Senken, beispielsweise im Ausland, führen dazu, dass Material weite Strecken transportiert wird, um Entsorgungskosten zu vermeiden.
Vergabeverfahren	Die öffentliche Hand schließt derzeit RC-Gesteinskörnungen explizit aus, der politische Wille ist derzeit kaum vorhanden.
Image und Abfallproblematik	Die Begrifflichkeit des Abfalls wirkt sich stark auf die Akzeptanz aus und führt damit zur Investitionszurückhaltung bei der Verwertung.
Schadstoffverdacht	Bei Primärbaustoffen ist eine Analytik grundsätzlich nicht gefordert, was zu einer Verschiebung des Schadstoffverdachts führt. Fehlende Regelungen und Nachweisgrenzen für Putz- und Spachtelmassen sowie Faserfreisetzungen führen außerdem zum unmittelbaren Ausschluss. Existierende Grenzwerte unterscheiden sich dabei zwischen den Bundesländern. Für den Verwerter entsteht zudem das Risiko, dass aufbereitetes Material abgelehnt wird und entsorgt werden muss. In der Ersatzbaustoffverordnung ist der Grundwasserschutz wesentlich stärker gewichtet als das Kreislaufwirtschaftsgesetz.
Kontrolle	Grundsätzlich gilt das Verschlechterungsverbot bei der Sortierung von Abbruchstoffen. Die Kontrolle wird in der Praxis allerdings zu wenig verfolgt. Eine rechtliche Nachverfolgung bei Benachteiligung von RC-Baustoffen bei der Ausschreibung ist ebenfalls nicht gegeben.
Planungssicherheit und Bürokratie	Planungssicherheit ist durch die bestehenden rechtlichen Regelungen nicht gegeben, weshalb für Recyclingunternehmen die Hürde zur Investition noch hoch ist. Die Bewertung von Recyclingmaterial ist zeitaufwändig, was zu einer Zurückhaltung der bürokratischen Regelung führt.
Volumenstrom	Die Investition und der Betrieb von Recyclinganlagen ist erst bei entsprechenden Volumina wirtschaftlich und operabel. Bisher ist das Altmaterial aus Bauwerken in zu geringer Menge verfügbar. Außerdem

	Henne-Ei-Problem: Es gibt Investitionsbedarf, damit R-Beton überall verfügbar ist; gleichzeitig braucht es einen größeren Markt, damit Investitionssicherheit gegeben ist.
Feinfraktion	Feinmaterial wird vorwiegend auf Deponien beseitigt oder geht in die Verfüllung. Dies ist unter anderem auf den hohen Gipsanteil zurückzuführen. Hochwertige Verwertungswege für Feinmaterial sind möglich (WieBauin 2022).
Regionale Unterschiede und Umgebungsbedingungen Baustelle	Die regionale Verfügbarkeit des Primär- und Sekundärmaterials bedingt die Wirtschaftlichkeit. RC-Baustoffe sind meist ortsnah, während Abbaugelände für Naturgestein oft weit entfernt liegen. Bei ortsnahen Abbaustätten ist das Primärmaterial meist wirtschaftlicher.

Tabelle 15 Kriterien für Handlungsoptionen

Außerdem wurden Instrumente und Konzepte herausgearbeitet, die diese Faktoren beeinflussen können und in Tabelle 16 zusammengefasst.

Handlungsoption	Beschreibung
Image/ Kommunikation	<ul style="list-style-type: none"> - Begrifflichkeiten und Sprachlichkeit und Kommunikation entscheidend - Kommunikation der Qualität und Performance von RC-Baustoffen - Produktstatus für RC-Baustoffe - Bezeichnung der Verfüllung als Recycling hebt die Recyclingquote
Öffentliche Hand als Vorbild:	<ul style="list-style-type: none"> - Gesetzliche Verankerung und Inklusion in öffentlichen Ausschreibungen - Leuchtturmprojekte - Entlastung der Verkehrsinfrastruktur, Vermeidung volkswirtschaftlicher Kosten
Erkundungspflicht für Bauherren	<ul style="list-style-type: none"> - Vorteile: Verbesserung der Planbarkeit der Ausführung, Kenntnis über die Entsorgungswege, Sicherheit für den Bauherren und Kalkulierbarkeit der Kosten - Sinnvolle Abwägung zwischen Recyclingzielen und

	Schadstoffgrenzwerten
Vernetzung	<ul style="list-style-type: none"> - Zusammenschluss zu Entsorgungsgemeinschaften und gemeinsame Sammlung von Abfällen zur Verbesserung der Eingangsqualitäten und Volumina - mehrere Gebäude in ähnlicher Bauweise mit Sammelzentrale könnte entsprechende Mengen generieren
Angepasste Sammellogistik	<ul style="list-style-type: none"> - Anpassung der Abholung an den Anfallzeitpunkt (z. B. Big-Pack-Systeme, digitale Lösungen) - Tagesaktuelle Lösungen, flexible An- und Abfahrt von Transportsystemen
Globales Entsorgungskonzept/ Ganzheitliches Konzept	<ul style="list-style-type: none"> - Kenntnis über Materialien sowie deren Separation, Verwertung und Wiedereinsatz - Bestimmung der Kapazitäten und Randbedingungen (Aufbereitungsorte etc.) - Zusammenfassung von Gebieten
Ortsnahe, regional verteilte Abfallbehandlungs-zentren	<ul style="list-style-type: none"> - Förderung von ortsnahen Sortier- und Aufbereitungsanlagen, um Investitionssicherheit zu geben - Gestaltung der Verfahren (Planfeststellungsverfahren, Bebauungspläne) mit der Möglichkeit zur Integration von regionalen Abfallbehandlungsanlagen
Schulung/Weiterbildung:	<ul style="list-style-type: none"> - Kommunikation des Kreislaufkonzepts muss gefördert werden - Fachwissen über Abbruch und Verwertung an Architekten und Planer der Neubauphase vermitteln
Rechtliche Regulierung	<ul style="list-style-type: none"> - Einheitliche Richtlinien für alle Bundesländer: gleiche Grenzwerte, Klassifizierungen - Bevorzugter Einsatz von RC-Baustoffen, KrWG als rechtliche Grundlage
Nachweis der Recyclingfähigkeit:	<ul style="list-style-type: none"> - Zulassung neuer Materialien nur mit Recyclingnachweis/-zertifikat - Information zum Material und zur Recyclingkategorie wird Unterlagen zum Gebäude hinterlegt
Auftragsvergabe Entsorgung	<ul style="list-style-type: none"> - bei der Auftragsvergabe; Vorgaben an den Bauunternehmer über direkt zu verwertende Anteile
Finanzielle Regulierung:	<ul style="list-style-type: none"> - Erhöhung der Entsorgungskosten

	<ul style="list-style-type: none"> - CO2-Bepreisung von Transportstrecken - Erschwerung von Genehmigungen für Steinbrüche - Primärbaustoffkosten steigen durch Verknappung des Angebots
Vergabekriterien Ausschreibung:	<ul style="list-style-type: none"> - Vergabe nach Wirtschaftlichkeit nicht nur nach Preis, sondern nach weiteren Kriterien entscheiden (Transportweg, Effizienz etc.) - materialoffen ausschreiben - Gleichwertige Behandlung zu Primärbaustoffen

Tabelle 16 Einflussfaktoren für Handlungsoptionen

Die Einflussfaktoren und Handlungsoptionen wurden in einem Netzdiagramm verknüpft, um deren direkte und indirekte Beziehungen darzustellen. Das Diagramm in Abbildung 21 stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern liefert einen ersten Beitrag zum Verständnis der Einflussmöglichkeiten. Die Elemente sind nach externen Einflussfaktoren (rot) Handlungsoptionen, die den Einsatz von Sekundärbaustoffen begünstigen können, (grün) geordnet.

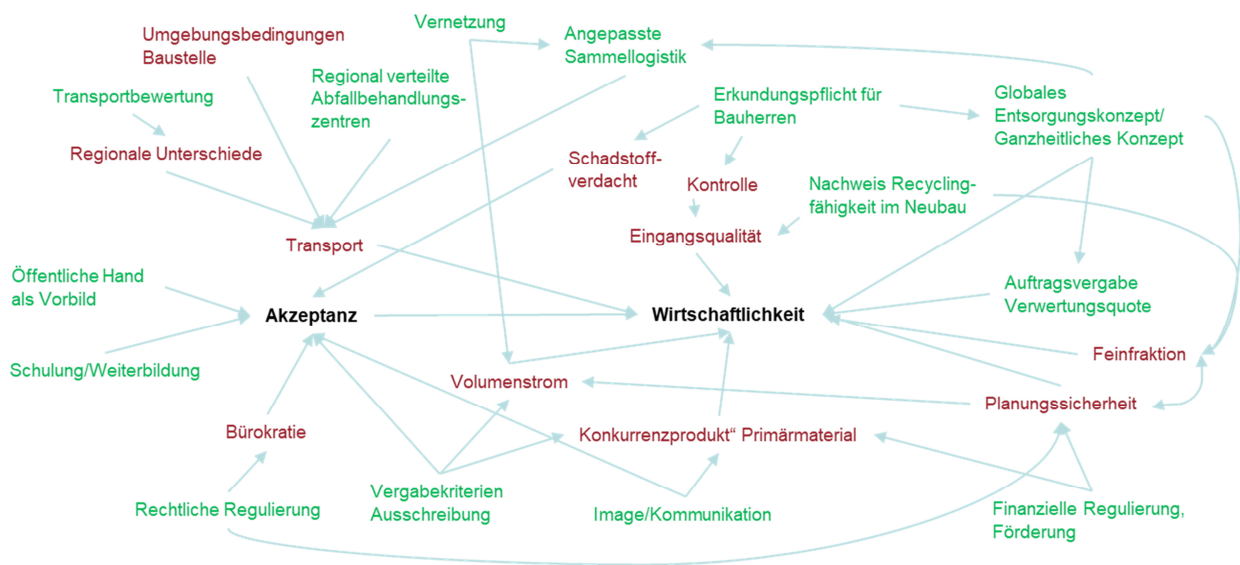


Abbildung 21 Zusammenhänge der Einflussfaktoren (rot) und Handlungsoptionen (grün) zur Stärkung von Sekundärbaustoffen

Aus Gesprächen mit den städtischen Partnern zeigte sich, dass der Einsatz von Materialkennwerten und -indikatoren bisher eine untergeordnete Rolle spielt. Die Anforderungen in Bezug auf die Bewertung von Verwertungsmaßnahmen und den Einsatz von Sekundärbaustoffen konnten nicht eindeutig benannt werden und müssen daher konkreter in der Praxisphase erfasst werden. Es wurde allerdings ein hoher Bedarf nach Werkzeugen zur Erfassung der freiwerdenden Materialien bei der Sanierung in Gebäuden sowie der Erfassung des Recyclingpotenzials festgestellt. Außerdem wurde der Bedarf nach Treibhausgas-Bilanzierungstools für verschiedene Verwertungsmaßnahmen festgestellt.

Da Überschneidungen mit den ermittelten Rahmenbedingungen der quartiersbezogenen Planungsprozesse festgestellt wurden, wurden die generalisierten Ergebnisse der Handlungsoptionen in den entwickelten Handlungsleitfaden (11.3) integriert. Aus den Anforderungen städtischer Partner wurde der Fokus auf die Entwicklung eines Bewertungstools gelegt.

Circular-Modul

Zur Entscheidungsunterstützung wurde ein Tool entwickelt, das die Treibhausgas-Einsparpotenziale verschiedener Verwertungsmaßnahmen aufzeigen und vergleichen kann. Die möglichen Aufbereitungsverfahren für die konkreten Materialien sind im Tool hinterlegt und in den Steckbriefen mit wichtigen Eckdaten beschrieben. Außerdem können verschiedene Abbruchoptionen verglichen und die freiwerdenden Sekundärstoffe quantifiziert werden. Das Circular-Modul wurde als Excel-Anwendung entwickelt und kann im Folgeprojekt in weitere Werkzeuge wie das GMK[®] und LC-Quartier integriert werden. Es besteht aus vier Funktionen, die im Folgenden näher erläutert werden.



In der Eingabemaske „Gebäudedaten“ (Abbildung 22) kann das synthetische Gebäude gewählt und für die Bauteile das gewünschte Layerset ausgewählt werden. Die Maße des entsprechenden Gebäudes werden automatisch übertragen. Das Circular-Modul ist derzeit auf die Bewertung einzelner synthetischer Gebäude ausgelegt und wird in der weiteren Projektphase durch Schnittstellen zum LC-Quartier-Tool für die Quartiersbetrachtung aufbereitet.

Gebäudeparameter

SG	SG4.1		
Bauteil	Bauweise	Maße	
Außenwand	330_MW_Ziegel1979_MLS	Außenwandfläche	181 m ²
Innenwand	340_MW_Porenbeton1995_MLS	Innenwandfläche	181 m ²
Decke	350_Holzbalken1949_MLS	Deckenfläche	155 m ²
Dach	360_SteildachHolz1949_MLS	Dachfläche	108 m ²
Fundament	320_Stampfbeton1949_MLS	Fundamentfläche	139 m ²
Fenster	Holz_Einfachglas1948_MCS	Fensterfläche	32 m ²
Tür	Holz	Türfläche	m ²

Abbildung 22 Circular-Modul: Eingabemaske: Beschreibung generischer BM für das Material „Mörtel“

In Abbildung 23 „Abbruchmodul“ können die beiden Abbruchoptionen „Selektiv“ und „Teilselektiv“ bewertet werden. Im Reiter „Abbruchverfahren“ kann für die jeweilige Option entweder ein Abbruchverfahren ausgewählt oder ein selbstständig ein Abbruchgerät angelegt werden. Die Optionen werden dabei bauteilspezifisch gewählt.

Option 1		Teileselektiver Abbruch		Abbruchverfahren		
Bauteile						
Kategorie	Bauteil	Schicht	Abbruchverfahren	Einsatzzeit [h]	GWP (kg CO2 eq.)	
Außenwand	330_MW_Ziegel1979_MLS	MLS	Abbruch_Wand_MW_1_Abgreifen	13,94	92,11	
Innenwand	340_MW_Porenbeton1995_MLS	MLS	Abbruch_Wand_MW_1_Abgreifen	13,94	92,11	
Decke	350_Holzbalken1949_MLS	MLS	Abbruch_Decke_Stahlbeton_3_Pressschneiden	2,47	8,53	
Dach	360_SteildachHolz1949_MLS	MLS	Abbruch_Decke_Mauerwerk	0,80	2,77	
Fundament	320_Stampfbeton1949_MLS	MLS	Abbruch_Decke_Stahlbeton_4_Stemmen_Pressschneiden	39,02	146,31	
Fenster	Holz_Einfachglas1948_MCS	MLS	Abbruch_Fenster_Ausbau	7,88	0,00	
Tür						
SUMME				78,05	341,83	

Abbildung 23 Circular-Modul: Abbruchmodul

In Abbildung 24 „Ausgangsmaterial“ wird für jedes Bauteil der Sekundärstoff automatisch bestimmt und mit Abfallschlüssel angegeben. Die Menge des jeweiligen Stoffs wird für das gewählte Gebäude angegeben. Wird als Sekundärstoff „Bauschutt_S“ angezeigt, kann das Verfahren „Teileselektiv“ gegebenenfalls nicht abgebildet werden. Daher wird eine gemischte Bauschuttfraktion unbekannter Zusammensetzung angenommen. Im Reiter „Zusammensetzung“ wird die exakte Zusammensetzung des Sekundärstoffs angegeben, indem die enthaltenen Baustoffe mit ihrer Menge zugeordnet werden.

Ausgangsmaterial Gesamtfläche Gebäude			Zusammensetzung					
Abfall	Abfallschlüssel	Menge [t]	Material	Menge [t]	Material	Menge [t]	Material	Menge [t]
MWZiegel_S	17 01 03	65,2	KalkZemMörtel_BM	4,9	Lochziegel_BM	44,5	MörtelINN_BM	15,5
PorenbetonMix_S	17 01 07	48,5	PutzGips_BM	1,9	Porenbeton_BM	38,2	MörtelINN_BM	8,4
Bauschutt_S	-	41,2	Laubholz_BM	2,6	Nadelholz_BM	2,6	Luft_BM	0,0
Bauschutt_S	-	5,8	Ziegel_BM	1,9	Luft_BM	0,0	Nadelholz_BM	1,8
Betonbruch_S	17 01 01	96,1	Beton_BM	96,1	0	0,0	0	0,0
Fenster	-	0,4	Rahmen_Holz_BM	0,2	Flachglas_BM	0,3	#NV	#NV
		257,33						

Abbildung 24 Circular-Modul: Ausgangsmaterial

Für die Option „selektiver Abbruch“ (Abbildung 25) kann ein Bauteil ausgewählt werden und für dieses analog zum teileselektiven Abbruch die Menge und Zusammensetzung der Sekundärstoffe einzelner Schichten bestimmt werden.

Option 2		Selektiver Abbruch	
Bauteile			
Bauteil (bitte wählen)		Schicht	
Außenwand	330_MW_Ziegel1979_MLS_1	PutzGips_1_ML	
Außenwand	330_MW_Ziegel1979_MLS_2	Ziegelmauer1979_ML	
Außenwand	330_MW_Ziegel1979_MLS_3	DämmMin_03_ML	
Außenwand	330_MW_Ziegel1979_MLS_4	Kalkzementputz_1.5_ML	
Außenwand	330_MW_Ziegel1979_MLS_5	#NV	
Außenwand	330_MW_Ziegel1979_MLS_6	#NV	
Außenwand	330_MW_Ziegel1979_MLS_7	#NV	
Außenwand	330_MW_Ziegel1979_MLS_8	#NV	
Außenwand	330_MW_Ziegel1979_MLS_9	#NV	

Abbildung 25 Circular-Modul: Optionen selektiver Abbruch

Im Tabellenblatt „Verwertungsmodul“ (Abbildung 26) können für bis zu drei Sekundärstoffe verschiedene Verwertungsoptionen verglichen werden. Die Verfahren beziehen sich jeweils auf 1 t des entsprechenden Materials. Die Bezeichnungen orientieren sich an den Bezeichnern der Steckbriefe. Die Optionen werden jeweils als Einsparpotenzial im Vergleich zu einem Referenzverfahren angegeben. Für die beiden gewählten Optionen ist die Differenz zwischen diesen zu betrachten. Zum Ende des Projekts wurden für die modellierten Verwertungsverfahren Treibhausgas-Einsparpotenziale mithilfe der Methode EF 2.0 berechnet und im Tool hinterlegt. Die weiteren identifizierten Verfahren sowie weitere Berechnungsmethoden können im Tool integriert werden. Für das Tool wurde eine Zusatzfunktion zur Transportbewertung konzipiert. Diese kann ggf. in der nächsten Projektphase aktiviert werden, sofern diese für ein Maßnahmenmonitoring gefordert ist.

1 Verwertungsoptionen (Durchschnittliche Transportdistanz)

Materialauswahl	Verwertungsoption A	Verwertungsoption B	Verwertungsoption C
Bitte hier Materialien auswählen	Bitte hier Verwertungsoption wählen	Bitte hier Verwertungsoption wählen	
1 MWZiegel_S	Option 1: HQ_Betonbruch_S	Option 2: HQ_BetonbruchMix_S	Referenz: Verfüllung/Deponie
2 MixMineral_S	Option 1: HQ_Kalksandstein_S	Option 2: LQ_MWKalksandstein_S	Referenz: Verfüllung/Deponie
3 Ziegel_S	Option 1: HQ_Ziegel_S	Option 2: LQ_BetonbruchMix_S	Referenz: Verfüllung/Deponie

CO2-Einsparpotenzial im Vergleich zur Referenz	Verwertungsoption A	Verwertungsoption B	Verwertungsoption C
1 MWZiegel_S	0 kg CO2 Äq. /t	-30 kg CO2 Äq. /t	0 kg CO2 Äq. /t
2 MixMineral_S	-30 kg CO2 Äq. /t	4 kg CO2 Äq. /t	0 kg CO2 Äq. /t
3 Ziegel_S	4 kg CO2 Äq. /t	4 kg CO2 Äq. /t	0 kg CO2 Äq. /t

Abbildung 26 Circular-Modul: Verwertungsmodul

Im Tabellenblatt „Gesamtbewertung“ (Abbildung 27) können bis zu Entsorgungskonzepte für das gewählte Gebäude erstellt und mit einem Referenzkonzept verglichen werden. Die Summe des Treibhausgas-Einsparungspotenzials im Vergleich zur Deponierung wird für die Maßnahmen angezeigt. Das Entsorgungskonzept für ein vollständiges Gebäude ist derzeit für die Abbruchoption „teilselektiv“ abgebildet. Die Option „selektiv“ können einzelne Bauteile bewertet werden. Dies ist insbesondere für Sanierungsmaßnahmen relevant.

Gebäude: SFH1049

Bauteil	Material	Menge [t]	Entsorgungskonzept 1	Verwertungsoption <i>Bitte hier Verwertungsoption wählen</i>	Entsorgungskonzept 2	Verwertungsoption <i>Bitte hier Verwertungsoption wählen</i>	Referenzkonzept	Verwertungsoption <i>Bitte hier Referenz wählen</i>
Außenwand	MWZiegel_S	65,2	Option 1	HQ_MwZiegeLS	Option 2	LQ_MwZiegeLS	Referenz	D_MWZiegel_S
Innenwand	PorenbetonMix_S	48,5	Option 1	HQ_MwZiegeLS	Option 2	LQ_ZiegeLS	Referenz	D_MWZiegel_S
Decke	Bauschutt_S	41,2	Option 1	LQ_BetonbruchMix_S	Option 2	LQ_MwZiegeLS	Referenz	D_MWZiegel_S
Dach	Bauschutt_S	5,8	Option 1	LQ_BetonbruchMix_S	Option 2	LQ_BetonbruchMix_S	Referenz	D_MixMineral_S
Fundament	Betonbruch_S	96,1	Option 1	HQ_Betonbruch_S	Option 2	LQ_BetonbruchMix_S	Referenz	D_BetonbruchMix_S
Fenster	Fenster	0,4						
Tür		0,0						

CO2-Einsparpotenzial	Entsorgungskonzept 1	Entsorgungskonzept 2
MWZiegel_S	-547 kg CO2 Äq	0 kg CO2 Äq
PorenbetonMix_S	-407 kg CO2 Äq	0 kg CO2 Äq
Bauschutt_S	-346 kg CO2 Äq	0 kg CO2 Äq
Bauschutt_S	-49 kg CO2 Äq	-49 kg CO2 Äq
Betonbruch_S	0 kg CO2 Äq	-807 kg CO2 Äq
Fenster	#NW kg CO2 Äq	#NW kg CO2 Äq
0	#NW kg CO2 Äq	#NW kg CO2 Äq
SUMME	-1300 kg CO2 Äq	0 kg CO2 Äq

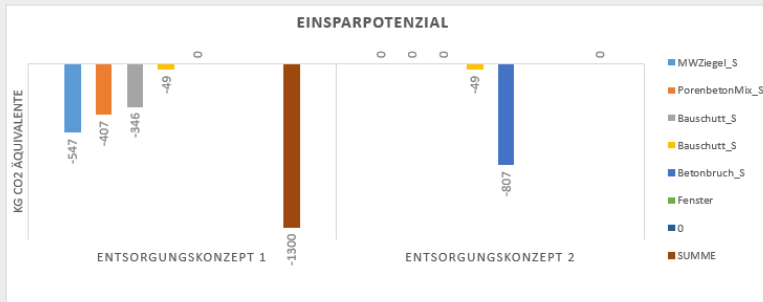


Abbildung 27 Circular-Modul: Gesamtbewertung

Das Tool wurde als Prototyp konzipiert und soll in der weiteren Projektphase erweitert und professionalisiert bzw. in weitere Tools integriert werden.

8. Gebäude-Material-Kataster (GMK[®])

Das Gebäude-Material-Kataster (GMK[®]) wurde vom **Fachgebiet Landmanagement (LM)** und von der **UMGIS Informatik GmbH** entwickelt und bietet eine einheitliche Informationsgrundlage, um die erforderlichen Daten zu Gebäuden auf räumlicher Ebene in systematischer und leicht auszuwertender Weise bereitzustellen.

8.1. Methodisches Konzept und Daten des GMK[®]

8.1.1. Bedarf und Mehrwert

Da der Lebenszyklus eines Gebäudes sich über mehrere Jahrzehnte austreckt und die notwendigen Ressourcen immer knapper werden, müssen die materiellen Ressourcen während des Lebenszyklus ganzheitlich verwaltet werden. Daher müssen Informationen über die im Gebäudebestand gelagerten Materialien erstellt, verwaltet und z.B. in Form eines Katasters zur Verfügung gestellt werden, um die Arten und Mengen zukünftiger abfallende Baumaterialien abschätzen zu können (Schebek & Linke, 2021).

Das Gebäude-Material-Kataster (GMK[®]) ist das zentrale Analyse- und Visualisierungstool des Projekts RessStadtQuartier. Das hier entwickelte GMK[®] war daher so konzipiert, um zu Projektbeginn einfache Schätzungen zu den vorhandenen Mengen an Materialien im Untersuchungsgebiet entsprechend der aktuell verfügbaren Daten aus wissenschaftliche Literatur vornehmen zu können. Im weiteren Projektverlauf mit verbesserter Datenbasis wurde es mit konkreten gebäudespezifischen Daten erweitert, welche im Laufe konkreter Bau- oder Sanierungsvorhaben generiert wurden. Das GMK dient somit auch als Nachweis von Sekundärdatenbestand/-ressourcen.

Das GMK[®] wurde als ein GIS-basiertes Tool entwickelt, welches Kategorisierung und Visualisierungen von Wohngebäuden und Ermittlung der darin zu erwarteten Baustoffarten und –mengen vornimmt. Dies entspricht der derzeit gängigen Praxis (GERTEC, 2002). Ziel ist es, dass durch das GMK[®] eine automatisierte und aggregierte Materialermittlung auf Gebäude- und Quartiersebene stattfindet. Es stellt somit eine einheitliche Informationsgrundlage dar, um die von den anderen Arbeitspaketen bereitgestellten Gebäudedaten zu aggregieren und ihnen die benötigten Daten auf räumlicher Ebene in systematischer und leicht auszuwertender Weise bereitzustellen.

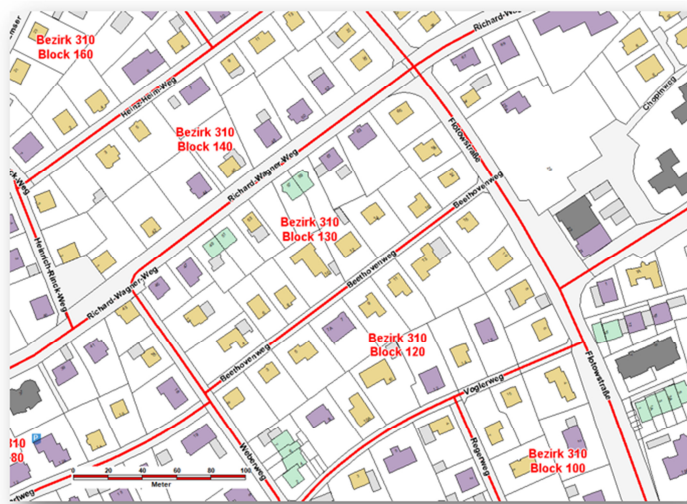
8.1.2. Informationsgrundlage

Im Laufe des Projekts wurden folgende Anforderungen definiert, die das GMK[®] zu erfüllen hatte und entsprechend datenbank- und programmtechnisch umzusetzen waren.

Das GMK[®] basiert auf amtlichen Geodaten und wird mit synthetischen gebäudebezogenen Daten ergänzt. Als **Informationsgrundlage** sollte das **Liegenschaftskatasters ALKIS** benutzt werden, welches deutschlandweit flächendeckend vorhanden ist. Das ALKIS enthält Grundstücksgrenzen, aber auch den Grundriss aller existierenden Gebäude sowie Art der Nutzung und Größe der Gebäude. Diese primäre Informationsquelle, welche die Grundlage des GMKs bildet, ermöglicht die Übernahme der 2D-Gebäudegrundinformationen, der eigentlichen Geometrien und von wesentlichen Fachinformationen von bestehenden Wohngebäuden. Dieser Datenbestand wird ergänzt durch geometrische 3D-Informationen zur Kubatur der Gebäude aus Laserscan-Befliegungen im CityGML-Format. Für die Projektstädte Landeshauptstadt Wiesbaden und Wissenschaftsstadt Darmstadt wurden hierfür Gebäudemodelle mit Standarddachformen in der Detailstufe 2 (LoD 2) integriert. Im Modell LoD2 werden allen Gebäuden standardisierte Dachformen zugeordnet und entsprechend dem tatsächlichen Firstverlauf ausgerichtet. Der Gebäudegrundriss wird in der Regel der amtlichen Liegenschaftskarte entnommen und beinhalten die sogenannte NAS-ID aus ALKIS. Somit konnten im GMK[®] Verknüpfungen zwischen dem Datenbestand aus ALKIS und LoD2 hergestellt und insbesondere die Gebäudehöhen (Firste und Traufen) und Dachformen übernommen werden.

Weitere Daten aus den städtischen Ämtern (Vermessung, Statistik, Bauaufsicht...) und Daten der Wohngebäudestatistik aus dem Zensus 2011 wurden integriert, um weiterführende Informationen, wie z.B. Angaben zum Gebäudeerstellungsjahr, Anzahl der Haushalte und Nutzungen zu ergänzen. Informationen zu Gebäudealtersklasse sind nämlich von zentraler Bedeutung in der weiteren Ermittlung von Baustoffarten und –mengen (Bourgoin et al., 2020).

Deswegen war das GMK[®] zudem so entwickelt, um Daten aus Literaturquellen und insbesondere aus der **Gebäude- und Quartierstypologie** sowie der **erstellten Materialdatenbank zu integrieren**. Die Materialdatenbank beschreibt die in einem Gebäude verbauten Bau- und Rohmaterialien abhängig von dem Gebäudetyp und der Baualtersklasse. Im GMK[®] wurden deswegen Algorithmen zur Kategorisierung aller Wohngebäude beider Städte nach Gebäudetypen und Baualtersklassen auf Grundlagen von synthetischen wissenschaftlichen Daten entwickelt und durch Anwendungen in der Praxis angepasst (s. Abbildung 28). Somit können die in der Materialdatenbank beschriebenen Bau- und Rohmaterialien in das GMK[®] übernommen werden und bilden somit die Grundlage zur Ermittlung von gebäude- und quartierspezifischen Werten, wie Materialmenge, CO₂-Bilanz, Energiebedarf oder Sanierungsbedarf aufgrund von in anderen Arbeitspaketen entwickelten synthetischen Werte, die gebäudeklassen- oder quartierstypspezifisch sind.



Legende

Gebäudeart	
	Großes Mehrfamilienhaus (LMFH) (2233)
	Kleines Mehrfamilienhaus (SMFH) (7768)
	Einfamilienhaus (SFH) (6341)
	Doppelhaushälfte / Reihenhaus (SDH) (7038)
	Nebengebäude/Anbau (8610)
	Nicht bestimmt (121)
	Block / Quartier (1322)
	Stadtteil / Bezirk (37)

Abbildung 28 Beispielhafte Kategorisierung der Wohngebäude im GMK

Tabelle 17 liefert eine Übersicht der wesentlichen Inputdaten in dem GMK®, sowie deren Verfügbarkeit.

Tabelle 17 Übersicht der Inputdaten in dem GMK sowie deren Verfügbarkeit

Grundlegende (geometrische) Informationen zu den Gebäuden	<ul style="list-style-type: none"> • ALKIS, als NAS ohne Eigentümerangaben in den meisten Bundesländern frei verfügbar • 3D-Gebäudedaten LoD2, in vielen Bundesländer frei verfügbar
Weiterführende sachliche Informationen zu den Gebäuden	<ul style="list-style-type: none"> • Gebäudedaten ZENSUS 2011, aggregiert auf INSPIRE Geogitter frei verfügbar • Gebäudedaten ZENSUS 2022, Ende 2023 aggregiert auf INSPIRE Geogitter frei verfügbar
Zusätzliche ergänzende Informationen zu den Gebäuden	<ul style="list-style-type: none"> • Informationen aus anderen Modulen (SG-Typen, Materialdatenbank...)

8.1.3. Details des Datenmodells

Gemeinsam mit allen Projektbeteiligten und den Städten wurden die Anforderungen an Datenstruktur und -austausch festgesetzt. Wichtig dafür war die begleitende Identifizierung der Akteursnetzwerke innerhalb der beiden Städte (siehe Kapitel 11). Deren Bedarf wurde durch

Interviews in 2020 erhoben. Daraufhin wurde eine Struktur mit verschiedenen Auflösungsstufen erstellt: Stadt, Statistischer Bezirk, Block, Gebäude, Bauteil.

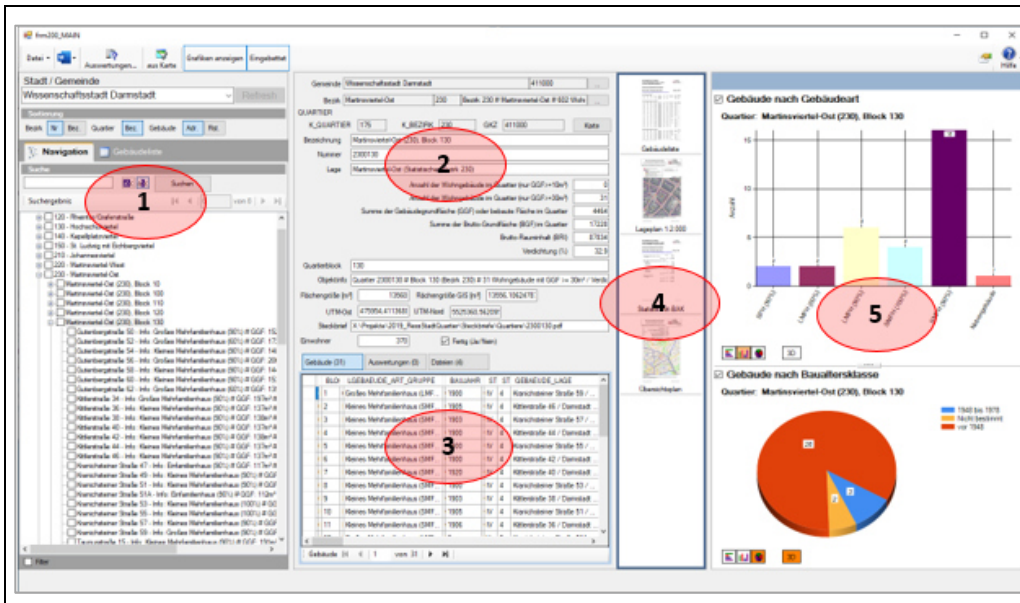
Der grundlegende Datenbankaufbau (relationales Datenbankmodell) wurde mit allen Projektbeteiligten abgestimmt und im Sommer 2021 programmtechnisch umgesetzt.

Um die aufbereiteten Daten zukünftig für INSPIRE² abgeben zu können, wurde ein einheitliches, harmonisiertes Datenmodell entwickelt und mit INSPIRE gerechten Geoinformationen ergänzt, die den reibungslosen Austausch dieser Geodaten in der EU über Länder- und Systemgrenzen ermöglicht.

Die grundlegenden Daten des Datenmodells stellen die Informationen aus den synthetischen Gebäuden und Quartieren sowie aus der Materialdatenbank dar. Für die Ermittlung der in Quartiere und Gebäude zu erwarteten Baustoffarten und –mengen wurden die im Arbeitspaket „AP 5: Analyse des Beitrags von Sekundärrohstoffen aus dem Rückbau von Gebäuden zur Ressourceneffizienz“ erstellten Listen der Materialien in eine Materialdatenbank überführt.

Das Datenmodell ist jedoch so strukturiert, dass es mit Daten aus realen Gebäuden und Quartieren sowie um reale typische Materialzusammensetzungen erweitert werden kann, sobald diese vorliegen. Die Beziehungen zwischen den Elementen der Datenbank können aus *Abbildung 29* entnommen werden.

² Die Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE) ist am 15. Mai 2007 in Kraft getreten. Sie schafft den rechtlichen Rahmen für die staaten- und verwaltungsgrenzenübergreifende Nutzung von Geoinformationen in Europa.



1. Sortierung, Navigation und Suche
2. Generische Informationen über das Quartier
3. Liste der Gebäude im Quartier
4. Dokumente zum Quartier
5. Graphische Auswertungen

Abbildung 30 Grafische Benutzeroberfläche des GMKs

Diese Oberfläche ermöglicht es dem Nutzer einzelne Quartiere und Gebäude über verschiedene Sortierreihenfolgen zu selektieren (1), grundlegende geometrische Informationen über die Selektion anzuzeigen (2), Datenblätter zu dem jeweils selektierten Objekt abzurufen (3), vorab erstellten Berichte und Dokumente zu sichten (4) sowie Ergebnisse in Form von graphischen Auswertungen zu visualisieren (5).

Die Anordnung und die Auswahl der jeweils referenzierten Dokumente und Graphiken kann vom Anwender, auch über mehrere Bildschirme, gesteuert werden.

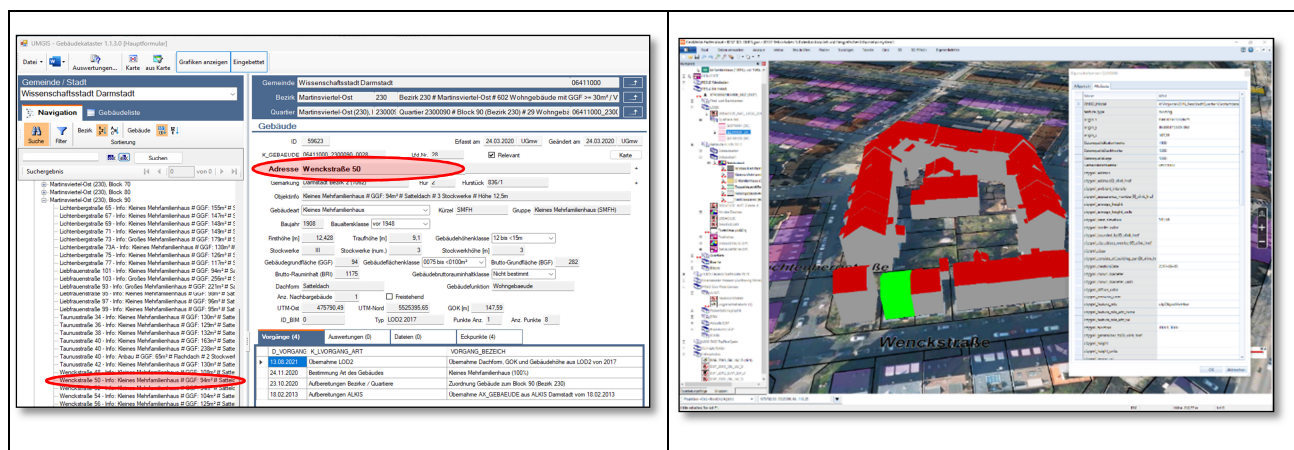


Abbildung 31 Beispiel der Auswahl und Anzeigens eines Gebäudes

Eine bidirektionale Schnittstelle zum BIM-Viewer ermöglicht zudem eine Visualisierung und Bearbeitung der 3D-Modelle einzelnen Gebäudes, sowie die eingereichten Informationen wieder in das GMK® zu importieren.

8.1.5. Auswertungen, Outputdaten und Ergebnisse aus dem GMK®

Auf Grundlage den grundlegenden geometrischen Informationen zu den Gebäuden, die aus ALKIS oder aus den 3D-Modellen gewonnen wurden, erfolgt in dem GMK® eine Kategorisierung von jedem Gebäude zu den definierten synthetischen Gebäudetypen. Daraus können Informationen über die **Quartierszusammensetzung** (von Block-Ebene bis zum Stadtebene) gewonnen werden.

Unter Einbeziehung der Informationen der Materialdatenbank, die typische Bauteilkonstellationen und Material- und Stoffinformationen von Bauteiltypologien je nach synthetischem Gebäudetypp bereitstellt, kann das GMK® die **Materialintensität in einem Gebäude oder Quartier** direkt anzeigen, d.h. die Baustoffarten und –mengen auf der Gebäude- und Quartiersebene auswerten. Abbildung 32 zeigt den Ablauf der Berechnung der Materialintensität in dem GMK®.

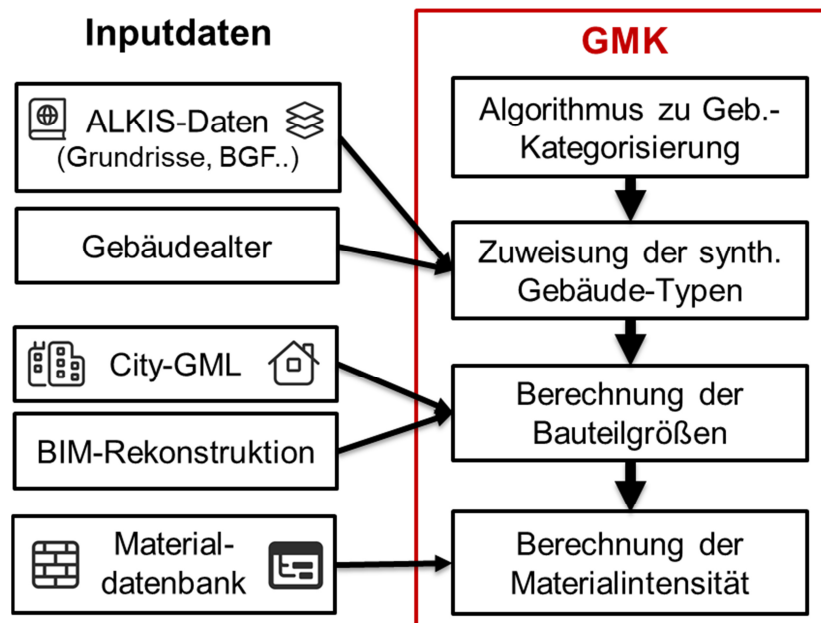


Abbildung 32 Ablauf der Berechnung der Materialintensität in dem GMK (eigene Darstellung)

Die Daten zu den Gebäudebauteilen und -materialien können als Listen, Graphiken und Karten schnell und einfach für die räumlichen Ebenen Stadt/Gemeinde, Stadtbezirk/Stadtteil, Statistischer Block/Quartier (s. *Abbildung 33*) und Einzelgebäude aufbereitet und dargestellt werden.

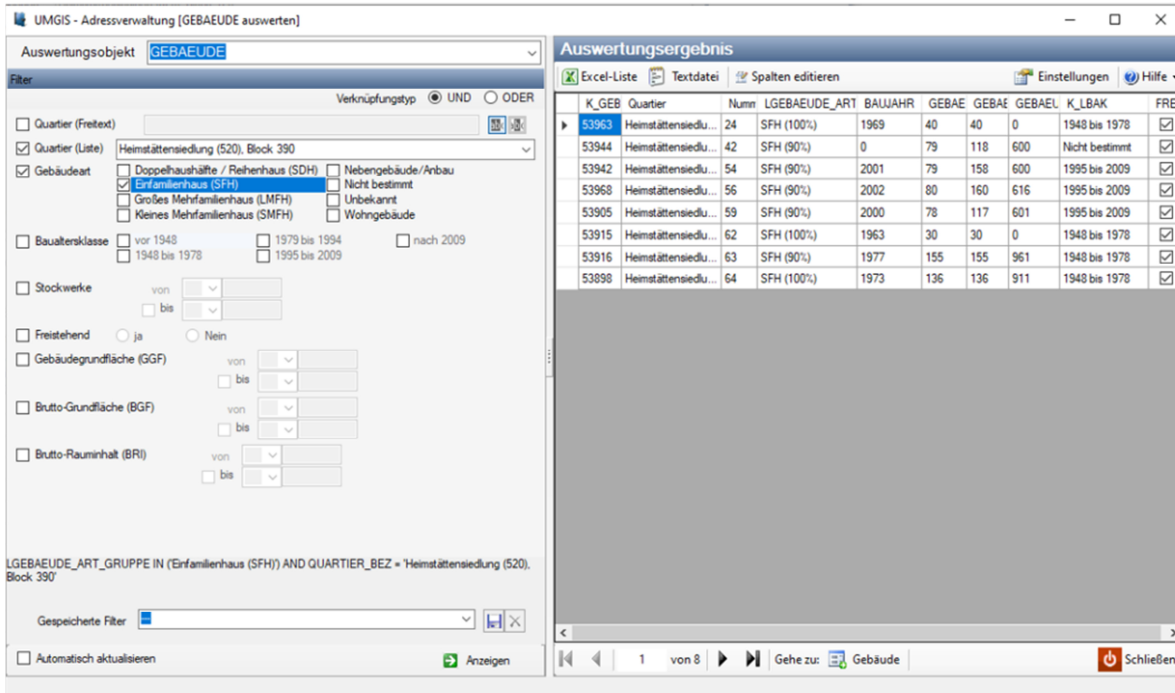


Abbildung 33 Auswertung auf Quartiersebene im GMK

Tabelle 18 liefert eine Übersicht der möglichen Ergebnisse aus dem GMK®.

Tabelle 18 Übersicht der Output-Daten / Ergebnisse aus dem GMK

Kategorie	Detaillierte Output-Daten / Ergebnisse
Allgemeine Informationen zu einzelnen Wohngebäude oder Quartier	<ul style="list-style-type: none"> • Kategorisierung der einzelnen Wohngebäude / Gebäudeinformationen (BAK, Geb-Typ...) • Informationen über die Quartierszusammensetzung (Anzahl an Geb /SG-Typ)
Informationen zu den geometrischen Eigenschaften einzelner Wohngebäude oder Quartier	<ul style="list-style-type: none"> • Ergänztes 3D-Gebäudemodell (CityGML) • Gebäudekubaturen (Rohmaterialien, Baumaterialien) • Bauteile und Flächen eines Gebäudes mit MLS
Informationen zu den materialbezogenen Eigenschaften einzelner Wohngebäude oder Quartier	<ul style="list-style-type: none"> • Materialinventar bzw. -intensität in einem Gebäude oder Quartier • Listen (excel, xml, txt, pdf) zu Gebäude, Quartiere, INSPIRE Geogitter • Datenblätter (word, pdf) zu Gebäude, Quartiere, INSPIRE

	<p>Geogitter</p> <ul style="list-style-type: none"> • automatisierte Erstellung eines „Gebäude-Ressourcen-Passes“, (angelehnt an die Vorgaben der DGNB)
--	--

Die Ergebnisse aus der Auswertungen in GMK® können zudem auch als Berichte (im Form von Steckbriefe oder Datenblätter) exportiert werden. Es können z.B. Steckbriefe zum Stadtquartier / Planungsraum erstellt werden, sowie Datenblätter zu den Baumaterialien (für jedes Gebäude, s. Tabelle 19 und *Abbildung 34*).

Tabelle 19 Wesentliche Inhalte eines Gebäude-Datenblatts

Kategorie	Detaillierte Inhalte
Angaben zum Gebäudestandort	<ul style="list-style-type: none"> • Adresse, • Block-Nummer, • Bezirk, • Flurnummer, • und Flurstücknummer
Angaben zum synthetischen Gebäudetyp	<ul style="list-style-type: none"> • Gebäudetyp, • Baualtersklasse, • Ggf. Sanierungsstatus, • Ggf. Heizungstyp
Angaben zum Gebäudegeometrie	<ul style="list-style-type: none"> • GGF: in m², • BGF: in m², • BRI: in m³, • Stockwerke: Anzahl, • Höhe Trauf: in m, • Umfang: in m, • Breite Fassade freistehend: in m, • Dachform: z.B. Flachdach
Berechnung der Baumaterialien (auf Grundlage der Materialdatenbank)	<p>Für jeden Bauteiltypen (Fundament, Außenwand Kellergeschoss, Außenwand freistehend, Außenwand nicht freistehend, Decke von Kellergeschoss, Decke von Zwischengeschoss, Dach):</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Gesamtfläche ➔ Berechnung der Menge an enthaltenen Materialien für

alle für das SG-Typ in Betracht kommenden
Möglichkeiten von MLS (Material Layer Sets) +/- 20%

Gebäude 06411000_2300090_0028



Martinsviertel-Ost (230), Block 90
Wenckstraße 50 / Darmstadt Bezirk 2 (1062), Fl. 2, Flurstück 836/1
Darmstadt Bezirk 2 (1062), Flur 2, Flurstück 836/1

Kleines Mehrfamilienhaus, vor 1948
GGF: 94m² BGF: 282m² BRI: 1175m³ Stockwerke: 3 Höhe Trauf: 9,1m
Umfang: 39m Fassade freistehend: 28,2m Dachform: Satteldach

Datenblatt zu den Baumaterialien

320_Fundament		94 m ²		
320_Naturstein1949_MLS		min.	mittel	max.
KalkZemMörtel_BM	7,7	10,7	14,8	t
Naturstein_BM	41,7	57,9	80,3	t
320_Stampfbeton1949_MLS		min.	mittel	max.
Beton_BM	46,7	64,9	89,9	t
320_Ziegel1949_MLS		min.	mittel	max.
KalkZemMörtel_BM	4,0	5,6	7,7	t
Ziegel_BM	29,8	41,4	57,4	t

Abbildung 34 Auszug des Materialsteckbriefs eines Gebäudes

8.1.6. Schnittstellen und Informationsaustausch

Es wurde eine **bidirektionale Schnittstelle zu Building Information Modeling-Viewer** entwickelt. Somit können im Kataster enthaltene bauteilbezogene Information in den BIM-Viewer für BIM-Rekonstruktionen überführt werden und damit auch präzisierte Angaben (z.B. materialbezogene Daten) aus dem BIM (wie z.B. Materiallisten bzw. Bauteilliste) in das GMK[®] zurückgegeben werden. Auf Basis der geometrischen und materialbezogenen Informationen aus dem GMK[®] können nämlich erste individuelle BIM-Modelle von Bestandsgebäuden teilautomatisiert rekonstruiert und damit eine Überführung der Bestandsgebäude in digitale Gebäudemodelle sichergestellt werden. Diese BIM-Modelle können zur präzisen Ermittlung des Materialinventars einzelner Gebäude und ganzer Stadtquartiere verwendet werden.

Zudem können die Informationen aus dem GMK[®] zu der Quartiersgröße und Zusammensetzung so exportiert werden, dass sie im **Tool LC-Quartier** mit wenigen Klicks integriert werden können. Somit können umweltrelevante Auswertungen erfolgen, wie z.B. die Berechnung des Energiebedarfs für die Nutzung, die Ermittlung des Sanierungsbedarfs, die Ermittlung der CO₂-Bilanz für Sanierungsalternativen.

8.2. Validierung

8.2.1. Überprüfung anhand Praxisbeispiele

Die Wissenschaftsstadt Darmstadt und die Landeshauptstadt Wiesbaden waren in der Überprüfung der Datenbereitstellung und -bearbeitung und der Anwendbarkeit des GMK[®] eng eingebunden.

So wurde das GMK[®] für die Stadt Darmstadt mit Daten aus dem Gebäudezensus 2011 ergänzt und die ermittelten Gebäudealtersklassen erfolgreich validiert. Da das Projekt 2019-2022 stattfand, fehlten allerdings Daten zu den Gebäuden, die seit 2011 hergestellt wurden. Dies soll in die Umsetzungsphase mit den Daten aus dem Zensus 2022 gelöst werden. Erste Abstimmungen mit dem Hessischen Statistischen Landesamt sind erfolgt.

In beide Städten lagen gut nutzbare 3D-Gebäudemodellen aus hochauflösenden Befliegungsdaten vor, welche in das GMK[®] der jeweiligen Stadt übernommen wurden. Die Ergebnisse für das GMK[®] für die Stadt Wiesbaden sind vergleichbar zu Darmstadt.

Zudem wurde die Praxistauglichkeit im Laufe der Entwicklung während Projekttreffen regelmäßig und im engen Austausch mit den Ansprechpartnern der Städte geprüft. Ebenso fanden regelmäßige Treffen statt, um die Möglichkeit von weiteren Anwendungen zu erörtern.

Weitere Überprüfungen in anderen ausgewählten Städten und Gemeinden unterschiedlicher Größenklassen konnten wegen den mit der Corona-Pandemie einhergehenden Auswirkungen (Einschränkungen der Austauschmöglichkeiten und teilweise Restrukturierung bestimmte Ämter) leider nicht stattfinden. Es wurden Vorbereitungen getroffen, damit diese Überprüfung am Anfang der Umsetzungsphase stattfinden kann.

8.2.2. Erkenntnisse aus dem Projekt

Im Rahmen dieses Projektes wurde die Grundlage für kommunale Gebäude-Material-Kataster geschaffen und am Beispiel der Städte Darmstadt und Wiesbaden angewandt. Deswegen empfiehlt es sich für weitere Kommunen oder Regionen Gebäude-Material-Kataster auf kommunaler oder regionale Ebene einzurichten. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Qualität und Effektivität eines GMK[®] primär von dem erforderlichen Aufwand für Aufbau und Datenpflege abhängen. Sind die Bedingungen getroffen, kann das GMK[®] sein Ziel erfüllen, eine vorgefertigte Lösung anzubieten, welche die kommunalen Gegebenheiten verlässlich abdeckt, erkennbare quantitative und qualitative Mehrwerte schafft und ohne größere Aufwände bezüglich Datenaufbereitung, Hardwarebeschaffung oder Schulungsbedarf eingesetzt und genutzt werden kann.

Das GMK[®] mit den Auswertungen von Baustoffarten und –mengen auf Gebäude- und Quartiersebene kann Immobilieneigentümern oder Kommunen bei der Quantifizierung der im Gebäude enthaltenen Baustoffarten und –mengen helfen und unterstützt ihre Entscheidung zur Auswahl von ressourcensparenden Sanierungsmaßnahmen.

Somit wurde die Funktion des GMK[®] als Grundlage für unterschiedlichen gebäudebezogenen Anwendungen bestätigt, insbesondere im Bereich Ressourceneffizienz, wie z.B. Sanierungs- und Rückbaumaßnahmen von Wohngebäuden. Das GMK[®] kann für Planungsaufgaben, wie z.B. die Erfassung der im Gebäude enthaltenen Baustoffarten und –mengen oder zur Entscheidungsunterstützung zu ressourcensparenden Sanierungsmaßnahmen maßgeblich beitragen.

Im Sinne einer Lebenszyklusbetrachtung ist es heute von größter Bedeutung bei der Neuplanung einen späteren Rückbau schon einzubeziehen (Asam et al., 2018). Die Dokumentation der eingebauten Materialien, sei es auf in einem Rohstoffkataster von Quartieren, auf Basis des BIM oder eines zukünftigen Ressourcenpasses von Gebäuden, erleichtert die Auffindbarkeit von Materialien.

9. RSQ-BIM-Viewer

Der Einsatz von Building Information-Modelling (BIM) dient der Schaffung einer digitalen Informationsgrundlage auf den unterschiedlichen Ebenen der Bauteile, Gebäuden und Quartieren. Um eine Informationsgrundlage über die Ebenen hinweg zu ermöglichen, müssen die Daten und Eigenschaften von der Bauteilebene über die Gebäudeebene bis zur Quartiersebene aggregiert werden können. Dabei bildet BIM Gebäude und Bauteilinformationen digital ab und kann damit die Datengrundlage für Betrachtungen auf Quartiersebene vorhalten (Abbildung 35).

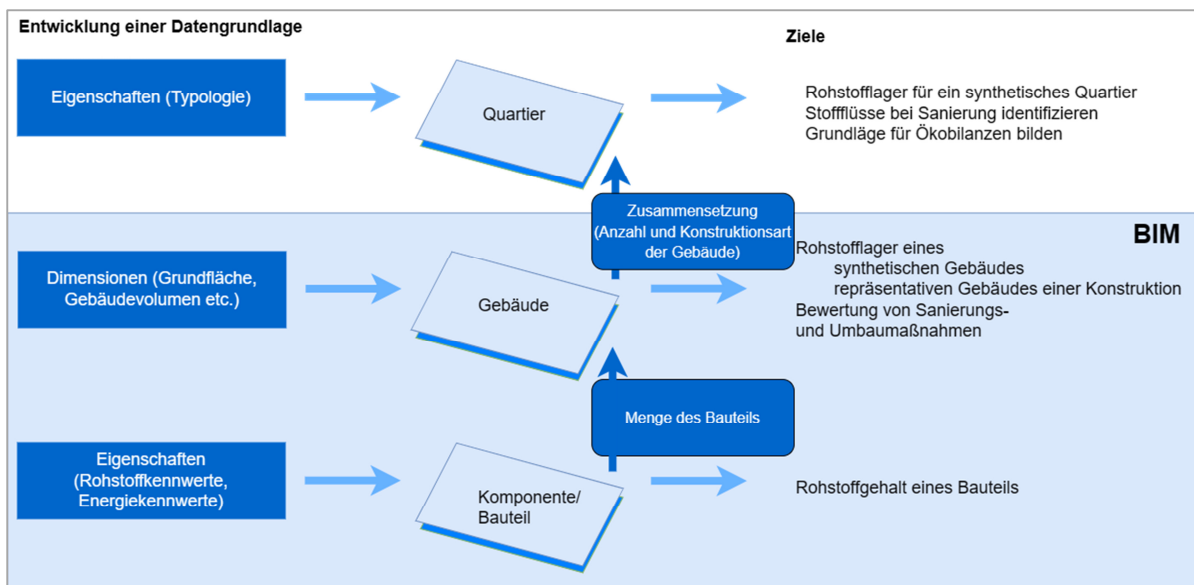


Abbildung 35 Konzeptioneller Entwurf zur Aggregation Daten und Eigenschaften auf Material-, Gebäude- und Quartiersebene (Eigene Darstellung in Anlehnung an Mack, T.; Scheich, P.; Koch, B.; Schebek, L., 2021)

Die Ableitung von Materialinventaren bestehender Gebäude auf Basis von Building Information-Modelling folgt dem in Abbildung 36 dargestellten Gesamtmodell, welches das Konzept zur Verwendung von BIM-Modellen im Rahmen des Projektes im Sinne der urbanen Stoffstrommanagements abbildet. Das Konzept gründet auf der Datenebene und baut darauf die die Phasen der BIM Rekonstruktion und weitergehend der BIM-Analyse auf. Um Informationslücken zu schließen wird ein kombinierter Ansatz aus synthetischen und realen Daten verfolgt. Ein rein auf synthetischen Daten beruhendes BIM-Modell bildet ein synthetisches Gebäude ab. Zusätzliche Datenquellen ermöglichen es die synthetischen Daten immer tiefergehend durch reale Daten zu ersetzen und so eine präzisere, digitale Abbildung der gebauten Umwelt für den urbanen Stoffstrommanagement bereit zu stellen.

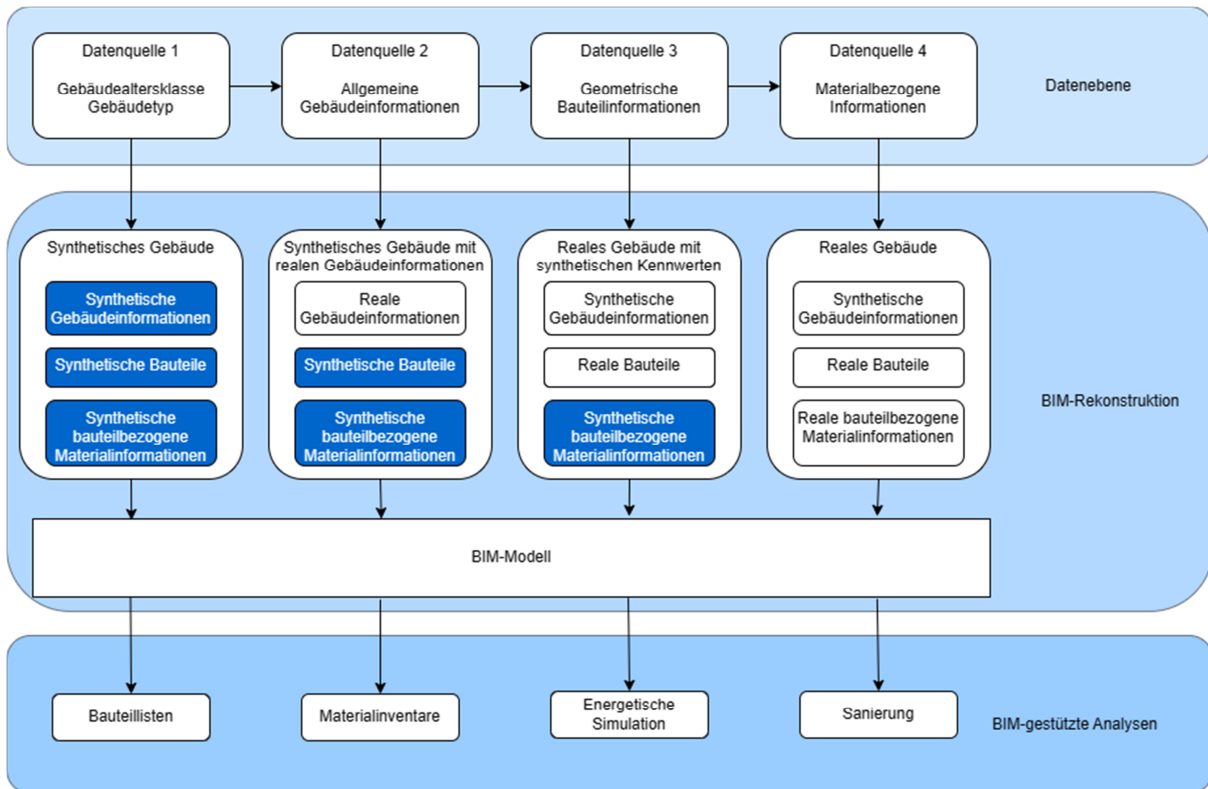


Abbildung 36 Kombiniertes Ansatz von synthetischen und realen Daten zur Integration in BIM (Eigene Darstellung)

9.1. Generische Informationsgrundlage: Anforderungen, Datenmodelle und Informationstiefen

9.1.1. Das IFC-Format im Kontext von RessStadtQuartier

Die Industry Foundation Classes (IFC) stellen das standardisierte Austauschformat für BIM-Modelle dar und bieten deswegen plattformunabhängig die Möglichkeit die Abbildung der notwendigen Daten zu prüfen. Die Modellierung der für den urbanen Stoffstrommanagement notwendigen Kennzahlen im IFC-Format wird differenziert nach deren Nutzung betrachtet. Bei der Nutzung wird unterschieden in allgemeine Gebäudedaten, energetische Daten zur Bilanzierung in der Nutzenphase und stoffbezogene Daten der Rückbauphase. Daten für die beiden zuletzt genannten Nutzungen können zudem gebäudebezogen als auch bauteilbezogen abgebildet werden. Die Zuordnung erfolgt anhand der IFC Version 4.2 (buildingSMART International Ltd., 2016).

Tabelle 20 zeigt die erforderlichen allgemeinen Gebäudedaten und deren Abbildung im IFC-Format. Zur Modellierung von allgemeinen Gebäudedaten eignet sich im IFC-Format die Eigenschaftslisten (Property Sets) und Mengenlisten (Quantity Sets) der Entität IfcBuilding. Während die Werte von Eigenschaften frei gemäß dem Eigenschaftstyps vergeben werden können, sind Mengen von der geometrischen Modellierung der betreffenden Elemente abhängig und ergeben sich aufgrund des semantischen Zusammenhangs aus diesen. Informationen zu

Abschlussbericht „RessStadtQuartier“

Grundflächen und Rauminhalten eines Gebäudes greifen deswegen auf die, durch die Entität IfcSpace abgebildeten, Räume und die, durch die Entität IfcBuiltElement abgebildeten, Bauteile im BIM-Modell zu. Die Abbildung der meisten erforderlichen, allgemeinen Gebäudedaten kann im IFC-Format erfolgen. Das Verhältnis zwischen Grundfläche und Rauminhalt kann nicht direkt im IFC-Format modelliert werden, kann aber jederzeit nachträglich aus den Angaben zu Grundfläche und Rauminhalt im IFC-Format bestimmt werden. Die Modellierung der Mengen Länge, Breite und Höhe ist nicht ohne weiteres möglich, da diese drei Angaben in den meisten Fällen nicht ausreichen um komplexere Gebäudegeometrien zu erfassen. Die Informationen zu den Abmessungen sind nur implizit IFC-Format eines BIM-Modells enthalten. Zur Abbildung der Anzahl an Wohneinheiten ist deren Modellierung über die Entität IfcSpace erforderlich. Dadurch kann diese Information implizit in das IFC-Format überführt werden. Über die Eigenschaft OccupancyNumber der Entität IfcSpace kann die Größe des Haushaltes abgebildet werden.

Tabelle 20 Abbildung der allgemeinen Gebäudedaten des urbanen Stoffstrommanagements im IFC-Format

Allgemeine Gebäudedaten						
Daten		IFC				
Bezeichnung	Einheit	Typ	Name	Property Typ	Property Set	Entität
GMK-ID	-	Eigenschaft	BuildingID	IfcIdentifier	Pset_BuildingCommon	IfcBuilding
Altersklasse	-		IsPermanentID (=True)	IfcBoolean	Pset_BuildingCommon	IfcBuilding
Gebäudetyp	-		YearOfConstruction	IfcLabel	Pset_BuildingCommon	IfcBuilding
Anzahl der Stockwerke	-		MarketCategory	IfcLabel	Pset_BuildingUse	IfcBuilding
Haushaltsgröße je Wohneinheit	-		MarketSubCategory	IfcLabel	Pset_BuildingUse	IfcBuilding
			NumberOfStoreys	IfcInteger	Pset_BuildingCommon	IfcBuilding
			OccupancyNumber	IfcCountMeasure	Pset_SpaceOccupancyRequirements	IfcSpace
Bezeichnung	Einheit	Typ	Name	Quantity Typ	Quantity Set	Entität
Netto-Grundfläche	m ²	Menge	NetFloorArea	Q_AREA	Qto_BuildingBaseQuantities	IfcBuilding
Brutto-Grundfläche	m ²		GrossFloorArea	Q_AREA	Qto_BuildingBaseQuantities	IfcBuilding
Gesamtgeschossfläche	m ²		FootprintArea	Q_AREA	Qto_BuildingBaseQuantities	IfcBuilding
Geschosshöhen	m ²		Height	Q_LENGTH	Qto_BuildingBaseQuantities	IfcBuilding
Bruttorauminhalt	m ³		GrossVolume	Q_VOLUME	Qto_BuildingBaseQuantities	IfcBuilding
Nettorauminhalt	m ³		NetVolume	Q_VOLUME	Qto_BuildingBaseQuantities	IfcBuilding
a/v-Verhältnis	m					
Länge	m					
Breite	m					
Höhe	m					
Anzahl der Wohneinheiten	-					

Energetische Kennwerte und deren Abbildung im IFC-Format werden in Tabelle 21 dargestellt. Zur Abbildung der gebäudebezogenen energetischen Kennwerte eignet sich im IFC-Format die Eigenschaftslisten der Entität IfcBuilding und ergänzend der Entität IfcBoiler. Bei den gebäudebezogenen Kennwerten handelt sich um Verbrauchsgrößen. Eine Verwendung dieser Eigenschaften ist sowohl im Sinne der Nutzenenergie als auch der Endenergie möglich. Der Nutzenergiebedarf an Strom und Wärme kann deswegen über die Größen Wärmenergieverbrauch und Stromverbrauch erfolgen. Die Abbildung von Informationen zu den Umwelteinflüssen der technischen Komponenten aufgrund derer Emissionen im Betrieb ist nicht möglich. Sowohl bei dieser Größe als auch bei den vorangegangenen Energiegrößen bietet das IFC-Format noch Erweiterungspotential, um das energetische Profil von Gebäuden abzubilden und damit als Informationsgrundlage für Bewertungen im Stadtquartierskontext dienen zu können.

Neben den gebäudebezogenen Daten sind für energetische Bewertungen auch Daten zu den einzelnen Bauteilen erforderlich. Alle einzelnen Bauteiltypen werden im IFC-Format unterhalb der

Entität IfcBuildingElement erfasst. Decken werden beispielsweise durch die Entität IfcSlab repräsentiert. Die bauteilbezogenen energetischen Daten können in den Eigenschaftslisten (Property Sets) und Mengenlisten (Quantity Sets) der spezialisierten Bauteil-Entitäten wie IfcSlab abgebildet werden. Der U-Wert kann über die Eigenschaft ThermalTransmittance der Entität des jeweiligen Bauteiltyps modelliert werden. Für die Decke befindet sich diese Eigenschaft beispielsweise in der Eigenschaftsliste Pset_SlabCommon der Entität IfcSlab. Analoges gilt für die bauteilbezogenen Mengen Netto-Bauteilfläche und Brutto-Bauteilfläche bzw. die Bauteilfläche allgemein. Auch diese können über die Mengen NetArea und GrossArea bzw. Area der entsprechenden Mengenliste der Bauteil-Entität modelliert werden. So können die Flächen einzelner Fenster beispielsweise in der Menge Area der Mengenliste Qto_WindowBaseQuantities der Entität IfcWindow abgebildet werden. Durch die Mengenabbildung in einzelnen Bauteilen sind im IFC-Format implizit auch die Informationen zu bauteiltypspezifischen Mengen für das gesamte Gebäude wie die Gesamtfensterfläche enthalten. Eine weitere Unterteilung gemäß der Ausrichtung der Bauteile bezogen auf die Himmelsrichtung ist mit den Daten aus dem IFC-Format nicht bzw. nur schwer möglich. Diese Information ist bei energetischen Bewertungen für Außenwände, Fenster sowie Außentüren hilfreich jedoch nicht zwingend erforderlich.

Auf die Bewertung des energetischen Zustandes eines Gebäudes folgen oftmals unterschiedliche Sanierungsmaßnahmen. Um das Erfordernis der Sanierung einzelner Komponenten zu bewerten, gibt der Herstell- bzw. Einbauzeitpunkt dieser Komponenten einen ersten Hinweis. Das Abbilden von Informationen zu Sanierungen beschränkt sich im IFC-Format auf das Jahr der Sanierung (YearOfLastRefurbishment) der Entität IfcBuilding. Die Modellierung dieser Informationen bezogen auf einzelne Komponenten ist lediglich für den Herstellungszeitpunkt (ProductionYear) der Entität IfcElement möglich und damit begrenzt. Diese Informationslücke könnte eine Erweiterung des IFC-Formats schließen, welche ermöglicht einzelnen Komponenten und Bauteilen ein Datum des Einbaus und ein Datum zur letzten Sanierung zuzuordnen.

Tabelle 21 Abbildung der energetischen Kennwerte des urbanen Stoffstrommanagements im IFC-Format

		Energetische Kennwerte						
		Daten		IFC				
		Bezeichnung	Einheit	Typ	Name	Property Type	Property Set	Entität
gebäude- bezogen	Jahr der Sanierung	-	Eigenschaft	YearOfLastRefurbishment	IfcLabel	Pset_BuildingCommon	IfcBuilding	
	Energiequelle des Heizsystems	-		EnergySource	IfcLabel	Pset_BoilerTypeCommon	IfcBoiler	
	Nennleistung Heizsystem	kWh		NominalEnergyConsumption	IfcPowerMeasure	Pset_BoilerTypeCommon	IfcBoiler	
	Wärmeenergieverbrauch	kWh/a		Heat	IfcEnergyMeasure	Pset_UtilityConsumptionPHistory	IfcBuilding	
	Stromverbrauch	kWh/a		Electricity	IfcEnergyMeasure	Pset_UtilityConsumptionPHistory	IfcBuilding	
	Wasserverbrauch	kWh/a		Water	IfcEnergyMeasure	Pset_UtilityConsumptionPHistory	IfcBuilding	
	Kraftstoffverbrauch	kWh/a		Fuel	IfcEnergyMeasure	Pset_UtilityConsumptionPHistory	IfcBuilding	
	Dampf-/Gasverbrauch	kWh/a		Steam	IfcEnergyMeasure	Pset_UtilityConsumptionPHistory	IfcBuilding	
	Nutzerenergiebedarf (Wärme)	kWh/a		-	-	-	-	-
	Nutzerenergiebedarf (Strom)	kWh/a		-	-	-	-	-
bauteil- bezogen	Herstellungsjahr	-	ProductionYear	IfcLabel	Pset_ManufacturerTypeInformation	IfcElement		
	U-Wert	kWh/a	ThermalTransmittance	IfcThermalTransmittanceMeasure	z. B. Pset_SlabCommon	z. B. IfcSlab		
		Bezeichnung	Einheit	Typ	Name	Quantity Typ	Quantity Set	Entität
bauteil- bezogen	Netto-Bauteilfläche	m ²	Menge	NetArea	Q_AREA	z. B. Qto_RoofBaseQuantities	z. B. IfcSlab	
	Brutto-Bauteilfläche	m ²		GrossArea	Q_AREA	z. B. Qto_RoofBaseQuantities	z. B. IfcSlab	

Die Abbildung der Ökobilanzdaten, welche beispielsweise erforderlich sind, um den ökologischen Mehrwert hochwertiger Verwertungswege bewerten zu können, erfolgt im IFC-Format über die

Beschreibung der konstruktiven Bauteile mittels Material Layer Sets oder Material Constituent Sets. Schichtartig, aufgebaute Bauteile wie Wände, Decken, Fundamente und Dächer wird ein Material Layer Set zugeordnet, welches wiederum aus beliebig vielen Schichten (MaterialLayer) besteht. Jeder Schicht wird ein Material (Material) sowie eine Dicke zugeordnet. Die Summe aller Schichtdicken entspricht der Dicke des Bauteils. Bauteile wie Fenstern, Türen und Treppen sind aus verschiedenen nicht schichtartigen Elementen (MaterialConstituent) aufgebaut, welche immer ein einzelnes Material (Material) aufweisen. Den nicht schichtartigen Elementen (MaterialConstituent) muss zusätzlich eine physischen Mengeneigenschaft zugeordnet werden. Die stoffbezogenen Informationen liegen in beiden Fällen in den Eigenschaftslisten des Materials.

Das bestehende Bauteil- und Materialkonzept der Industry Foundation Classes (IFC) zu Abbildung der Materialinformationen reicht jedoch nicht aus, um die erarbeiteten Ökobilanzdaten in vollem Umfang abzubilden, da Materialien dort in einem genaueren Maße differenziert betrachtet werden. Deswegen ist eine Erweiterung des IFC-Formats auf tieferliegende Materialebenen erforderlich. Derzeit ist es nur möglich dem IfcMaterialLayer ein IfcMaterial zuzuordnen. Dabei bestehen Schichten eines Bauteils oftmals als mehr aus einem Material. So sind in einer Fachwerkwand die Holzkonstruktion und die Ausfachung in einer Schicht angeordnet und eine Ziegelmauerschicht besteht neben den Ziegelmauersteinen auch aus dem verwendeten Mörtel. Zur Abbildung der Ökobilanzdaten empfiehlt sich deswegen die Erweiterung des IfcMaterialLayers um mehrere IfcMaterial. Die Ökobilanzdaten verknüpfen außerdem die Materialien mit den enthaltenen Rohstoffen, um auch etwaige Rohstoffkreisläufe aufdecken zu können. Deswegen ist eine Erweiterung der IfcMaterial um mehrere IfcRawMaterial sinnvoll.

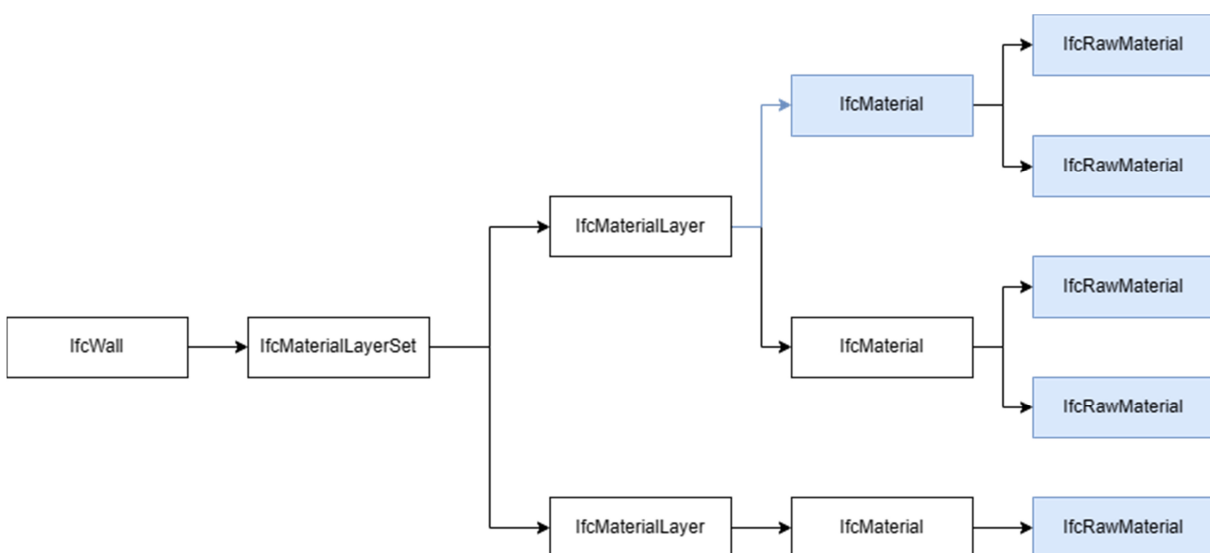


Abbildung 37 Erweiterung des IFC um tieferliegende Materialebenen (Eigene Darstellung)

9.1.2. Informationsquellen und Informationstiefen

Zur Abbildung der für das urbane Stoffstrommanagement notwendigen Informationen sind neben den allgemeinen Gebäudeinformationen die Bauteile der Konstruktion von zentraler Bedeutung. Zu deren Modellierung in BIM werden sowohl geometrische als auch material- und stoffbezogene Informationen benötigt. Die geometrischen Bauteilinformationen erfassen die Ausdehnung eines Bauteils im dreidimensionalen Raum und ermöglichen damit Rückschlüsse über die Mengen der Bauteile. Material- und stoffbezogene Informationen geben Auskunft über den Bauteilaufbau, die Bauteilstärke und die im Bauteil enthaltenen Materialien. Nur durch das Zusammenführen dieser drei Arten von Informationen aus teils unterschiedlichen Quellen lassen sich BIM-Modelle rekonstruieren, welche für das urbane Stoffstrommanagement Anwendung finden können (Abbildung 38).

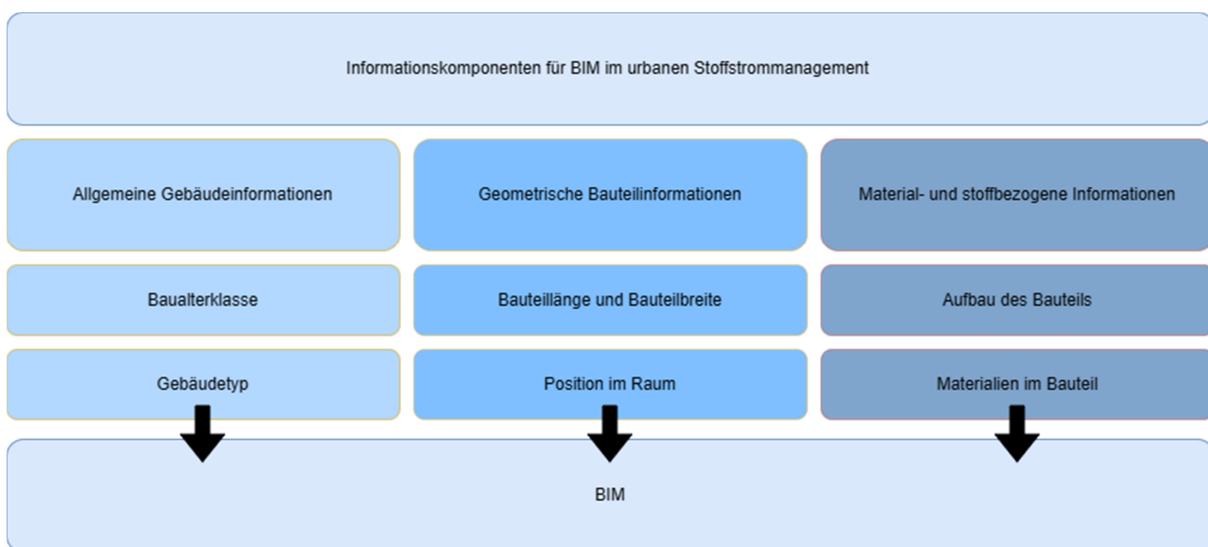


Abbildung 38 Informationskomponenten für BIM-Modell (Eigene Darstellung)

Nachfolgend werden unterschiedliche Informationsquellen und die darin enthaltenen Arten von Informationen zusammengetragen. Zusätzlich werden die Informationstiefe und die Schwierigkeit der Informationsextraktion der Quellen bezogen auf die einzelnen Arten der Informationen bewertet. Unterteilt werden die Quellen in die Kategorien Realitätserfassung und Literatur. Während Quellen der Kategorie Realitätserfassung Informationen über den realen Bestand beinhalten, bilden Quellen der Kategorie Literatur auf Basis von Literaturrecherchen und Bauakteneinsichten verallgemeinerte Informationen zu geometrischen Informationen von Gebäuden und material- und stoffbezogene Informationen von Bauteilen ab.

Zur Realitätserfassung von bestehenden Einzelgebäuden liegen den Kommunen Unterlagen des Bauantrags vor. Diese umfassen alle für den Bauantrag notwendigen Formulare, Nachweise und Pläne. Diverse Formulare und Nachweise wie Brandschutznachweise enthalten in einer stark unstrukturierter Form viele Informationen zum Gebäude allgemein wie die Gebäudeklasse, Abschlussbericht „RessStadtQuartier“

Bruttorauminhalt und die Nutzung, aber auch Informationen zu den verwendeten Materialien und Stoffen. Die im Bauantrag enthaltenen Pläne enthalten die geometrischen Informationen zu allen für diesen Projektstand erforderlichen Bauteilen. Da eine genauere Festlegung des Aufbaus der Bauteile zu diesem Projektstand jedoch nicht erforderlich ist, sind Material- und Stoffinformationen nur im geringen Maße in diesen Plänen enthalten. Diese sind spätestens in den Plänen der Ausführungsplanung enthalten, welche jedoch Eigentum der Bauherren sind und den Kommunen nicht vorliegen. Bis zum derzeitigen Stand sind Bauantragsunterlagen in Papierform eingereicht worden und liegen deswegen in den meisten Fällen auch nur in diesem Format vor. In einigen Fällen ist durch das Einscannen der Papierunterlagen eine erste Digitalisierung der Bauantragsunterlagen erfolgt. Jedoch erweist sich die automatisierte Informationsextraktion aus solchen stark unstrukturierten und nicht maschinenlesbaren Quellen als sehr schwierig. Die Erschließung der in den Unterlagen wie Plänen vorhandenen Informationen übernimmt der Mensch. Demnach müssen zur teilautomatisierten Extraktion der Informationen umfangreiche, digitale Methoden wie Künstliche Intelligenz zur Anwendung kommen. Den Kommunen liegen jedoch auch bereits digitale Inhalte zu bestehenden Infrastrukturen vor, deren Verwertung einfacher möglich ist. Hierzu zählt das Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS), welches allgemeine Gebäude- und Grundstücksinformationen, sowie geringe geometrische Informationen in Form des Umrisses des umbauten Raums beinhaltet. Ergänzend hierzu sind auch virtuelle 3D-Stadtmodelle bei den Kommunen weit verbreitet. Diese entstehen aus der Kombination von ALKIS-Daten mit Daten aus Drohnenbefliegungen. Die dabei erfassten Informationen werden zu virtuellen 3D-Stadmodellen teils automatisiert aufbereitet. Je nach Datenformat ist die Informationstiefe dieser 3D-Stadmodelle unterschiedlich. Zuzeitigem Stand sind diese im CityGML-Format mit einem sogenannten Level of Detail von 200 weit verbreitet. Diese beinhalten nur eine geringe Menge an allgemeinen Gebäudeinformationen, jedoch eine große Menge an geometrische Informationen zu allen Außenbauteilen. Da es sich sowohl bei ALKIS-Daten als auch bei dem CityGML-Format um digitale Formate handelt ist die automatisierte Informationsextraktion vereinfacht möglich. Bildaufnahmen wie Satellitenbilder oder Vorort-Außenaufnahmen von Gebäuden bieten prinzipiell dieselben Möglichkeiten wie das CityGML-Format. Zu deren Verwertung müssen jedoch wie bei den Bauantragsunterlagen umfangreiche, digitale Methoden wie Künstliche Intelligenz zur Anwendung kommen und eignen sich deswegen zur Ergänzung zu den Informationen des CityGML-Formats. Die Nutzung der Informationsquelle Google Maps bietet dieselben Möglichkeiten wie ALKIS-Daten, sind jedoch nicht frei zugänglich.

Neben der Realitätserfassung können die unterschiedlichen Arten der Informationen auch über Literaturrecherchen und Bauakteneinsichten in Typologien festgehalten werden. Die Informationen aus den Literaturen können mithilfe von digitalen Methoden in maschinenlesbare Daten und anschließend unter Einbeziehung von Informationen aus den Bauakteneinsichten oder anderen

Recherchen, welche für den urbanen Stoffstrommanagement notwendig aber in den bisherigen Literaturen nicht abgebildet sind, in zielführende digitale Datenhaltungen überführt werden. Auf diesem Wege erarbeitete Gebäudetypologien können eingesetzt werden, wenn keine Datengrundlage zu einem Gebäude vorliegt. Dabei werden die allgemeinen Gebäudeinformationen und geometrischen Informationen zu allen Bauteilen aus der repräsentativen Gebäudetypologie übernommen und auf das Gebäude übertragen. Falls wie in diesem Fall keine Material- und Stoffinformation vorliegen, können die Bauteiltypologien eingesetzt werden. Wie bei den Gebäudetypologien können die Informationen aus der Literatur mithilfe von digitalen Methoden in maschinenlesbare Daten und anschließend unter Einbeziehung von Informationen zu Rohstoffkennwerte in digitale Datenhaltungen überführt werden (Abbildung 39).

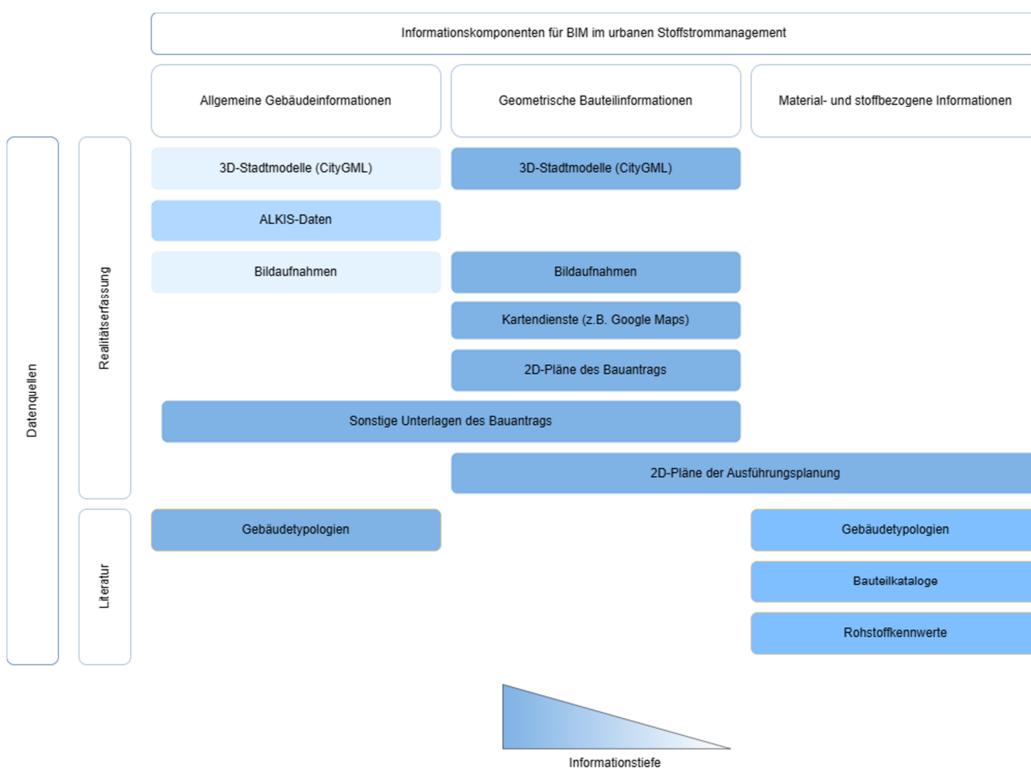


Abbildung 39 Einordnung der unterschiedlichen Informationsquellen hinsichtlich Informationsart- und -tiefe (Eigene Darstellung)

Es wird deutlich, dass die unterschiedlichen Informationsquellen nur im seltensten Fall sowohl allgemeinen Gebäudeinformationen als auch geometrische sowie material- und stoffbezogene Informationen enthalten. Diese sind jedoch alle für das Stoffstrommanagement erforderlich. Zudem ist die Schwierigkeit der Informationsextraktion je nach Informationsquelle unterschiedlich, da diese in unterschiedlichen Formen in analogen oder digitalen Formaten enthalten sind. Deswegen muss durch eine geeignete Kombination der Datenquellen gewährleistet werden, dass alle Arten von Informationen vorliegen. Den Kommunen vorliegende digitale Formate zur Gebäudedaten (ALKIS, CityGML) bilden eine gute Grundlage. Denn diese enthalten sowohl allgemeine

Gebäudeinformationen als auch geometrische Information, sind weit verbreitet und aufgrund der digitalisierten Form ist eine einfache Informationsextraktion möglich. Jedoch enthalten diese keine oder nur wenige baumaterialspezifische Informationen. Deswegen sind zusätzliche Quellen auszuwerten und mittels digitaler Formate nutzbar zu machen. Das Gewinnen dieser Information aus analogen Unterlagen zum Bauantrag ist aufgrund der sehr schwierigen Informationsextraktion dieser stark unstrukturierten Quelle nur unter Einsatz von komplexen digitalen Methoden wie künstlicher Intelligenz möglich. In dieser Hinsicht zugänglicher sind unterschiedliche Literaturen, welche material- und stoffbezogene Informationen in Form von Bauteiltypologien festhalten. Die starke Strukturierung erlaubt eine automatisierte Überführung in digitale Formate. Gleiches gilt bei den Auswertungen von Gebäudetypologien auf Basis anderer Literaturen. Bildaufnahmen, vor Ort oder auch Satellitenbilder, und Kartendienste wie Google Maps eignen sich aufgrund des einseitigen Informationsprofils und der schwierigen Informationsextraktion nur als ergänzende Quellen. Beispielsweise erlauben diese Rückschlüsse über die Geometrie des Gebäudes und die Anordnung und Größe der Fenster.

9.2. Konzeptionierung synthetischer BIM-Modelltypen

9.2.1. Weiterentwickeltes BIM-Datenmodell

In Anlehnung an das IFC-Datenmodell wird ein neues BIM-Datenmodell geschaffen, welches die in 9.1 identifizierten Datenlücken schließt und so Grundlage für ein BIM-Werkzeug des urbanen Stoffstrommanagements bilden kann. Eine zentrale Problemstellung ist die unzureichende Abbildung von Materialien im Standard Format IFC der BIM-Modelle. Zur Lösung dieses Problems muss ein Materialdatenmodell entwickelt gelegt werden, welches im Vergleich zum IFC-Format tieferliegende Materialebenen implementiert. Das Datenmodell, welches der Schaffung einer parametrisierten generischen Informationsgrundlage für typische Konstellationen von Materialinventaren dienen soll, lehnt sich an den BIM-Standard IFC an und erweitert dieses und wird in Abbildung 40 gezeigt.

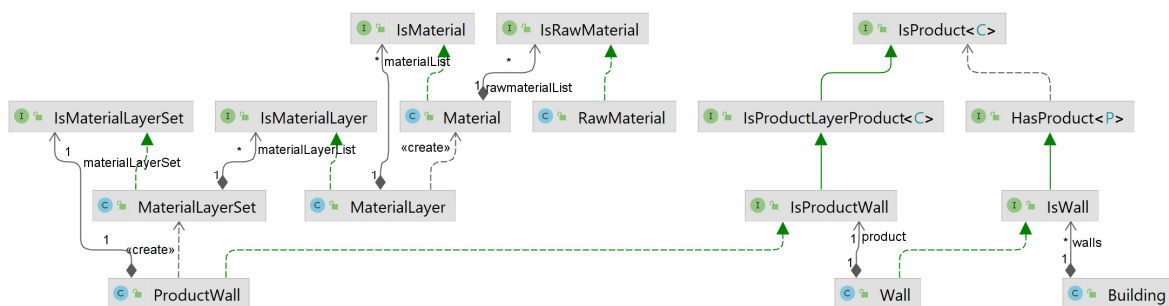


Abbildung 40 Klassendiagramm mit erweiterter Materialebene am Beispiel einer Wand (Eigene Darstellung)

Tabelle 22 und Tabelle 23 verdeutlicht die Zuordnung zwischen den einzelnen Elementen des IFC-Formats und des neuen BIM-Datenmodells und damit die Gemeinsamkeiten und Unterschiede beispielhaft an einem Wandelement. Die Abbildung beginnt auf der Ebene der Gebäude und ist von dieser bis zu Ebene der Materialschicht identisch. Im Gegensatz zum IFC-Format ermöglicht das neue BIM-Datenmodell die Zuordnung von mehreren Materialien zu einer Schicht (MaterialLayer) bzw. zu einem nicht schichtartigen Element (MaterialConstituent). Im Kontext der Verwertungswege entspricht das Material dem auf die Baustelle gelieferten Material. Die eigentlichen Rohstoffe werden in der darunter liegenden Ebene abgebildet. Ein Material kann dabei aus mehreren Rohstoffen bestehen. Die Verknüpfung des Materials mit der darüberliegenden Ebene und der darunterliegenden Ebene muss in beiden Fällen Rückschlüsse über die Masse und das Volumen bezogen auf Material und Rohstoff ermöglichen. Über die Rohdichte des Materials und dessen Anteil an der Schicht (MaterialLayer) bzw. dem nicht schichtartigen Element (MaterialConstituent) in Prozent wird dies auf der Materialebene gewährleistet. Analog besitzen Rohstoffe immer einen Anteil am Material. Durch die Rohdichte des Materials und dieses Anteiles ist eine Rohstoffermittlung möglich. Dieses Materialdatenmodell kann als generische Informationsgrundlage auf Bauteile unterschiedlicher Ausdehnung angewendet werden und in Kombination mit der geometrischen Information aus dem Bauteil ergeben sich die letztlichen Materialmengen.

Tabelle 22 Objekt-Mapping einer Wand zwischen Datenformat und IFC 4 (Eigene Darstellung in Anlehnung an Mack, T.; Scheich, P.; Koch, B.; Schebek, L., 2021)

	Datenformat	IFC 4
Quartier	Quartier	-
Gebäude	Building	IfcBuilding
Bauteil	Wall	IfcWall
Bauteiltyp	ProductWall	IfcWallType
Materialaufbau	MaterialLayerSet	IfcMaterialLayer
Materialschicht	MaterialLayer	IfcMaterialLayer
Material	Material	IfcMaterial
Rohstoff	RawMaterial	-

Die Modellierung der anderen in 9.1 zusammengetragenen Daten erfolgt durch die Zuweisung entsprechender Eigenschaften zu den einzelnen Ebenen im BIM-Datenmodell. Tabelle 23 zeigt diese Eigenschaften.

Tabelle 23 Eigenschaften der unterschiedlichen Ebenen im BIM-Datenmodell

	Datenformat	Eigenschaften	
Quartier	Quartier	-	
Gebäude	Building	GMK-ID	Grundfläche
		Altersklasse	Rauminhalt
		Gebäudetyp	Energiequelle des Heizsystems
		Anzahl der Stockwerke	Nennleistung des Heizsystems
		Anzahl der Wohneinheiten	CO2 - Emission des Heizsystems
		Haushaltsgröße je Wohneinheit	Nutzerenergiebedarf (Wärme)
		Gesamtgeschossfläche	Nutzerenergiebedarf (Strom)
		Geschosshöhe	
Bauteil	Wall	Netto-Bauteilvolumen	Netto-Bauteilfläche
Bauteiltyp	ProductWall		
Materialaufbau	MaterialLayerSet	Bezeichnung	Liste an enthaltenen Materialschichten
Materialschicht	MaterialLayer	Bezeichnung	Liste an enthaltenen Materialien
		Schichtdicke	
Material	Material	Bezeichnung	Anteil an Materialschicht in %
		Rohdichte	Liste an enthaltenen Rohstoffen
Rohstoff	RawMaterial	Bezeichnung	Anteil an Material in %

9.2.2. Entwicklung synthetischer BIM-basiertes Modelltypen für alle Gebäudetypologien

Die Entwicklung synthetischer BIM-basiertes Modelltypen für alle Gebäudetypologien auf Basis dieser Struktur ist der erste Schritt im entwickelten Konzept der informationstiefenabhängigen BIM-Rekonstruktion. Dieser dient der Ableitung von Materialeigenschaften von Gebäuden anhand synthetischer Gebäude- und damit Quartierstypologien. Zur konsistenten Ableitung von Eigenschaften auf Material-, Gebäude- und Quartiersebene ist das folgende Datenmodell entwickelt worden, welches zielgerichtete Ergebnisse und Aussagen auf den verschiedenen Ebenen ermöglicht.

Die synthetischen BIM-basiertes Modelltypen übernehmen die allgemeinen Gebäudeinformationen und geometrischen Bauteilinformationen aus synthetischen Datensätzen und die material- und

stoffbezogenen Informationen aus der Materialdatenbank und verbinden diese unterschiedlichen Informationsquellen damit zu einer gebündelten Informationsbasis in BIM. Eine generische Modellierungsgrundlage bildet die Vereinigung der geometrischen Bauteilinformationen mit den materialbezogenen Informationen aus der Materialdatenbank mithilfe der Zuordnung von Produkten zu den einzelnen Bauteilen. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 41 gezeigt. Dies ermöglicht in Kombination mit dem erweiterten Materialdatenmodell aus Abbildung 37 eine allgemeingültige Modellierungsgrundlage für BIM-Modelle des urbanen Stoffstrommanagements.

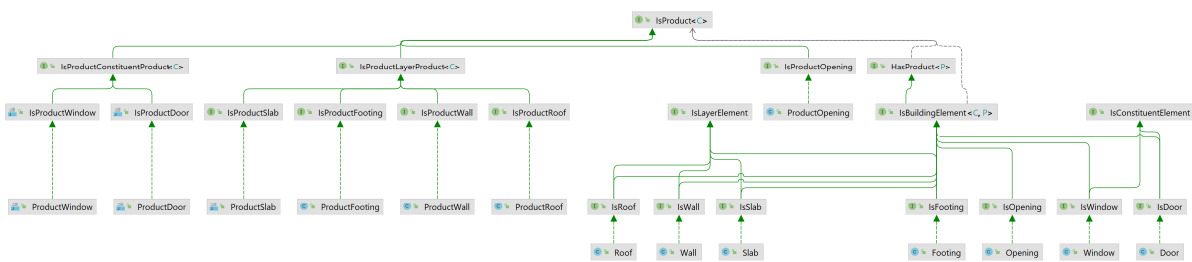


Abbildung 41 Klassendiagramm für Produkte und Bauteile (Eigene Darstellung)

Die allgemeinen Gebäudeinformationen und geometrischen Bauteilinformationen werden gemäß dem Klassendiagramm in Abbildung 42 zu einer generischen Modellierungsgrundlage vereint. Die Bauteile werden einem Gebäude zugeordnet, welches sich nähergehend über die Informationen aus der Tabelle 23 definiert. Einen besonderen Stellenwert nehmen dabei die Informationen zu Baualtersklasse und Gebäudetyp ein, welche sich über festdefinierte Werte definieren und deswegen in eigenen Klassen abgebildet werden. Diese sind die Ausgangsgrößen für die Entwicklung synthetischer BIM-basierter Modelltypen. Das beschriebene Datenmodell hält alle für das GMK[®] notwendigen Informationen in einer generischen Informationsgrundlage bereit und ermöglicht die digitale Abbildung typischer Konstellationen von Materialinventaren für die entsprechenden Gebäudeklassen und für individuelle Gebäude.

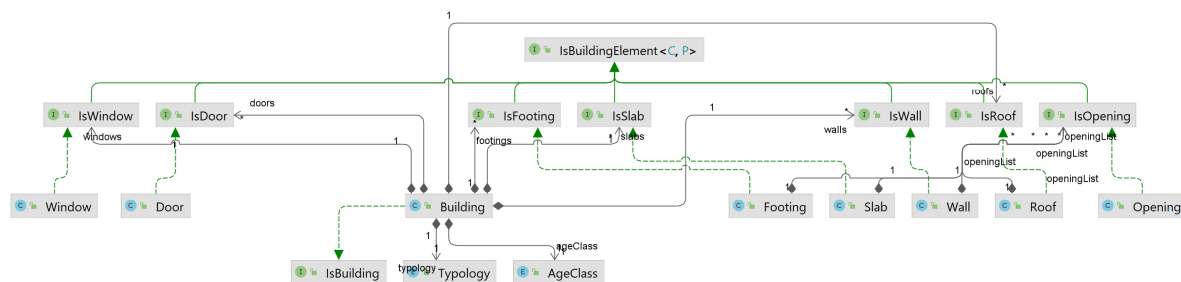


Abbildung 42 Klassendiagramm für Gebäude und Bauteile (Eigene Darstellung)

Zur Entwicklung der synthetischen BIM-basierten Modelltypen werden die Informationen der generalisierten Gebäudetypologien aus den unterschiedlichen Arbeitspaketen zusammengeführt und in ein digitales Format überführt, auf welches zur Rekonstruktion der synthetischen BIM-basierten Modelltypen zurückgegriffen wird. Auf Basis der Gebäudetyps und der Baualterklasse werden die synthetischen Daten aus der Datenebene abgerufen und in die einzelnen Prozessschritte eingebunden und als Ergebnis ein synthetischer BIM-basierter Modelltyp der Gebäudetypologie zurückgegeben. Durch den Abgleich der Metadaten der synthetischen Gebäudedaten und synthetischen Bauteiltypologien können die Bauteile des synthetischen BIM-basierten Modelltyps mit gebäudetypologischen Bauteilinformationen und Materialaufbauten gemäß dem Materialdatenmodell belegt werden (Abbildung 43).

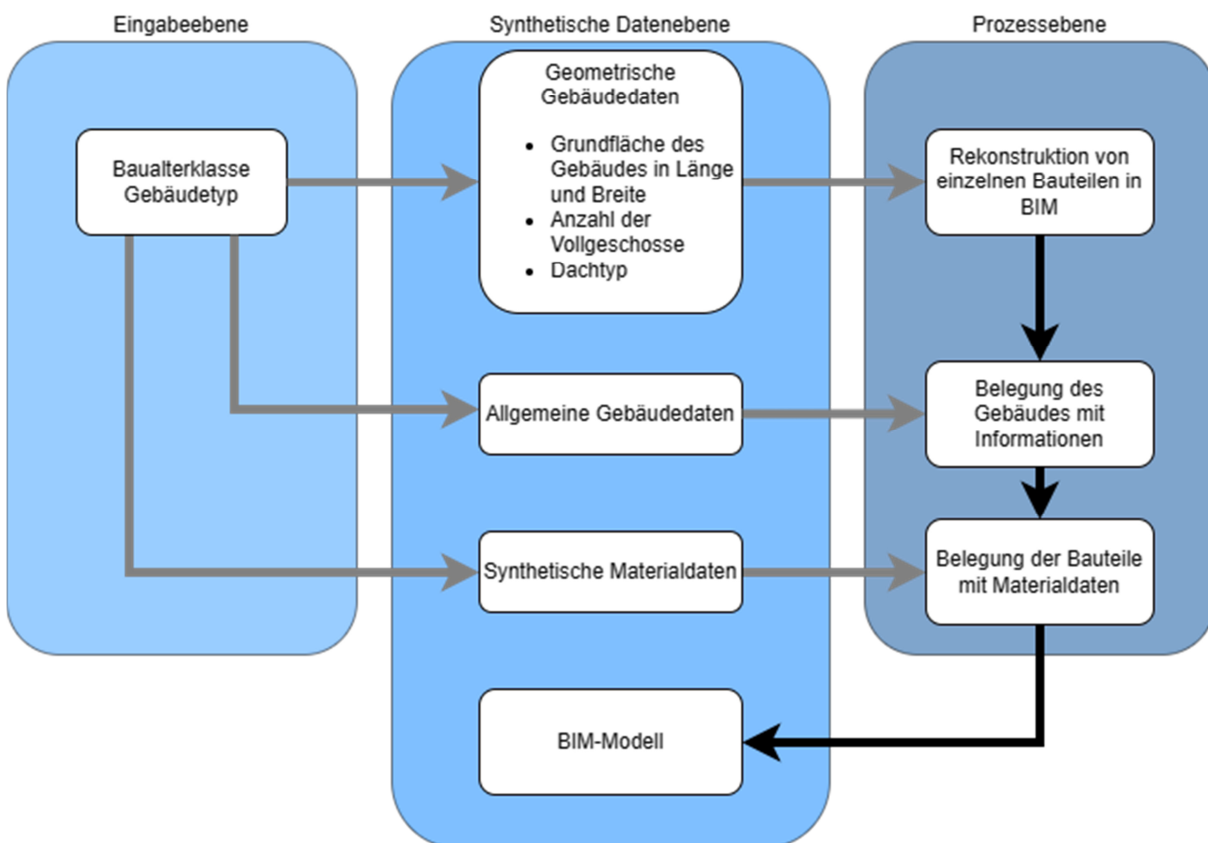


Abbildung 43 Überblick Prozessmodell zur Entwicklung der synthetischen BIM-basierten Modelltypen und Verknüpfung mit der Datengrundlage (Eigene Darstellung)

Bei der Entwicklung konkreter synthetischer BIM-basierte Modelltypen ist vor allem die Belegung der Bauteile mit Materialdaten problematisch, da auf Basis der Altersklasse und des Gebäudetyps nicht eindeutig auf eine Konstruktionsart und damit verbundene Bauteilaufbauten und Materialien geschlossen werden kann. Da dieser Schritt maßgeblich die Materialien und Ressourcen bestimmt und eine eindeutige Zuweisung auf der Ebene Gebäude und BIM notwendig ist, ergibt sich eine

wesentlich höhere Vielfalt an möglichen Ausprägungen für die synthetischen Gebäude. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in der in Materialdatenbank wieder, welche für Bauteiltypen einer Altersklasse und eines Gebäudetyps zum Teil zwei oder drei Bauteilaufbauten zur Auswahl stellt. Aus den 20 synthetischen Gebäudetypen ergäben sich deswegen weitaus mehr Variationen, da jedes nochmal in unterschiedlichen Konstruktionsarten und Materialien gegliedert werden kann. Deswegen ist die Definition eines BIM-Modells für jedes synthetisches Gebäude nur ohne Materialdaten sinnvoll.

Zur Abbildung synthetischen Gebäudetypologien und Bauteiltypologien auf Basis der Generalisierung können auch die in 9.1 identifizierten Informationsquellen eine Rolle spielen, weswegen dieser hinsichtlich dieser Funktion untersucht worden sind. Es stellte sich heraus, dass sich diese unterschiedlich gut zur Generalisierung eignen. Aus strukturierten Literaturen mithilfe von digitalen Methoden zur teilautomatisierten Extraktion entnommene Gebäude- und Bauteiltypologien können hierbei die Grundlage zur Abbildung generalisierte Gebäude darstellen. Die webbasierte Deutschlandkarte für Altbaumaterialien und -konstruktionen des ZUB (Zentrum für Umweltbewusstes Bauen, 2010) stellt eine solche Informationsquelle für repräsentative Konfigurationen der einzelnen Gebäudebestandteile dar. Die Informationen aus dieser Quelle sind aufgrund ihrer digitalisierten und strukturierten Form mithilfe von digitalen Methoden leicht zugänglich und ermöglichen es diese Bauteiltypologien und deren Materialdaten als synthetische Daten zu erschließen. Mithilfe eines Tools werden alle Bauteiltypologien und damit alle Informationen zu Bauteilaufbau und Materialien in eine JSON-Quelldatei überführt, welche in BIM aber auch als Informationsquelle für die Materialdatenbank eingesetzt werden kann. Aufgrund der Ausgangsform in Materialschichten fügt sich diese Informationsquelle in die generische Modellierungsgrundlage des erweiterten BIM-Materialmodells aus Abbildung 40 problemlos ein, wobei die Ebene der Rohstoffe nicht Bestandteil dieser Daten ist. Erweitert werden können diese zusätzlich um die Ebene der Rohstoffe und den entsprechenden Kennwerten. Diese bilden die vollständige Grundlage an synthetischen Bauteiltypen. Die Verwendung der Informationsquellen der Realitätserfassung zur Generalisierung der in 9.1 ermittelten Informationen in Form der Ableitung von Gebäude- und Bauteiltypologien aus diesen ist nur stark eingeschränkt möglich. Die in virtuellen 3D-Stadtmodellen geometrischen Informationen eignen sich grundlegend zur Generalisierung von Gebäuden in Typologien, jedoch sind die zur Klassifikation notwendigen Information zur Baualtersklasse und Bautyps (Einfamilienhaus, Reihenhaus, Mehrfamilienhaus, großes Mehrfamilienhaus) nicht enthalten. Durch die Kombination der CityGML mit diesen Informationen wird es im GMK[®] möglich Informationen zur geometrischen Ausdehnung der Gebäudetypologien wie zum Beispiel Außenwandfläche eines Einfamilienhauses vor 1948 auf den Realdaten der Gebäude in Form der CityGML zu generalisieren. Die stark unstrukturierte Form von Informationsquellen wie Bauantragsunterlagen und 2D-Plänen hat zur Folge, dass die Extraktion

der enthaltenen geometrischen und materialbezogenen Informationen nur unter Verwendung aufwendiger digitaler Methoden möglich ist.

9.3. Instrumente zur teilautomatisierten Datengenerierung konkreter BIM-Bestandsmodelle

Mit zunehmender Anzahl an Informationsquellen und damit zunehmender Informationsbreite ersetzen im Konzept der informationstiefenabhängigen BIM-Rekonstruktion die realen Daten die synthetischen Daten und es kommt hierdurch zur Abbildung konkreter Gebäude durch präzisierte BIM-Modelle auf Basis der Realitätserfassung. Die aussagekräftigere Rekonstruktion von BIM-Modellen erfolgt in Abhängigkeit der in den Kommunen vorhandenen Quartiers- und Gebäudedaten. Den Kern bildet die informationstiefenabhängige Verarbeitung von synthetischen und realen Gebäude- und Materialdaten. Dabei werden BIM-Modelle aus den Katasterdaten der Kommunen Darmstadt und Wiesbaden rekonstruiert und einzelne Bauteile mit weiteren Produkt- und Materialdaten verknüpft. Die so entstehenden, detaillierteren BIM-Modelle sollen eine verbesserte Informationsgrundlage über den Materialbestand in der gebauten Umwelt bereitstellen und können die Quartiersplanungen auf kommunaler Ebene in Bereichen der Energieeffizienz, Rohstoffrückgewinnung und der Lebenszyklusanalyse unterstützen.

Das in 9.2 beschriebene Datenmodell erlaubt die flexible Einbeziehung der vorhandenen Informationstiefe. Auf Basis der im spezifischen Anwendungsfall vorliegenden Menge an Informationen bzw. Informationsquellen kann der Einsatz von synthetischen und realen Gebäude- und Materialdaten variiert werden. Mit zunehmender Informationstiefe werden die synthetischen Daten durch Realdaten ersetzt und es kommt zur Abbildung konkreter Gebäude durch präzisierte BIM-Modelle auf Basis der Realitätserfassung (Siehe Abbildung 44). So wird die Informationsgrundlage hinsichtlich der Rohstoffpotenzial präzisiert und damit optimiert. Die Daten können so vom Quartier bis zum Baustoff spezifiziert werden.

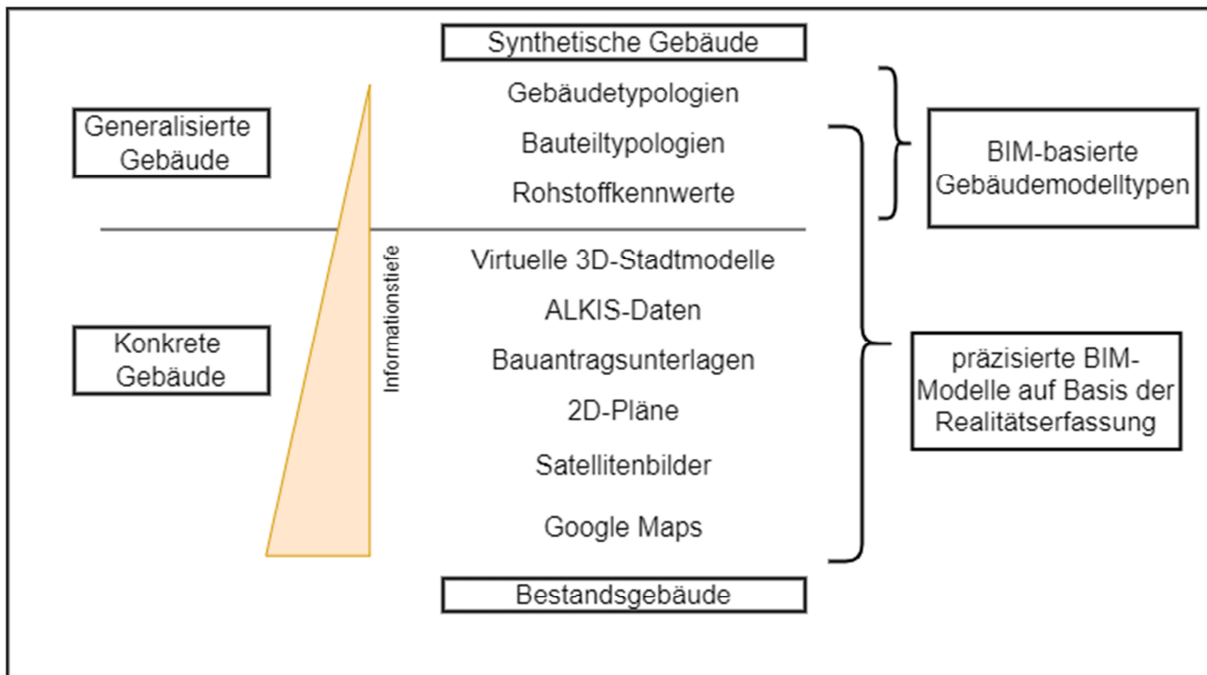


Abbildung 44 Konzept zur Nutzung der unterschiedlichen Informationsquellen in BIM mit zunehmender Informationstiefe (Eigene Darstellung)

Von der Gebäudeklasse und Altersklasse abhängige synthetischen Gebäudetypologien stellen geometrische Abmessungen (Grundfläche in Länge und Breite, Anzahl der Vollgeschosse, Dachtyp, etc.) und gängige Bauteilaufbauten gemäß dem Materialdatenmodell bereit, welche eingesetzt werden können falls sonst keine Realdaten hierzu vorliegen. Um auch eine beliebige Kombination synthetischer und realer Kennwerte auf Materialebene zu ermöglichen, ist das Materialdatenmodell in seiner Struktur so aufgebaut, dass einzelne Schichten bzw. Komponenten der Bauelemente variiert werden können, d. h. die generischen Werte der synthetischen Daten sind an die entwickelten Modellierungsstufen (MaterialLayerSet/MaterialConstituentSet – MaterialLayer/MaterialConstituent – Layer-Material/ConstituentMaterial – BuildingMaterial – RawMaterial) angepasst. Somit können einerseits Gebäudekomponenten je nach Datenverfügbarkeit näher spezifiziert werden, andererseits können BIM-Modelle aus synthetischen oder realen Gebäudedaten erstellt werden.

Bei der Entwicklung von Methoden zur teilautomatisierten Extraktion von stoff- und materialbezogenen Informationen aus unterschiedlichen heterogenen Informationsquellen wurde sich allen voran auf Literaturquellen konzentriert, um synthetische Bauteilinformationen aus diesen zu generalisieren. Es sind Anwendungen entwickelt worden, welche die Angaben zu Bauteilaufbauten und Materialien in den digitalen Literaturquellen wie PDF oder HTML, neu strukturieren und in ein digitales, einheitliches Format überführen. Zu den Literquellen zählen der SIRADOS Bauteilkatalog (König, Mandl, 2013), ZUB Altbauatlas (Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (ZUB) (2009)) und Informationssystem Gebaute Umwelt (Leibniz-Institut für

ökologische Raumentwicklung (IÖR),). Nach der Überführung zeigte sich, dass stark unterschiedliche Bezeichnung für Bauteilaufbauten und Materialien existieren, welche jedoch dieselben Informationen abbilden. Deswegen ist hier der Einsatz digitalisierte Ontologien erprobt worden, um die Informationen aus heterogenen Quellen vereinen zu können. Hierzu ist in Abbildung 45 ein Abgleich der IÖR und ZUB Materialien erfolgt, um die Informationen zu kondensieren. Dabei zeigt sich, dass sich die beiden Datenquellen im Bereich der Mauersteine sehr gut ergänzen und aber auch synonyme Definitionen von Materialien zum Beispiel für Vollziegel-Mauersteine und Kalksandstein-Mauersteine enthalten sind.

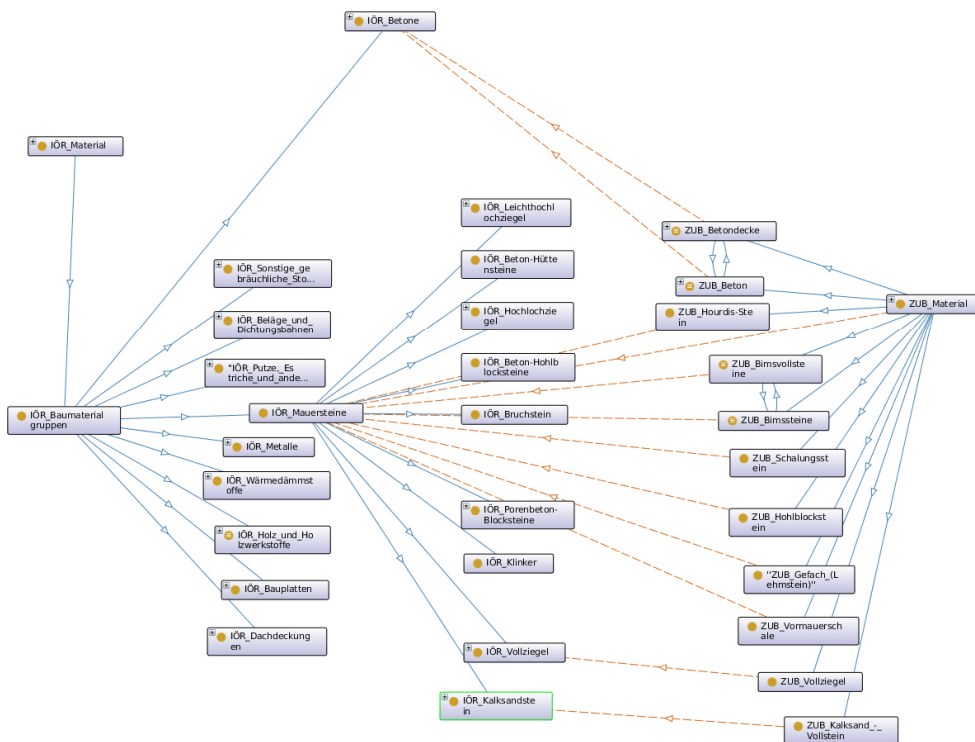


Abbildung 45 Ontologie zur Vereinigung von Materialien aus zwei unterschiedlichen Quellen (Eigene Darstellung)

Die bisherigen Informationsquellen beinhalten jedoch nur stoff- und materialbezogene Informationen bis zur Ebene der Materialien. Die Daten für die im Urban Mining notwendige Ebene der Rohstoffe müssen deswegen in 7.1 erarbeitet werden und durch Verknüpfung zu den Materialien erstellt werden. Damit bilden die entwickelten synthetischen Rohstoffkennwerte altersklassenspezifische Durchschnittswerte für Materialien realer Konstruktionsvarianten ab.

Auf Basis der bisherigen Ergebnisse ist ein Phasenschema zur informationstiefenabhängigen BIM-Rekonstruktion erarbeitet worden. Für kaum ein Gebäude in Deutschland, weder auf Seite der Bauherrschaft noch auf kommunaler Seite, existiert momentan ein BIM-Modell. In der Planung neuer Gebäude setzt sich die BIM-Methodik aufgrund der Potentiale hinsichtlich der Digitalisierung und Automatisierung von Arbeitsprozessen immer mehr durch. Es wird jedoch noch dauern, bis für einen repräsentativen Teil der Bebauung ein As-built Modell vorliegt. Neben der Anwendung der, bereits in der Neubauplanung verwendeten Tools, eröffnen BIM-Modelle des Bestands noch weitere Einsatzmöglichkeiten, welche nur zum Teil Themen dieses Projektes sind. So sollen BIM-Modelle genutzt werden, um daraus Gebäude-Material-Kataster abzuleiten, Ausgangsmodelle für Energie- und Sanierungssimulationen zu generieren und die Ökobilanzierung zu vereinfachen.

Für den Prozess der Rekonstruktion bestehender Gebäude der Wohnbebauung zu BIM-Modellen wurden fünf Phasen identifiziert und ausgearbeitet (siehe Abbildung 46). Während die ersten drei Phasen der Rekonstruktion automatisiert durchgeführt werden können, ist für die vierte Phase die händische Nacharbeit der Modelle maßgebend. In jeder Phase muss zwischen der geometrischen und semantischen Rekonstruktion der Bauteile eines Gebäudes unterschieden werden. Während für die geometrische Rekonstruktion überwiegend versucht wird, die Abmessungen der Bauteile herauszuarbeiten, werden diese in der semantischen Rekonstruktion hauptsächlich mit Metainformationen angereichert.

Grundlage für die **Phase 1** der Rekonstruktion bilden Level of Detail 2 (LoD2) Stadtmodelle, die im CityGML-Format für zwei Modellkommunen zur Verfügung stehen. Dieser Datensatz beinhaltet gebäudescharf die oberirdische Außenhülle der Gebäude sowie deren Georeferenzierung. Hieraus lassen sich die Umrisse der Außenwände, der Dächer und der Bodenplatte ableiten. Alternativ können, falls diese Informationsquelle nicht vorliegt, die geometrischen Informationen aus der entsprechenden Gebäudetypologie verwendet werden. In dieser Phase werden ebenfalls bereits Metadaten, welche Informationen zu dem Gebäude allgemein beinhalten, integriert. Im Rahmen der bidirektionalen Schnittstelle zwischen BIM und GMK[®] wird hierzu das CityGML-Format mit Informationen aus dem GMK[®] angereichert zur BIM-Rekonstruktion zu Verfügung gestellt. Die im GMK[®] hinterlegten Informationen stützen sich zum einen auf dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) der Kommunen, sowie auf Informationen der Vermessungs- und Statistikämtern. Ergänzend sind Algorithmen im Rahmen des GMK[®] entwickelt worden, um auf der Datengrundlage weitere Informationen zu ermitteln. Diese schließen unter anderem die für weitere Phasen notwendigen Informationen wie Baualtersklasse, Gebäudetypologie, Anzahl der Stockwerke mit ein. Aber auch eine Ableitung von Metadaten aus dem CityGML-Input in Form der Berechnung Gebäudegrundfläche und Bruttorauminhalt erfolgt in

diesem Schritt. Aussagen über verwendete Materialien, Aufbauten und andere Bauelemente können in Phase 1 nicht getroffen werden.

- Phase I - CityGML-Daten
 - Gebäudetypologie, Anzahl an Stockwerken
 - Außenwände, Dach, Boden
 - —
- Phase II - Erweiterte Rekonstruktion
 - —
 - Geschossdecken, Fenster, Türen
 - —
- Phase III - Synthetische Gebäudedaten
 - Synthetische Gebäudeinformationen
 - —
 - Synthetische Bauteilinformationen
- Phase IV - Nacharbeit
 - Spezifische Gebäudeinformationen
 - Innenwände, Fundamente (Fenster, Türen)
 - Spezifische Bauteilinformationen
- Phase V - Variantenentwicklung
 - Bestand, Abbruch, Sanierung, Neubau

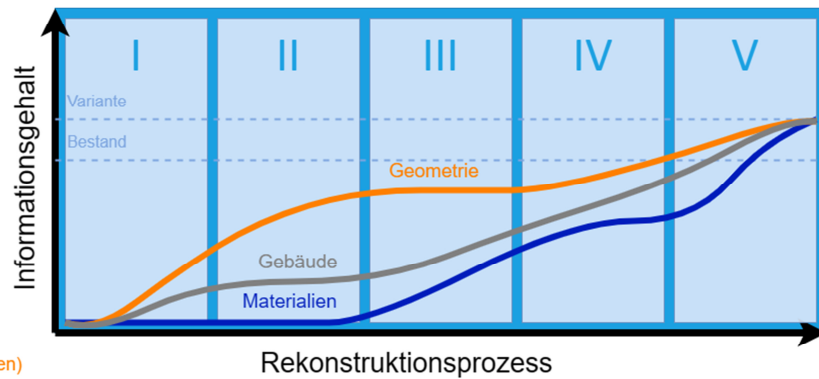


Abbildung 46 Fünf Phasen der BIM-Rekonstruktion. Geometriespezifische Informationen sind orange markiert, materialspezifische Informationen in blauer und gebäudespezifische Informationen in grauer Schrift (Eigene Darstellung in Anlehnung an Mack, T.; Scheich, P.; Koch, B.; Schebek, L., 2021)

In **Phase 2** stehen ebenfalls geometrische Informationen im Fokus. In diesem Schritt gilt es das BIM-Modell um Innenbauteile, welche das CityGML-Format mit einem LoD2 nicht umfasst, zu ergänzen. Eine Möglichkeit stellt die nicht realitätsgetreue Rekonstruktion dieser anhand der Metadaten dar. So kann aufgrund der Anzahl der Geschosse die Anzahl der Decken ermittelt und diese als Kopie der Bodenplatte angeordnet werden. Die Anordnung von Innenwänden kann ebenfalls nicht realitätsgetreu durch Algorithmen nach dem Vorbild KREMLAS (Donath, König, Petzold (Hrsg.) 2012) erfolgen. Auf Basis von sich der vorhandenen Kubatur anpassenden, parametrischen Grundrissen in Abhängigkeit der Gebäudetypologie lassen sich so Innenwände rekonstruieren. Die Abweichung eines solchen Ansatzes zur tatsächlichen Anordnung der Innenwände ist für das Urban Mining dabei genauer wie die Vernachlässigung dieser Bauteile. Eine andere Möglichkeit ist die weitergehende realitätsgetreue Rekonstruktion. Hierbei ist das Hinzufügen zusätzlicher Informationsquelle, welche geometrische Informationen enthalten, notwendig. Gemäß Abbildung 39 stellen hierfür Bildaufnahmen eine Quelle dar. Im Rahmen einer Masterthesis (Disser, 2020) ist hierzu untersucht worden, wie Bildaufnahmen von Gebäude in Kombination mit frei verfügbaren Geodaten von OpenStreetMap zur teilautomatisierten Rekonstruktion von Gebäudedaten verwendet werden können. Hierbei stellte die in den Bildaufnahmen vorhandene Verzerrung eine Problematik dar. Die Entwicklung einer automatisierten Bild-Bemaßungs-Anwendung in dieser Arbeit ermöglicht die teilautomatisierte Abschlussbericht „RessStadtQuartier“

Erschließung dieser Informationsquelle indem die Verzerrung aus den Bildern entnommen und so eine Entnahme der tatsächlichen Längen möglich wird. Mithilfe einer interaktiven Lokalisierung der Bauteile durch den Nutzer können so geometrische Bauteilinformationen gewonnen werden. Dabei ist es hier in einem ersten Schritt möglich die identischen Informationen zu Außenwänden, Dächern und Böden wie in Phase 1 zur ermitteln. Weitergehend erschließt diese Informationsquelle auch realitätsgetreue, geometrische Daten zu Fenstern und Außentüren, welche mit den Daten aus Phase 1 eine genauere digitale Abbildung des Gebäudes ermöglichen.

Material- und stoffbezogene Informationen sind ein Inhalt der **Phase 3**. Hierzu wird die in 7 entwickelte Materialdatenbank mit den synthetischen Materialdaten eingebunden, welche typische Bauteilaufbauten und damit verbundene Materialien für die unterschiedlichen Gebäudetypologien bereithält. Durch die Verschneidung und den Abgleich der Metadaten des Gebäudes zur Gebäudetypologie mit synthetischen Gebäudedaten kann das rekonstruierte BIM-Modell in der dritten Phase mit gebäudetypologischen Bauteilinformationen und Materialaufbauten angereichert werden. Ein weiterer Inhalt dieser Phase ist die weitergehende Anreicherung des BIM-Modells mit Gebäudedaten. Diese können aus synthetischen Gebäuden übernommen oder manuell eingegeben werden. Die Daten der synthetischen Gebäudemodelle entstammen Literaturwerten und Auswertungen der Bestandsdaten der Bauakten der Bauaufsichtsämter der beiden Modellkommunen.

Da die vorhandenen, nutzbaren Informationen nicht für eine vollständige automatisierte BIM-Rekonstruktion ausreichen, kann das Gebäudemodell in der **Phase 4** manuell überarbeitet und erweitert werden. Hierbei können die Dimensionierung und Positionierung von Innenwänden, Fenstern und Türen erfolgen, sofern diese im vorangegangenen Prozesse nicht bereits erfasst sind und diese Information für die weitere Verwendung des Modells relevant sind. Hierbei können 2D-Pläne der Genehmigungsplanung oder Ausführungsplanung die notwendigen, geometrischen Informationen gemäß Abbildung 39 liefern. Eine automatisierte Übernahme der geometrischen Bauteilinformationen mittels digitaler Methoden ist aufgrund der Komplexität und unstrukturierten Form der 2D-Pläne nicht möglich, weswegen diese Informationsquellen nur durch einen Menschen erschließbar sind.

Auf Basis dieses rekonstruierten BIM-Modells können in **Phase 5** Varianten entwickelt werden, indem das Modell regelorientiert manipuliert wird. So lassen sich für diverse Simulationen unterschiedliche Szenarien entwickeln. Im Rahmen von Sanierungs- und Umbauprozessen erlaubt das Datenmodell Aussagen auf Bauteil und Bauteilschichtebene und ermöglicht die Entwicklung unterschiedlicher Varianten und die dafür notwendigen Materialmengen. Bei Sanierungsmaßnahmen freiwerdende und neue benötigte Materialien können in Materialflüssen erfasst und verschiedene Sanierungsoptionen bewertet werden. Aber auch der Vergleich zwischen

Abbruch- und Neubauszenario sowie unterschiedliche Ansätze für Sanierungsvorhaben können mit dem rekonstruierten BIM-Modell unterstützt werden. Im Falle eines gesamten Abbruchs und Neubaus eines Gebäudes liefert das Datenmodell Informationen über freiwerdende Materialmengen, welche in die Kalkulation des Abbruchs eingebunden werden können. Auf Ebene der Stadtquartiere kann das BIM-Modell als Datengrundlage für Urban Mining Betrachtungen eingesetzt werden. Die sich hieraus ergebenden Materialinventare können dabei in das GMK[®] integriert werden und so synthetische Daten ersetzen. Durch die Anreicherung mit zusätzlichen Daten aus unterschiedlichen Bereichen ergeben sich außerdem weitere Möglichkeiten. Durch die Anreicherung mit Daten zu Treibhausgasemissionen kann auch eine ökologische Bewertung der Sanierungsoptionen beispielsweise über eine Ökobilanz erfolgen und so Varianten mit möglichst geringen Umweltauswirkungen identifiziert werden. Dabei liefert das Datenmodell notwendige Vordergrunddaten wie unter anderem Materialmengen von aus- und einzubauenden Bauteilen aber auch die Bauteilschichtaufbauten für die Berechnung von Wärmedurchgangskoeffizienten für die Ermittlung von verschiedenen Energiebedarfen während der Nutzenphase.

9.4. Validierung der Modelle und Instrumente

Die prototypische Umsetzung der bisherigen Ergebnisse und des damit verbundenen Konzeptes erfolgt mit dem RSQ-BIM-Viewer. Hier werden im Folgenden die Zwischenergebnisse der einzelnen Phasen und die Endergebnisse des RSQ-BIM-Viewers anhand eines Beispielgebäudes aus Darmstadt vorgestellt (siehe Abbildung 47). Für das Beispielgebäude liegt eine aus dem GMK[®] entnommene CityGML-Datei jedoch keine Bildaufnahmen oder Pläne vor. Bei dem Gebäude handelt es sich um ein kleines Mehrfamilienhaus, welches vor 1948 gebaut worden ist.

Die ersten drei Phasen, welche dem Rekonstruktionsprozess angehören, werden automatisiert durchgeführt. In Phase 1 wird das Ergebnis aus dem Einlesen einer CityGML-Datei gezeigt. Neben der Kubatur werden hierbei ebenfalls Gebäudeinformationen aus dem GMK[®] übernommen. In Phase 2 kommt es zur erweiterten, geometrischen Rekonstruktion auf Basis von Metadaten. Auf Basis der Informationen zur Stockwerksanzahl werden die Bauteile in unterschiedliche Bauteile der jeweiligen Geschosse geteilt und ebenfalls die Decken auf Basis dieser Angabe über die Geschosse rekonstruiert. Zusätzlich erfolgt eine nicht realitätsgetreue Rekonstruktion der Innenwände auf Basis eines parametrischen Grundrisses. In Phase 3 werden alle Bauteile auf Basis ihres Bauteiltyps (Außenwand, Decke etc.) synthetische Materialdaten aus der Materialdatenbank zugeordnet. Hierbei werden den Bauteiltypen automatisiert auf Basis der Gebäudetypologie entsprechende Datensätze zugeordnet. Die Auswahl kann bei zusätzlichen Informationsquellen jedoch auch manuell erfolgen.

Das Ergebnis wird in die Hauptanwendung übernommen. In deren Mitte (1) werden die Bauteile des BIM-Modells dreidimensional visualisiert. Über die Visualisierung ist es möglich das BIM-Modell aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu betrachten, Bauteile zu selektieren und diese auch unsichtbar und sichtbar zu schalten. Auf der linken Seite (2) werden alle Bauteile in einem Tree-Element sortiert nach den Stockwerken angezeigt und können darüber ebenfalls ausgewählt werden. Auf der oberen, rechten Seite (3) werden die Informationen zum Gebäude wie Altersklasse, Gebäudetyp und Grundfläche angezeigt. Darunter werden Informationen zum selektieren Bauteil dargestellt. Neben der Information, ob es sich um ein Innen- oder Außenbauteil und ein tragendes Bauteil handelt, wird hier die Information zum Produkt und damit die Informationen zu den Materialien angezeigt. Bei Bedarf kann hier auch einzelnen Bauteilen ein Produkt zugeordnet werden. In der Hauptanwendung ist es jederzeit möglich gebäudebezogene Informationen wie Baualtersklasse, Bautyp oder Adresse aber auch Produktinformationen über ein neues Produktmapping wie in Phase 3 nachträglich zu ändern. Über die Auswertungen können letztlich Bauteil- und Materialinventare des gesamten Gebäudes oder der selektierten Bauteile ermittelt werden.

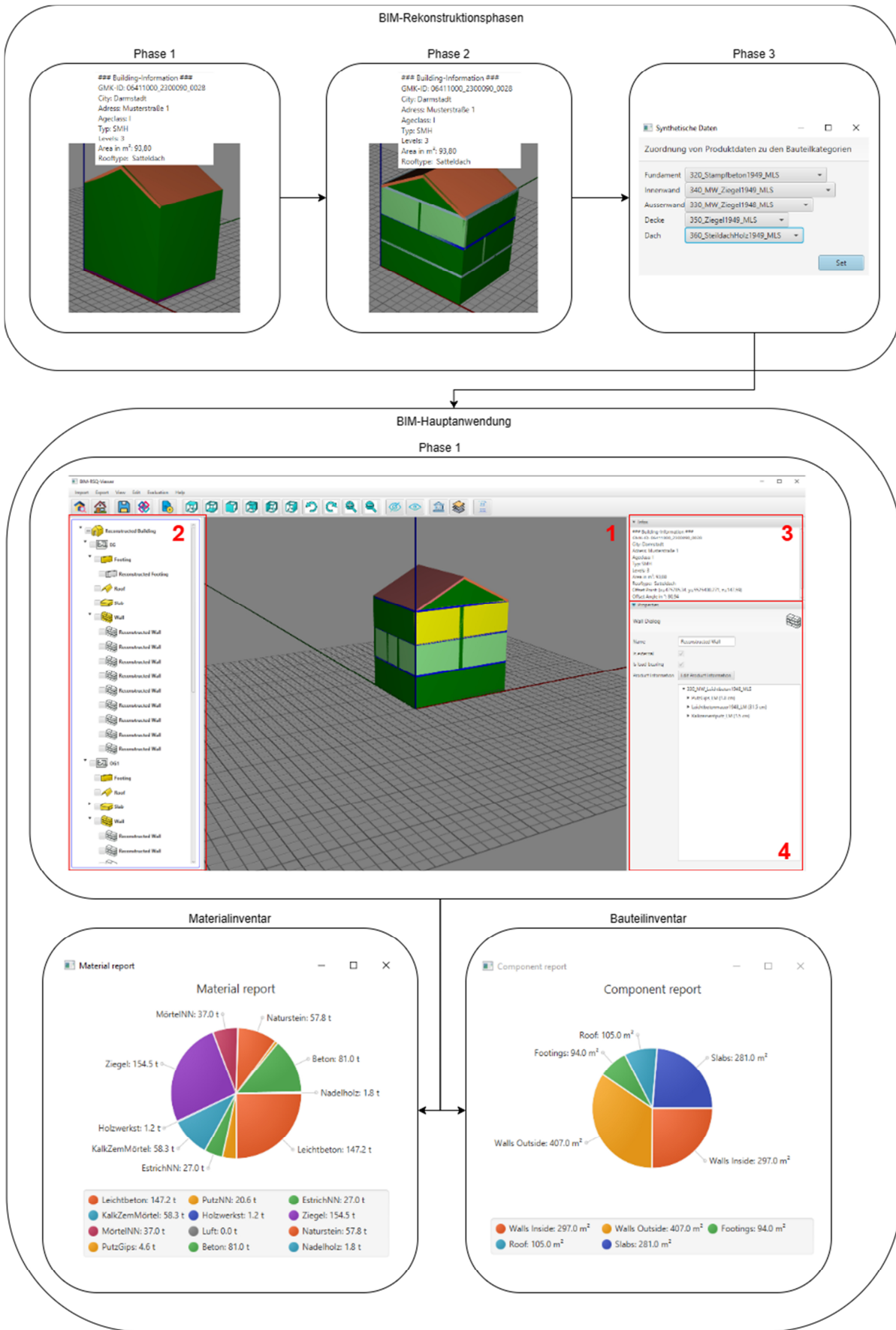


Abbildung 47 Ergebnisse der prototypischen Umsetzung im RSQ-BIM-Viewer

In Phase 4 kann jedes Bauteil einzeln händisch anhand der dem Nutzer vorliegenden weiteren Informationsquellen zum realen Bestand wie Pläne oder Gutachten angepasst werden. Während die ersten drei Phasen der Rekonstruktion automatisiert durchgeführt werden können, ist für die vierte Phase die manuelle Nacharbeit der Modelle maßgebend. Für diesen Schritt wurde eine Erweiterung der BIM-Autoren-Software Revit 2021 des Herstellers Autodesk und ein proprietäres Datenaustauschformat auf Basis von Protocol Buffers von Google entwickelt. Eine Exportfunktion im RSQ-BIM-Viewer überführt die Gebäudemodelle hierzu in ein entwickeltes proprietäres Datenaustauschformat, welches in die BIM-Autorensoftware über eine Importfunktion eingelesen wird. Dabei werden alle Bauteilinformationen sowie Produkt- und Materialdaten übertragen. In der BIM-Autorensoftware kann die weitere Modellierung des Gebäudemodells mit den üblichen Werkzeugen und Funktionen erfolgen. Eine Exportfunktion in der Revit Erweiterung überführt das Revit-Datenmodell in das proprietäre Datenformat und dieses kann wieder in den RSQ-BIM-Viewer eingelesen werden. Tabelle 24 zeigt das zugrundeliegende Objekt-Mapping zwischen den Datenformaten im RSQ-BIM-Viewer und Revit. Im RSQ-BIM -Viewer können daraufhin alle Funktionen der Hauptanwendung wieder angewendet werden.

Tabelle 24: Objekt-Mapping einer Wand zwischen Datenformat und Autodesk Revit (Eigene Darstellung in Anlehnung an Mack, T.; Scheich, P.; Koch, B.; Schebek, L., 2021)

	Datenformat	Revit 2021
Gebäude	Building	Revit-File
Bauteil	Wall	Wall
Bauteiltyp	ProductWall	WallType
Materialaufbau	MaterialLayerSet	CompoundStructure
Materialschicht	MaterialLayer	CompoundStructureLayer
Material	Material	Material
Rohstoff	RawMaterial	-

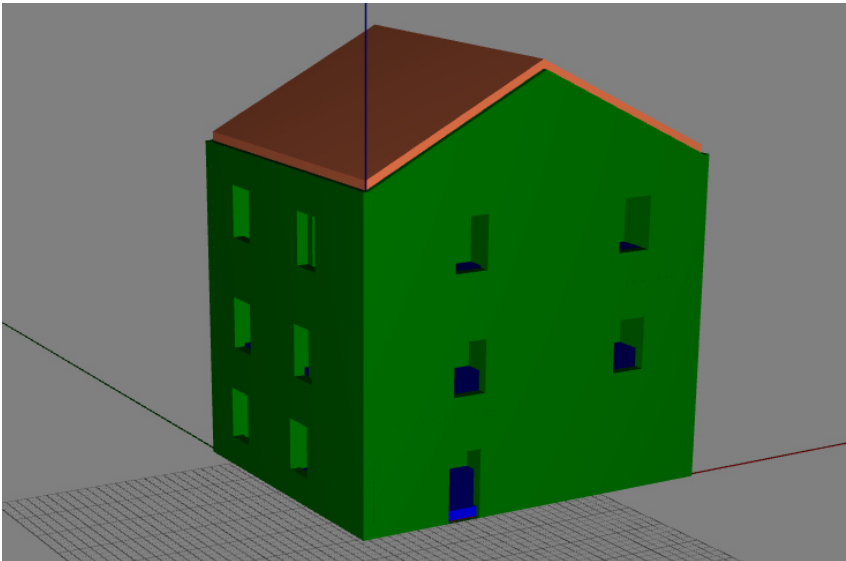


Abbildung 48 Ergebnis der Nachmodellierung in Phase 4

Das neue digitale BIM-Instrument nutzt das Konzept der informationstiefenabhängigen BIM-Rekonstruktion in Kombination mit den gängigen BIM-Systemen zur Herleitung von BIM-Modellen des urbanen Stoffstrommanagements. Eine tiefergehende Validierung der entstehenden BIM-Modelle an ausgewählten repräsentativen Gebäuden in den Quartieren von Wiesbaden und Darmstadt auf Grundlage der synthetischen Gebäudemodell-Typen mit den Praxispartnern ist in der ersten Phase nicht erfolgt. Ein Vergleich der im Fokus dieser Validierung stehenden Stoff- und Materialinventare der Gebäude mit denen des dazugehörigen BIM-Modells setzte gemeinsame Begehungen voraus, welche aufgrund der Corona-Pandemie mit Risiken verbunden waren. Zudem wurde deutlich, dass durch den Einstieg neuer assoziierter Partner aus den Bereichen Immobilienverwaltung und Projektsteuerung in Phase 2 des Projektes auch zusätzliche Beiträge aus verschiedenen Sichtpunkten den Validierungsprozess fördern. Aus diesen Gründen ist eine intensive Validierung als gesonderter Punkt in die zweite Förderphase integriert worden. Stattdessen sind zum einen die bereits erarbeiteten Ergebnisse konzentriert worden und eine aussichtsreiche Grundlage für die zweite Phase des Projektes zu schaffen. Zum anderen wurde der Fokus dafür auf das sich im Rahmen des Projektes von Grund auf implementierten BIM-Tool gerichtet, welches die entwickelten Strukturen und Funktionsweisen nutzt. Dabei ist auf eine Implementierung geachtet worden, welche eine flexible Erweiterung und Verwendung der Tools in der zweiten Phase ermöglicht. Dies ist durch die Implementation verschiedener Schnittstellen gewährleistet. Die bidirektionale Schnittstelle zwischen BIM und GMK[®] ist im Rahmen von einzelnen Beispielgebäuden der Kommunen Darmstadt und Wiesbaden bereits exemplarisch erprobt worden. Um Synergieeffekte zu nutzen ist im Rahmen der Schnittstelle von GMK[®] zu BIM auf das in beiden Werkzeugen zugrundeliegende CityGML-Format zurückgegriffen worden. Das GMK[®] teilt hierfür in einem ersten Schritt das virtuelle Stadtmodell der Kommunen in kleinere

Einheiten bis hin zu einzelnen Gebäuden und stellt die dabei entstehenden Dateien geordnet zu Verfügung. Diese werden dabei noch um zusätzliche Gebäudeinformationen wie die Baualtersklasse oder den Bautyp angereicht und können dann dem GMK[®] entnommen und dem BIM-Tool zur Rekonstruktion übergeben werden. Diese verwertet dann ebenfalls die zusätzlichen Gebäudeinformationen. Bei der Aggregation der BIM-Daten zur Verwendung dieser in quartiersbezogenen Stoffstromanalysen im GMK[®] wird zum derzeitigen Stand der Entwicklungen das XML-Format verwendet. Dafür werden im BIM-Tool die Mengen aller Bauteile desselben Bauteiltyps und desselben Bauteilaufbaus ermittelt. Dann wird diese Information in Form des XML-Formats übergeben und steht für die Integration im GMK[®] bereit. Neben dieser Schnittstelle zeigt Abbildung 49 auch die ebenfalls bidirektionale Schnittstelle, welche das Protocol Buffers Format von Google verwendet, um die Nacharbeit in Phase 4 des Rekonstruktionsprozesses im Autorensystem Revit von Autodesk zu ermöglichen. Neben dieser ist eine Überführung des BIM-Modells in das Standardformat IFC ebenfalls möglich. Damit ist es möglich auch weitere Verwendungsmöglichkeiten des BIM-Modells wie der Ökobilanzierung oder der energetischen Bewertung anzudienen.

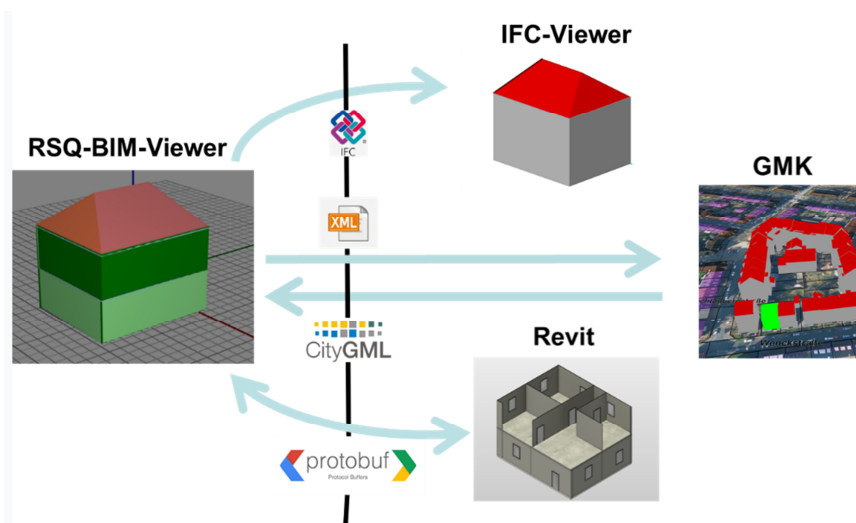


Abbildung 49 Schnittstellen des RSQ-BIM-Viewers

10. Fallbeispiele

10.1. Auswahl der Stadtquartiere

Um ein Verständnis für die Auswahl der Quartiere für die Fallstudien zu bekommen, erfolgt zunächst eine Beschreibung der Städte, sowie eine detailliertere Analyse der ausgewählten Quartiere.

10.1.1. Wissenschaftsstadt Darmstadt

Die kreisfreie Stadt Darmstadt in Südhessen gilt mit rund 165.000 Einwohnern auf einer Fläche von ca. 122,2 km² als Oberzentrum der Metropolregion Rhein-Main. Die Stadt besteht aus 9 Bezirken und wird von 4 verschiedenen Naturräumen erschlossen. Der westliche Teil Darmstadts gehört zu der Oberrheinischen Tiefebene. Im südlichen Stadtgebiet schließt ein schmaler Saum der Bergstraße an. Der südöstliche Teil gehört zum vorderen Odenwald und der Nordosten Darmstadt ist Teil des Naturraums Messeler Hügelland. Die Stadt wird vom Darmbach und im Stadtteil Eberstadt von der Modau durchflossen (Darmstadt, 2023).

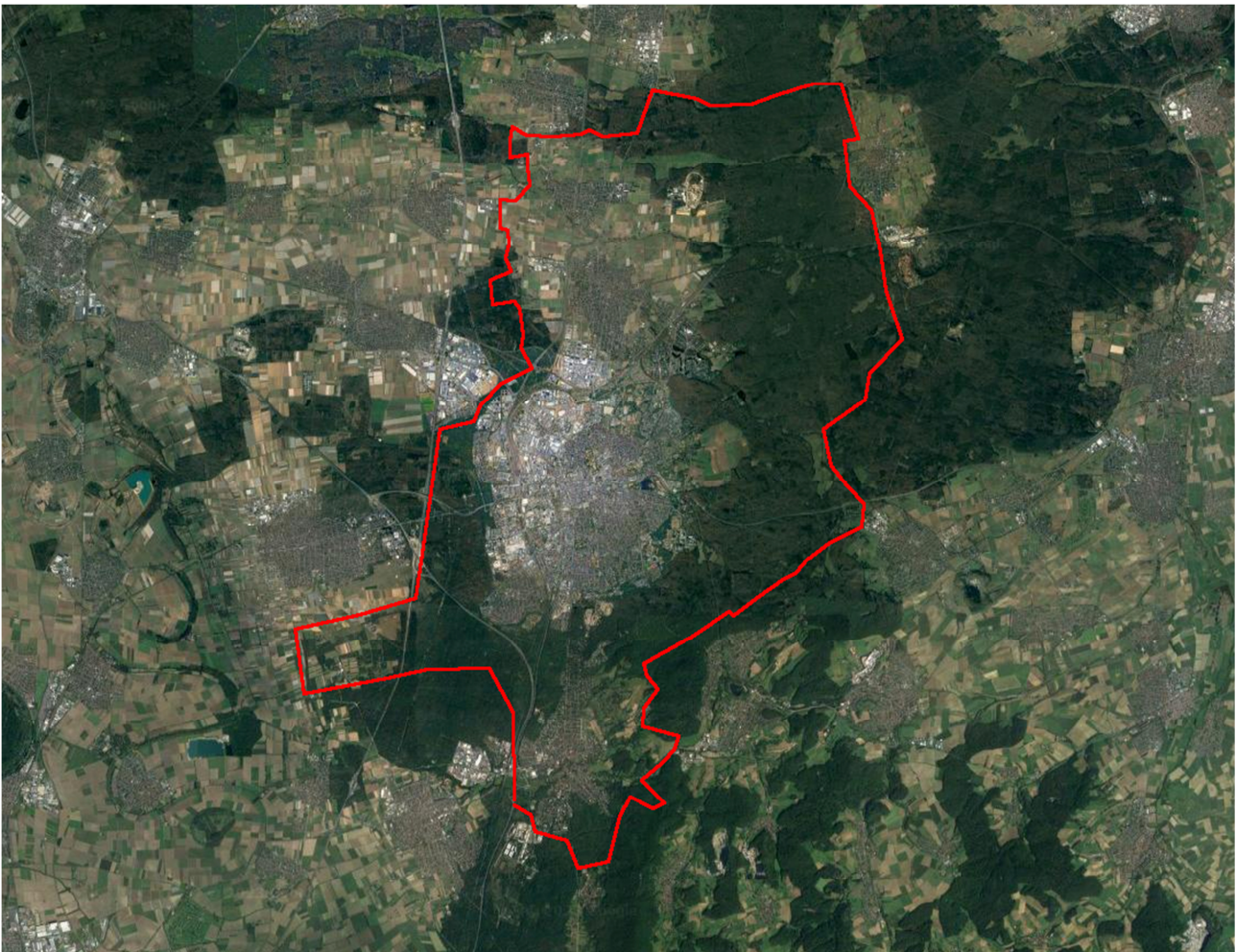


Abbildung 50 Gebiet der Stadt Darmstadt (Google Earth, 2023).

1330 erhielt Darmstadt das Stadtrecht und entwickelte sich bis 1945 zur Landeshauptstadt Hessens. Infolge schwerer Zerstörungen im zweiten Weltkrieg, verlor sie ihren Titel als Landeshauptstadt und die Konzentration beim Wiederaufbau wurde auf die Bedeutung der Stadt als Wissenschafts- und Kulturstadt gelegt. Aufgrund der Technischen Universität und zahlreichen weiteren öffentlichen und privaten Forschungseinrichtungen erhielt die Stadt 1997 den Titel „Wissenschaftsstadt“. Darüber hinaus gilt die Stadt als Zentrum des Jugendstils, was sich

beispielhaft an dem UNESCO-Weltkulturerbe der Mathildenhöhe veranschaulichen lässt. Darmstadt ist Verwaltungssitz des Regierungsbezirks Darmstadt und des Landkreises Darmstadt-Dieburg. Die Stadtteile Arheilgen und Eberstadt bildeten sich einst als unabhängige Städte, bevor sie 1937 aufgrund der geographischen Nähe und der steigenden Expansion der beiden Städte eingemeindet wurden. Darmstadt- Kranichstein wurde erst in den sechziger Jahren erbaut und der jüngste Stadtteil, Wixhausen, kam erst 1977 zu der der Gemeindeparterschaft (ebd.).

In Darmstadt wurde das Gebiet Ludwigshöhviertel für die Erarbeitung und Anwendung der in RessStadtQuartier entwickelten Tools ausgewählt. Weitere Quartiere, wie beispielsweise das Martinsviertel, wurden zur Erprobung von Erkennungsmuster herangezogen.



Abbildung 51 Quartier Ludwigshöhviertel (Google Earth, 2023)

Fallstudie Ludwigshöhviertel

Das Ludwigshöhviertel in Darmstadt ist eine Konversionsfläche, die aktuell zu einem neuen Stadt- und Wohnquartier entwickelt wird. Die ehemalige Cambrai-Fritsch-Kaserne wurde in den 1930er Jahren gebaut und bestand aus Verwaltungsgebäuden, Wohngebäuden und Werkstätten. Im Zuge der Neuentwicklung wurden diese zum großen Teil abgerissen, einige Wohngebäude gemeinsam mit ihrer Struktur als Denkmalschutz erhalten und derzeit saniert (Ludwigshöhviertel, 2023).



Abbildung 52: alte Gebäudestruktur und neue Flächen für die Wohnbebauung (ebd.)

In insgesamt 1.400 Wohnungen soll im Ludwigshöhviertel Wohnraum für etwa 3.000 Menschen geschaffen werden. Die Planung und Koordination der Quartiersentwicklung wird durch die ortsansässige Bauverein AG übernommen (ebd.).

Durch die Begleitung des Vorhabens gibt es Zugriff auf zahlreiche Daten, Konzepte und Planungsdokumente. Zudem konnten vor dem Abriss Ortsbegehungen durchgeführt werden, um die Gebäudestrukturen zu erfassen.



Abbildung 53 (links): Städtebauliches Strukturkonzept (ebd.)

Abbildung 54 (unten): Ortsbegehung der Kasernengebäude



10.1.2. Landeshauptstadt Wiesbaden

Mit fast 280.000 Einwohnern und einer Fläche von ca. 203,87 km² ist die kreisfreie Stadt Wiesbaden die Landeshauptstadt von Hessen und ist als eines der 10 Oberzentren ebenfalls Teil der Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main. Die Stadt besteht aus 26 Bezirken, liegt am Ufer des Mains und bildet mit der angrenzend reinland-pfälzischen Landeshauptstadt Mainz ein länderübergreifendes Doppelzentrum. Nördlich der Stadt erstreckt sich der Hauptkamm des Mittelgebirges Taunus mit den vorgelagerten Erhebungen Neroberg und Geisberg. Aufgrund von weiteren geographischen Erhöhungen rund um die Stadt, liegt das gesamte Gebiet in einer weiten Talmulde, was eine hohe Anzahl an Fließgewässer und Thermal- bzw. Mineralquellen zur Folge hat (Wiesbaden, 2023d).

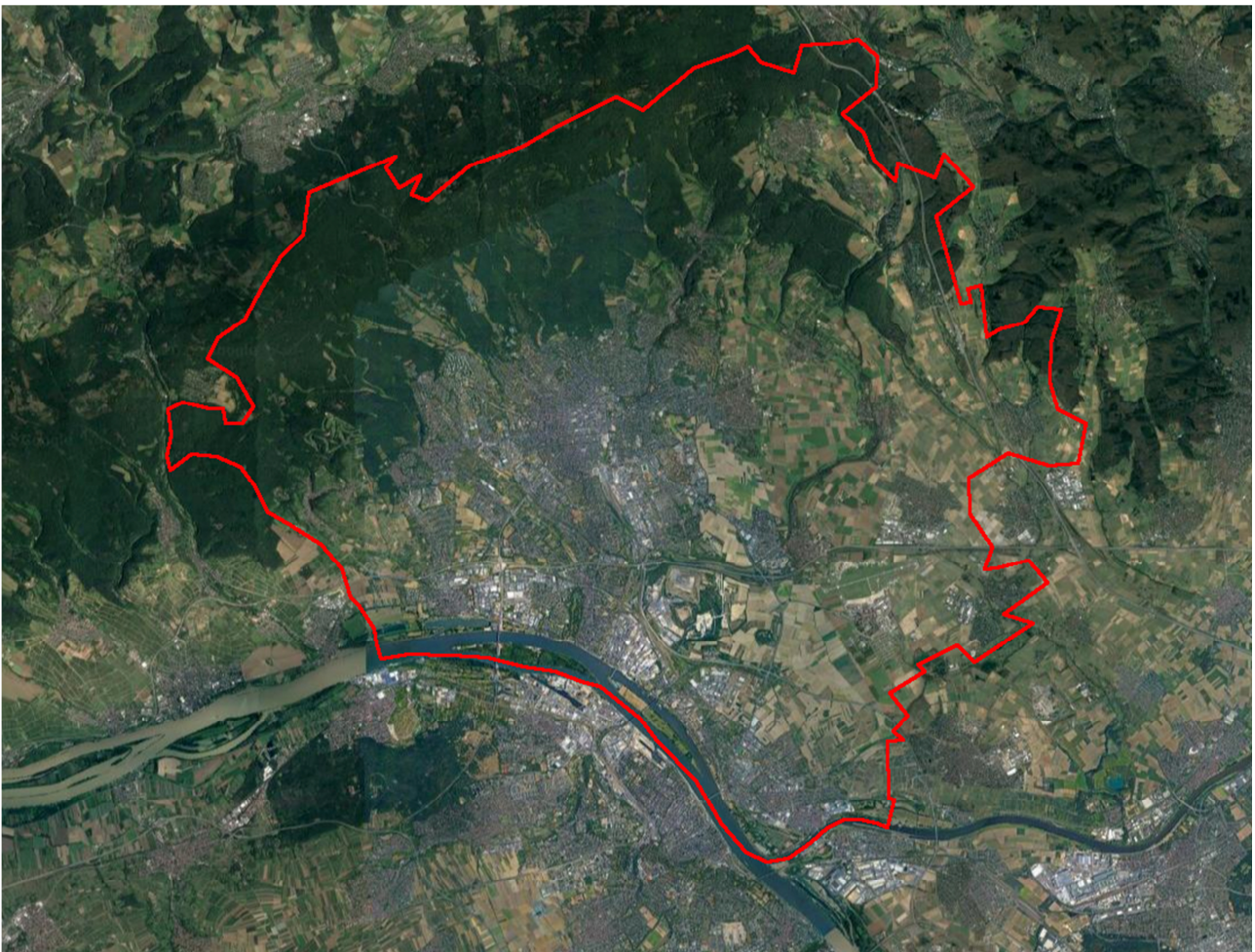


Abbildung 55 Gebiet der Stadt Wiesbaden (Google Earth, 2023).

Die Stadt Wiesbaden entwickelte sich im 19. Jahrhundert aufgrund der zahlreichen thermischen Quellen zu einem internationalen Kurort, welcher beliebter Ruhesitz von Offizieren, höheren Beamten und Rentiers wurde. Dies spiegelte sich im Stadtbild wider, welches geprägt wurde von repräsentativen Wohnhäusern, Hotelpalästen und vornehmen Villen. Durch den ersten Weltkrieg,

die anschließende französische Besatzung und die Weltwirtschaftskrise schwächten die finanzielle Situation der Stadt erheblich, wodurch sie die Bedeutung als „Weltkurstadt“ verlor. Aufgrund der vergleichsweise geringen Zerstörung im zweiten Weltkrieg wurde Wiesbaden zur Landeshauptstadt von Hessen und es siedelten sich neben Behörden zahlreiche Verlage, Versicherungen sowie Betriebe der Filmindustrie in der Stadt an. Als heutige Kur- und Kongressstadt stellt sie einen der beliebtesten Wohnorte der Rhein-Main-Region dar (ebd.).

In Wiesbaden wurden aufgrund der sehr unterschiedlichen Gebäudestrukturen, Gebäudetypen und Gebäudealtersklassen die drei Quartiere Innenstadt-West, Biebrich-Mitte und Gräselberg ausgewählt.

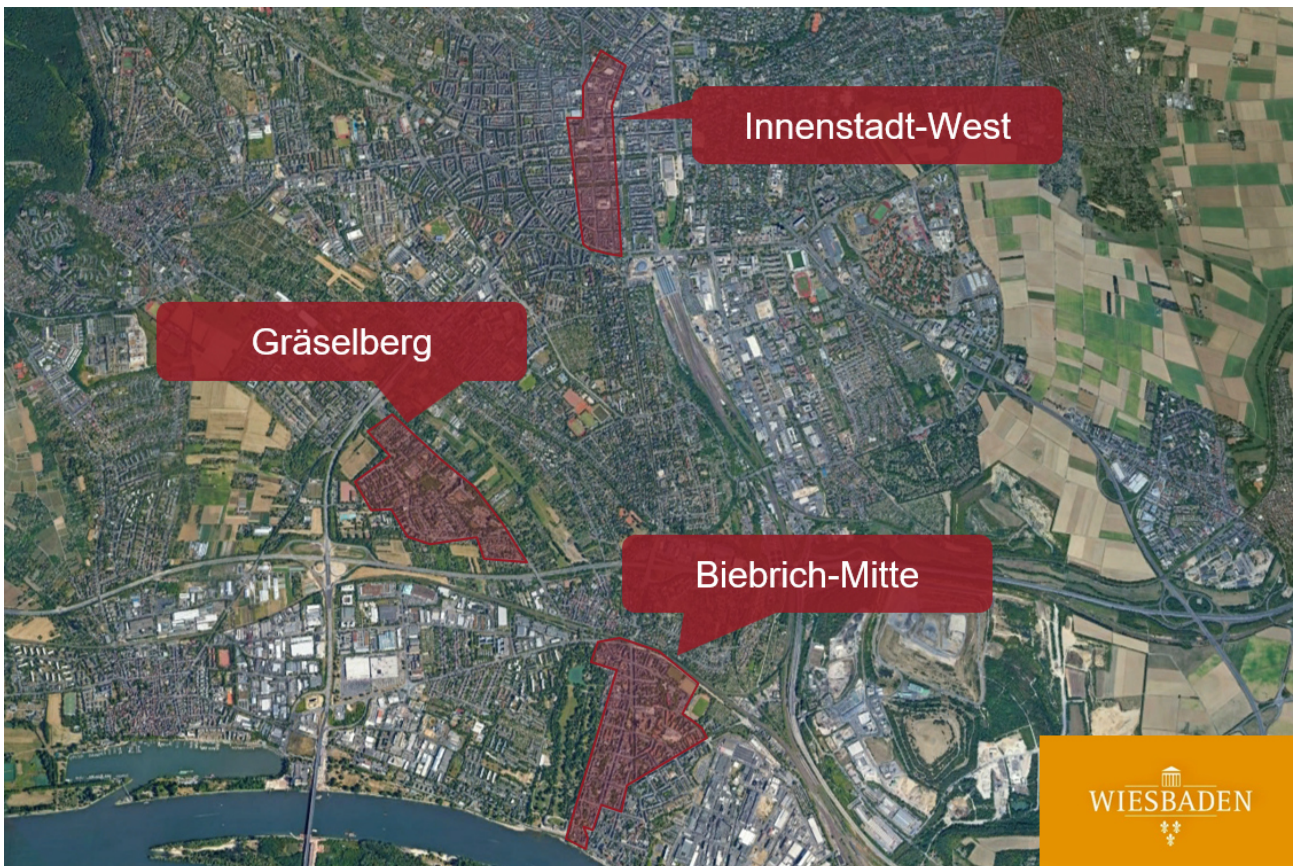


Abbildung 56 Lage der Quartiere (Google Earth, 2023)

Fallstudie Innenstadt-West

Das Plangebiet Innenstadt-West ist Teil der aktuellen städtebaulichen Entwicklung der Landeshauptstadt und wird mit den Programmen „Lebendige Zentren“ und „Sozialer Zusammenhalt Inneres Westend“ gefördert. Da Wiesbaden im 2. Weltkrieg im Vergleich zu anderen Städten nur wenig zerstört wurde, sind noch zahlreiche ältere Gebäude vorzufinden. Das Quartier wird geprägt von Stadtvillen aus der Gründerzeit und funktionalen Bauten aus der Nachkriegszeit (Wiesbaden, 2023a). Die besonderen Charakteristika sind:

- Mischgebiet
- Blockbebauung
- Mehrfamilienhäuser
- Historische Gebäudestruktur



Abbildung 57: Blockrandbebauung (ebd.)

Die Gebäudehöhen variieren zwischen 2 und meist 7 Vollgeschossen, die Fassaden sind verputzt oder mit Ziegel- und Naturstein verblendet.

Für das Gebiet liegen zahlreiche Bebauungspläne, ein Denkmalschutzplan sowie ein integriertes Handlungskonzept vor. Die Bauakteneinsicht gestaltet sich aufgrund des Alters vieler Gebäude problematisch. Bauakten der Gebäude von vor 1945 wurden im Krieg zerstört.



Abbildung 59 (links): Ortsbegehung

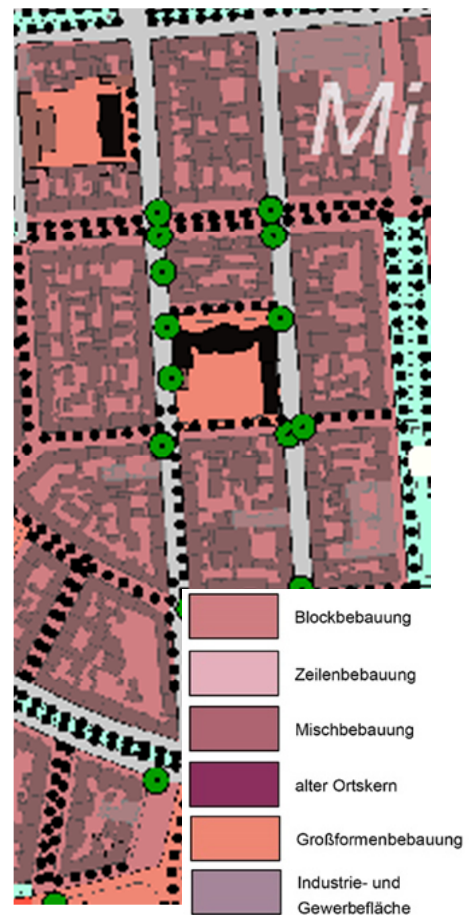


Abbildung 58 (rechts):
Realnutzungskartierung (Wiesbaden,
2023a)

Fallstudie Biebrich-Mitte

Das Quartier Biebrich-Mitte ist seit 2017 Standort des Bund-Länder Programms „Sozialer Zusammenhalt“. Für die Stadterneuerung des Gebiets wurde die Federführung an die lokal ansässige SEG Stadtentwicklungsgesellschaft übertragen. Mit dem aufgestellten und 2020 beschlossenen integrierten städtebaulichen Entwicklungskonzept wird u. a. der Handlungsschwerpunkt auf bauliche Maßnahmen sowie Modernisierung und Sanierung von Gebäuden gelegt (Wiesbaden, 2023b). Die besonderen Charakteristika sind:

- Mischgebiet
- Zeilen- und Blockbebauung
- Mehrfamilienhäuser
- Energetischer Sanierungsbedarf



Abbildung 60: Blockrandbebauung (ebd.)

Die Gebäudehöhen variieren zwischen 3 und 5 Vollgeschossen, die Fassaden sind verputzt oder wie im Innenstadtbereich mit Ziegel- und Naturstein verblendet. Das ca. 58 ha große Gebiet beherbergt etwa 13.000 Einwohner*innen und weist einen hohen Anteil an denkmalgeschützten Gebäuden (vor 1919) auf. Das besonders hohe Energieeinsparpotenzial ergibt sich aus dem größten Gebäudebestand der zwischen 1949 und 1978 errichteten Mehrfamilienhäuser. Alt-Biebrich wurde zum ersten Wiesbadener Klimaschutzquartier ernannt (ebd.).

Für Biebrich-Mitte sind keine Bebauungspläne vorhanden, eine umfassende Bauakten-einsicht ist jedoch möglich.



Abbildungen 61 & 62: Ortsbegehung



Fallstudie Gräselberg

Gräselberg ist eine Großsiedlung, die Ende der 1950er-Jahre zur Bewältigung der Wiesbadener Wohnungsnot errichtet wurde. Sie ist die größte und älteste Satellitenstadt Wiesbadens und wird dem Stadtteil Biebrich zugeordnet (Wiesbaden, 2023c). Besondere Merkmale:

- Allgemeines & reines Wohngebiet
- Einfamilienhäuser, Doppelhaushälften und Hausgruppen
- offene Bebauung im reinen Wohngebiet
- Gruppenbebauung über 50m Länge



Abbildung 63: Baustruktur (ebd.)

Es sind zweigeschossige und auch Gebäude mit 16 Vollgeschossen im Untersuchungsgebiet vorzufinden. Auf den ca. 74 ha befinden sich Mehrfamilienhäuser für etwa 6.200 Menschen. Auch hier liegt sind große Energieeinsparpotenziale zu erwarten, da ein hoher Modernisierungs- und Sanierungsbedarf besteht (ebd.).

Für das Gebiet sind Bebauungspläne vorzufinden und auch Bauakten liegen vor.

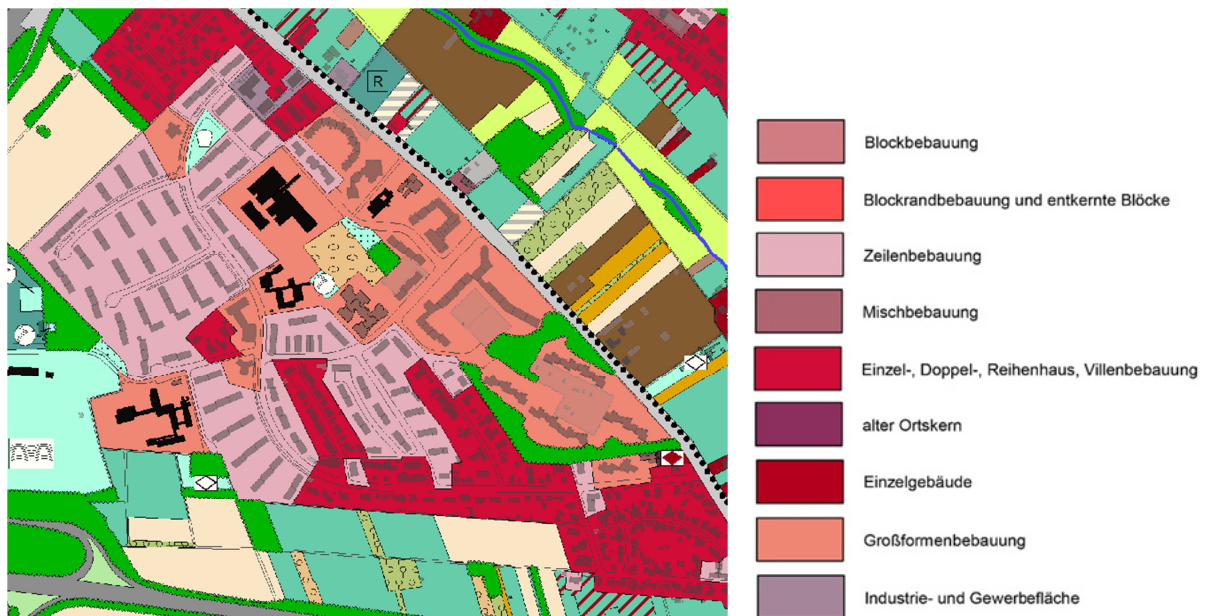


Abbildung 64: Realnutzungskartierung (ebd.)

10.2. Datenerhebung

Um die Materialzusammensetzung der lokalen Gebäude als Quelle zukünftig anfallender Sekundärstoffströme zu bestimmen, wurden zusätzlich zu wissenschaftlichen Quellen zu Abfallströmen und Materialintensität in Gebäude, Unterlagen (z.B. Baubeschreibung, Grundrisse und Ansichten) über selektierte Wohngebäude aus den definierten synthetischen Gebäudekategorien in den Städte Wiesbaden und Darmstadt analysiert. Dabei war ein zusätzliches Ziel Erkenntnisse zu der Verfügbarkeit und Qualität der Informationen zu gewinnen.

10.2.1. Erhobene Daten zu den Gebäuden

Zu diesem Zweck wurden zunächst versucht in jede Stadt eine Handvoll Gebäuderepräsentanten in jeder SG-Kategorie zu identifizieren und deren Bauakten aus den Stadtarchiven zu entnehmen. Dass die Zuordnung im Voraus nicht exakt sein kann, erklärt die nicht gleichmäßige Verteilung den ausgewählten Gebäuden in den verschiedenen SG-Kategorien (s. Tabelle 17).

In Wiesbaden ist bisher keine zusammenfassende Übersicht zu den Baujahren von Gebäude vorhanden. Daher wurden mithilfe von Daten aus Immobilienportalen die Baujahre bestimmter Gebäude identifiziert. Nach einer prototypischen Auswertung von 3 Bauakten in 2019, fand 2020-2022 eine umfangreiche Bauaktenauswertung. Dabei wurden 42 wiesbadener Gebäude aus den Archiven eingesehen und ausgewertet.

In Darmstadt wurde zuerst die ehemalige Cambrai-Fritsch-Kaserne betrachtet. Leider waren kaum Gebäudedaten aus der Zeit der Nutzung durch die US-Armee vorhanden. Deswegen hat der Entwickler verschiedene Gutachten mit gebäude- und materialbezogenen Informationen beauftragt und Ergebnisse dem Projekt zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus fanden Vor-Ort Begehungen statt, zur Erhebung von ergänzenden Daten, u.a. zum Abriss der Gebäude. Um andere Gebäudekategorien und Baualtersklasse zu decken, wurden zusätzlich, ähnlich zu Wiesbaden, 14 geeignete Gebäude in ganz Darmstadt mithilfe von Daten aus Immobilienportalen identifiziert und deren Bauakten aus den Archiven eingesehen und ausgewertet.

Insgesamt wurden also die Bauakten von 57 Wohngebäuden aus den Archiven beider Städte eingesehen und ausgewertet

Tabelle 25 liefert eine Übersicht der ausgewählten Gebäude, deren Bauakten ausgewertet wurden und der synthetischen Kategorien, zu denen sie gehören.

Tabelle 25 Übersicht der ausgewählten Gebäude für die Bauakteneinsicht

	Vor 1948	1949-78	1979-94	1995-2008	2009+
Einfamilienhäuser (EFH)		WI009	WI004	DA011	DA010
		WI013	WI007		
		WI016	WI018a		
		WI018			
		WI024			
		DA012			
Zweifamilien-Reihenhaus (ZFH/RH)		WI002	WI020	DA002	WI035
		WI021	WI032	DA006	WI036
		WI022		DA007	DA001
		WI027		DA009	DA008
		WI033			
		WI037			
Kleines Mehrfamilienhaus (kMFH)	DA003	WI003	WI005	WI006	WI034
		WI008	WI029	WI010	WI041
		WI039		WI023	DA013
		WI040		WI025	
				WI028	
Großes Mehrfamilienhaus (gMFH)	DA_Kaserne	WI001	WI017	WI011	WI019
		WI012	WI030		DA004b
		WI014	WI031		DA005
		WI015	DA004a		
		WI026			

Im Folgenden wird die Erfassung der Informationen aus den Bauakten in einem Bauteilerfassungsbogen ausführlich beschrieben. Erfasst werden Maße und ergänzende Angaben zu Gebäude, zu Gründung und Unterbau, zu Außenwände und vertikalen äußere Baukonstruktionen, zu Außenwandöffnungen, Außenwandbekleidungen, und sonstige Außenelemente (wie Balkone, Vordächer), zu Innenwände und vertikale innere Baukonstruktionen, sowie zu Innenwandöffnungen. Je nach Qualität der Unterlagen können die verwendeten Baustoffe für Wand-, Decken- und teilweise auch für Dach oder Unterbau ermittelt werden. Die Dokumentation der Erfassung erfolgt gemeinsam mit der Beschriftung der Pläne, um den genauen Ursprung der Informationen zu dokumentieren sowie um mögliche spätere ergänzende Analysen und Rückfragen zu vereinfachen.

10.2.2. Eintragungen in den Bauteilerfassungsbogen

„**Allgemeine Angaben**“ zu jedem Gebäude werden direkt aus der Bauakte entnommen. Dabei werden unter anderem die Grundfläche, BGF, Dachform, Dachausrichtung, Dachneigung, Gebäudehöhe und synthetische Gebäudeart erfasst. Zusätzliche Anmerkungen wie besondere Bau- oder Dachform, besondere Nutzung und besonders komplizierter Geschossplan können auch in dieses Abteil erfasst notiert.

Angaben zur „**Gründung & Unterbau**“ werden ebenso direkt aus der Bauakte entnommen. Dabei werden unter anderem die Art, Dicke, Fläche und Material der Gründung erfasst.

Angaben zur „**Außenwänden/Vertikale Baukonstruktionen, außen**“ werden wie folgt erfasst: Verwendete Materialien werden aus den Akten direkt in den Bauteilerfassungsbogen eingetragen. Zusätzliche Informationen werden aus abfotografiert Baupläne entnommen:

- Alle Außenwände werden aufgelistet
- Wände werden pro Himmelsrichtung sowie pro Geschoss eintragen
- Jeder Wand wird eine eigene ID gegeben (große Buchstaben)
- Dicke der Wand wird eintragen (und wenn möglich Material auch)
- Laufende Meter der Wand wird eintragen
- Höhe der Wand wird eintragen (über „Schnitt“ einsehbar)
- Geschoss wird eintragen
- Art und Anzahl der enthaltenen Außenwandöffnungen werden eintragen, mit Hinweis zu der ID der Außenwandöffnungen (z.B. „vorhandene Fenster und Türen: 2x2 / 1x3“ bedeutet „2 Male die Öffnung Nr. 2 + 1 Mal die Öffnung Nr. 3“)
- Himmelsrichtung wird als Kommentar hinzugefügt

Angaben zur „**Außenwandöffnungen**“ werden wie folgt erfasst:

- Alle vorhandenen Fenster und Türen werden eintragen
- Fenster mit gleichen Maßen werden unter derselben ID zusammengefasst
- Die Höhe und Breite wird eintragen
- Die Anzahl der Fenster und Türen eintragen (pro Geschoss)
 - Fenster mit gleicher ID, aber auf unterschiedlichen Stockwerken, werden dann x-mal im Bauteilerfassungsbogen eingetragen.
- Geschoss wird eintragen.
- Teilweise sind geschossübergreifende Fenster vorhanden. In dem Fall weist eine Anmerkung dazu hin, dass die Fensterhöhe die Etagenhöhe überschreitet.

Angaben zur „**Außenwände, sonstiges**“ werden wie folgt erfasst:

- Balkone werden dort eintragen, insofern diese vorhanden.
 - Lfd. m (in Bezug aufs Geländer)
 - Höhe (Geländerhöhe)
 - Tiefe (Balkontiefe)
 - Geschoss eintragen.
- Vordächer werden auch dort eintragen, insofern diese vorhanden.
 - Lfd. m (Umriss)
 - Höhe (Dicke / Stärke des Vordaches)
 - Tiefe
 - Geschoss eintragen (Bezug auf das darunterliegende)
- Ummauerte Kellerfenster werden auch dort eingetragen
 - Lfd. m (Umriss)
 - Tiefe
 - Dicke (Wandstärke)
 - Höhe der Wände

Angaben zur „**Innenwänden /Vertikale Baukonstruktionen, innen**“ werden wie folgt erfasst:

Verwendete Materialien werden aus den Akten direkt in den Bauteilerfassungsbogen eingetragen.

Zusätzliche Informationen werden aus abfotografiert Baupläne entnommen:

- Alle Innenwände werden aufgelistet
- Wände je pro Geschoss werden eintragen
- Jeder Wand wird eine eigene ID gegeben (Zahlenfolge)
 - Wände mit gleichen Maßen sowie Öffnungen, können unter der gleichen ID abgelegt werden
- Dicke der Wand wird eintragen (und wenn möglich Material auch)
- Laufende Meter der Wand wird eintragen
- Höhe der Wand wird eintragen (über „Schnitt“ einsehbar)
- Anzahl der Wände wird eintragen (Wände die identisch sind, können so zusammengefasst werden)
- Geschoss wird eintragen (Bei mehreren Wänden pro Geschoss, wird darauf geachtet, die Geschosse zu übertragen)
- Art und Anzahl der enthaltenen Innenwandöffnungen werden eintragen, mit Hinweis zu der ID der Innenwandöffnungen (z.B. „vorhandene Türen: 2xA / 1xB“ bedeutet „2 Male die Öffnung Nr. A + 1 Mal die Öffnung Nr. B“)

Angaben zur „**Innenwandöffnungen**“ werden wie folgt erfasst:

- Alle vorhandenen Türen werden eintragen
- Türen mit gleichen Maßen werden unter derselben ID zusammengefasst (Buchstaben)
- Die Höhe und Breite wird eintragen
- Die Anzahl der Türen eintragen (pro Geschoss)
 - Türen mit gleicher ID, aber auf unterschiedlichen Stockwerken, werden dann x-mal im Bauteilerfassungsbogen eingetragen.
- Geschoss wird eintragen.
- Bei fehlenden Maßangaben wird auf gängige Annahmen zurückgegriffen

Unsicherheiten in den Daten werden in der Tabelle mittels eines Farbcodes dargestellt:

- Blau: berechnet
- Gelb: geschätzt
- Orange: unbekannt

Exkurs: Regulär getroffene Annahmen

Türmaße (wenn nicht weiter spezifiziert)

- Kellermaße:
 - Höhe 1,90m
 - Breite 1,01m 0,885m 0,76m 0,63m
- Normalstockwerk
 - Höhe 2,01m
 - Breite 1,26m 1,01m 0,885m 0,76m 0,63m

Balkone (wenn nicht weiter spezifiziert)

- Geländermaße
 - Höhe 0,9m
 - Dicke 0,08m
- ➔ Bei Abweichungen der Schnitte, Ansichten und der Grundrisse sind die Angaben ungeachtet der Unstimmigkeiten aus dem Grundriss zu entnehmen

10.2.3. Beschriftungen der Pläne

Wie schon erwähnt, erfolgen die Beschriftungen der Pläne gemeinsam mit der Dokumentation der Erfassung, um den genauen Ursprung der Informationen zu dokumentieren sowie um mögliche spätere ergänzende Analysen und Rückfragen zu vereinfachen. Alle Grundrisse und Ansichten

basierend auf den oben ausgeführten Bauteilen werden mit den gelisteten Bauteilen beschriftet. Zu jedem Bild wird eine Legende hinzugefügt (Tabelle 26).

Tabelle 26: Übersicht der Beschriftung der Gebäudepläne im Prozess Bauakteneinsicht

Bauteil	Angaben zur Beschriftung
Außenwände	<ul style="list-style-type: none"> • Ansicht und Grundrisse • Linie ziehen • Horizontale Wände werden durchgezogen • Große Buchstaben • Farbe lila
Außenwandöffnungen	<ul style="list-style-type: none"> • Jeweilige Fenster und Türen in den Plänen kenntlich machen • Ansicht und Grundrisse • Farbe blau • Arabische Zahlen
Außenwände, Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> • Ansicht und Grundrisse • Bauelement gesamt markieren (Umriss) • ID vergeben <ul style="list-style-type: none"> ○ Standard ID für Außenwände mit vorangestelltem B... i.e: Das erste, benannte Element würde BA genannt, dann BB, ...
Innenwände	<ul style="list-style-type: none"> • Jeweilige Innenwand in den Plänen kenntlich machen <ul style="list-style-type: none"> ○ Grundrisse ○ Farbe rot • Arabische Zahlen
Innenwandöffnungen	<ul style="list-style-type: none"> • Jeweilige Türen in den Plänen kenntlich machen <ul style="list-style-type: none"> ○ Grundrisse • Buchstaben

10.2.4. Übersicht der Baustrukturcharakteristika

Aufbauend auf den einzelnen Bauteilerfassungsbogen, wird eine Übersicht der Baumassen aller erfassten Gebäude erstellt. Diese Übersicht enthält für jedes Gebäude:

- Bautyp: aus Bauakte
- BAK: aus Bauakte
- Anmerkung: besondere Bau- oder Dachform, besondere Nutzung, besonders komplizierter Geschossplan etc.
- Bodenfläche pro Stockwerk: jedes Stockwerk einzeln + Summe von allen Stockwerken
- Die Daten, die in der Tabelle 27 gelistet sind

Tabelle 27 Übersicht der erfassten geometrische Informationen zu den Gebäuden

Bauteil	Einheit	Berechnung
Wohnfläche	m ²	Innenmaße der Räume (reine Wohnfläche ohne Treppen, ohne Gemeinschaftsflur, ohne Gemeinschaftskeller)
gesamte Fläche	m ²	Außenmaße x Geschossanzahl
BRI	m ³	Grundfläche (Außenmaße in m ²) x Höhe (m) (mit Dach)
Volumen oberirdisch mit Dach	m ³	BRI oberirdisch, wenn ober- und unterirdisch dann der tiefste Punkt
Volumen oberirdisch ohne Dach	m ³	Rechnung analog zu BRI ohne unterirdische Geschosse und ohne Dachgeschoss
Fläche Außenwände	m ²	Summe der Außenwandflächen (→siehe Bauakte)
Fläche Außenwandöffnungen	m ²	Höhe x breite x Anzahl
Lfd. m Innenwände	m	Summe der lfd. Metern in der Bauakte
Fläche Innenwände	m ²	Summe der Innenwandflächen (→siehe Bauakte)
Fläche Innenwandöffnungen	m ²	Höhe x breite x Anzahl

Daraus werden die Verhältnisse der Öffnungen zu den Wandflächen sowie der Innenwandflächen zu anderen Angaben des Gebäudes, wie Außenwandfläche, Wohnfläche oder BRI automatisiert berechnet.

10.2.5. Erkenntnisse aus der Analyse der Bauakten

Die Erhebung und Analyse der Bauakten ermöglichte zuerst wichtige Erkenntnisse zu der Verfügbarkeit und Qualität der Informationen:

- die Städte verfügen bisher über keine Übersicht zu den gebäuderelevanten Informationen für alle Gebäude in ihrem Gebiet, wie Baujahren der Gebäude;
- Wenn die Städte über Daten zu den Gebäuden verfügen, z. B. über Baupläne, sind diese Daten oft unvollständig und die Datenqualität der verfügbaren Dokumente ist sehr unterschiedlich;
- für das Einsehen der Unterlagen zu jedem einzelnen Gebäude ist ein aufwändiger Prozess notwendig.

Zudem konnte die Auswertung der Bauakten folgende Erkenntnisse liefern:

- die Maßeingaben aus den Bauplänen sind nicht immer vollständig, widersprechen sich

manchmal sogar zwischen verschiedenen Ansichten oder sind in älteren Bauplänen schwer zu entziffern, was zu einer gewissen Unsicherheit bezüglich der Genauigkeit der erfassten Maße führt. Insofern stimmen wir mit der Aussage von Kleemann überein, dass eine Bewertung der Materialmenge nur mit einer Sicherheit von +/- 15% erfolgen kann³;

- Das Flächenverhältnis Außenwandöffnungen/Außenwände beträgt im Durchschnitt 17 % (mit Ausreißer bis zu - 10% und + 20%). Das heißt, für jede 100 m² Außenwandfläche eines Gebäudes, kann abgeschätzt werden, dass ungefähr 17 m² Außenwandfläche abzuziehen sind (Minimum 7 m² und Maximum 26 m²), mit Rückschlüsse zu der dazugehörigen Materialintensität.
- Das Verhältnis Innenwandlänge/Bruttogrundfläche beträgt im Durchschnitt 32 m/m² (s. Abbildung 65), mit Ausreißer bis zu ca. +/- 12 %. Dies bedeutet, dass für jede 100 m² (horizontale) Wohnfläche eines Gebäudes, kann man abschätzen, dass das Gebäude dann ungefähr 32 m lineare Innenwandlänger enthält (Minimum 22 m/m² und Maximum 45 M/m²), mit Rückschlüsse zu der dazugehörigen Materialintensität.

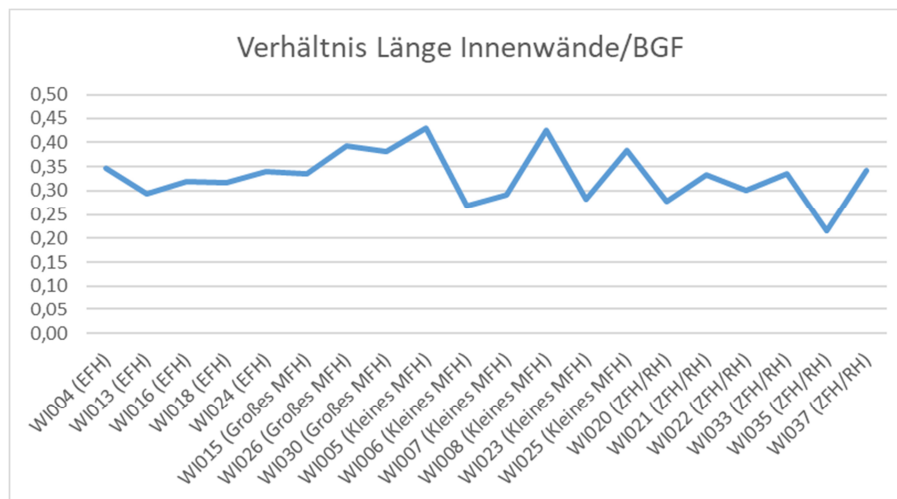


Abbildung 65 Verhältnis der Innenwandlänge/Bruttogrundfläche für die Gebäude, für die dieses Verhältnis sich auswerten ließ

- Das Verhältnis Innenwandfläche/Bruttorauminhalt beträgt im Durchschnitt 27 m²/m³ (s. Abbildung 66), mit Ausreißer bis zu +/- 10 %. Dies bedeutet, dass für jede 100 m³ (dreidimensionales) Raumvolumen eines Gebäudes, kann man abschätzen, dass das Gebäude dann ungefähr 27 m² (vertikale) Innenwandfläche enthält (Minimum 18 m² und Maximum 38 m²), mit Rückschlüsse zu der dazugehörigen Materialintensität.

³ „Für die Abschätzung der Gesamtmenge an Abfällen wird eine Unsicherheit von unter 15% angenommen.“ (Kleemann et al., 2018, p. 145)

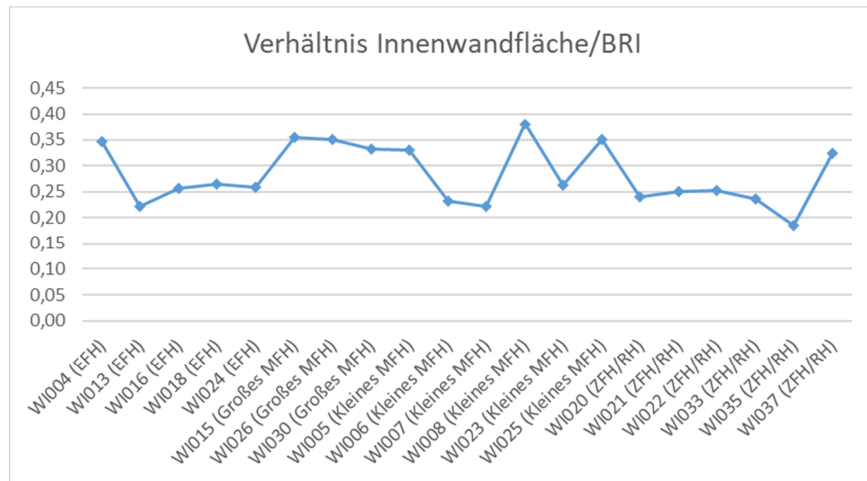


Abbildung 66 Verhältnis der Innenwandfläche/Bruttorauminhalt für die Gebäude, für die dieses Verhältnis sich auswerten ließ

- Das Verhältnis Öffnungen/Außenwandfläche beträgt im Durchschnitt 17 % (s. Abbildung 67), mit Ausreißer bis zu - 10 % und + 20 %. Dies bedeutet, dass für jede 100 m² Fläche Außenwände eines Gebäudes, kann man abschätzen, dass davon ungefähr 17 m² abzuziehen sind, da sie Öffnungen (Fenster und Türen) enthalten (Minimum 8 % und Maximum 36 %), mit Rückschlüsse zu der Anpassung der dazugehörigen Materialintensität.

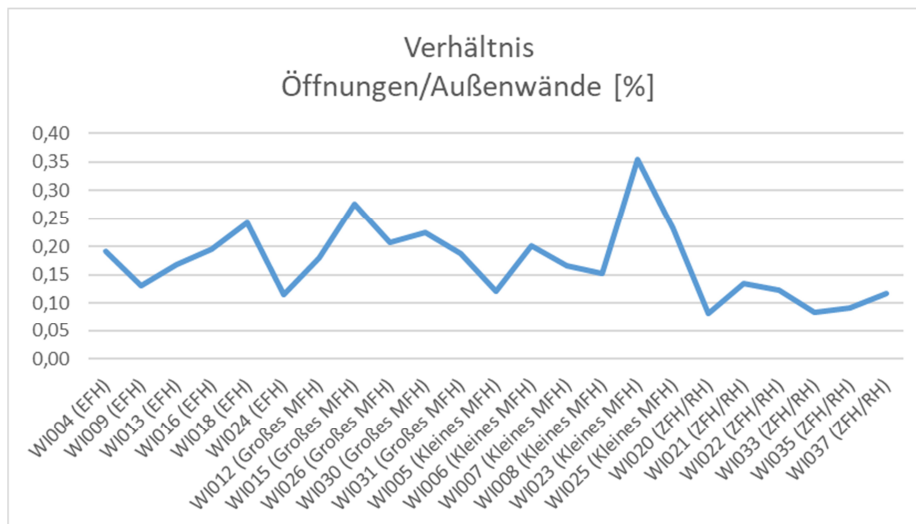


Abbildung 67 Verhältnis der Fläche der Öffnungen pro Außenwandfläche für die Gebäude, wo dieses Verhältnis sich auswerten ließ

- Das Verhältnis Öffnungen/Innenwandfläche beträgt im Durchschnitt 12 % (s. Abbildung 68), mit Ausreißer bis zu - 4 % und + 10 %. Dies bedeutet, dass für jede 100 m² Fläche Innenwände eines Gebäudes, kann man dann abschätzen, dass davon ungefähr 12 m²

abzuziehen sind, da sie Öffnungen (vor allem Türen) enthalten (Minimum 8 % und Maximum 21 %), mit Rückschlüsse zu der Anpassung der dazugehörigen Materialintensität.

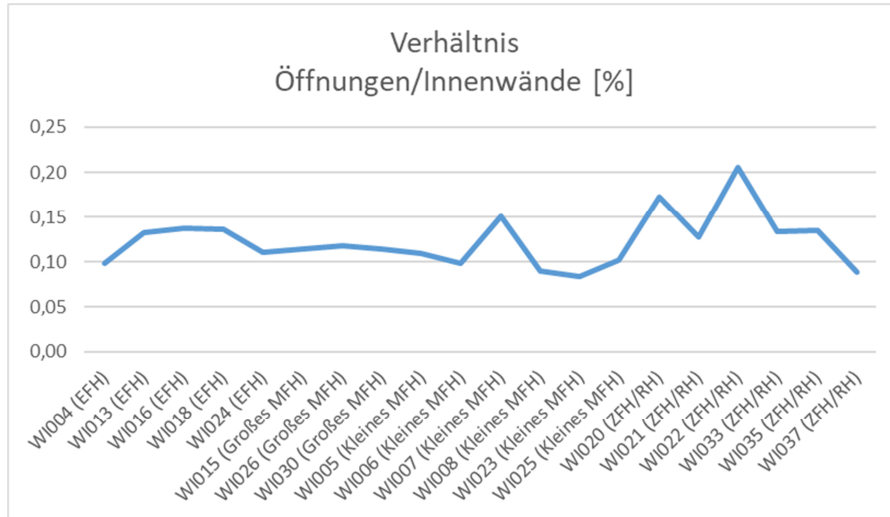


Abbildung 68 Verhältnis der Fläche der Öffnungen pro Innenwandfläche für die Gebäude, für die dieses Verhältnis sich auswerten ließ

11. Integration in quartiersbezogene Planungsprozesse

Das Kapitel „Integration in quartiersbezogene Planungsprozesse“ zeigt den aktuellen Stand in den beiden Fallstudien, Handlungsmöglichkeiten und Limitierungen auf und gibt einen Ausblick auf notwendige Entwicklungen, um ressourceneffizientes Handeln in der kommunalen Praxis zu etablieren.

Zunächst wird das methodische Vorgehen erläutert, um anschließend mit der Prozess- und Bedarfsanalyse den aktuellen Umgang mit der Thematik in den Kommunen zu erfassen und eine Ausrichtung für die zu entwickelnden Tools im Projekt RessStadtQuartier zu geben. Der Leitfaden führt die wichtigsten Aspekte zusammen, beleuchtet aber auch die einzelnen Themen in der Tiefe. Mit dem Ausblick wird schließlich die Integration in quartiersbezogene Planungsprozesse diskutiert.

11.1. Methodisches Vorgehen

Im Jahr 2021 wurden die Klimaschutzziele verschärft und die Bundesrepublik hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2045 klimaneutral zu sein (Bundesregierung, 2022). Damit stehen die Kommunen aber auch unter Druck, mithilfe verschiedener städtebaulicher Instrumente der Zielsetzung nachzukommen.

Mit dem Projekt RessStadtQuartier wird der Fokus auf den Gebäudesektor bzw. auf ressourceneffiziente Quartiere gelegt. Hierbei steht jedoch nicht nur die Energieeffizienz, sondern vielmehr die Konsistenz des Handelns im Fokus. Im Sinne des "Urban Mining" legt das Projekt den Schwerpunkt auf Bestandsquartiere im Wohnbaubereich, um zum einen Sanierungspotenziale und Energieeinsparmöglichkeiten aufzuzeigen und zum anderen ein Management freiwerdender Stoffströme bei Abbruch und Rückbautätigkeiten zu ermöglichen. Dadurch soll der Eintrag neuer Baustoffe vermindert und das Recycling von Baustoffen deutlich erhöht werden.

Um den aktuellen Forschungsstand zu erfassen, bisheriges Handeln der Kommunen offenzulegen und auch rechtliche Grenzen zu identifizieren, wurden im Arbeitspaket 6 neben einer Literatur- und Dokumentenanalyse Experteninterviews durchgeführt.

11.1.1. Literatur und Dokumentenanalyse

Im Rahmen der Literaturanalyse wurden wissenschaftliche Artikel, Berichte und Projekte untersucht, um neben dem technischen Stand der Forschung für konsistentes Handeln auch die planungsrechtlichen Möglichkeiten der Kommunen zu beleuchten.

Die Dokumentenanalyse umfasste die Sichtung von Plänen der Bauleitplanung, kommunalen Satzungen und anderen Beschlüssen sowie Konzepten der beiden Fallstudien Wiesbaden und Darmstadt. Hierdurch konnten Erkenntnisse über soziales Handeln gewonnen werden, indem die sozialen Prozesse und Strukturen rekonstruiert wurden (Salheiser, 2014; Bick & Müller, 1984). Auch die Interaktion von Akteuren, ihr Meinungsbild zur Thematik der Baustoffverwertung und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten wurden dargestellt (Best, 1977).

11.1.2. Experteninterviews

Mithilfe der Experteninterviews sollten sowohl objektive Fakten wie auch subjektive Einstellungen und Bewertungen erfasst werden (Schnell et. al. 2008). Das methodische Vorgehen der Experteninterviews teilt sich in eine Vorbereitungs-, Durchführungs- und Analysephase. Die folgende Abbildung 69 stellt die insgesamt drei Phasen dar und zeigt die Einzelschritte auf.

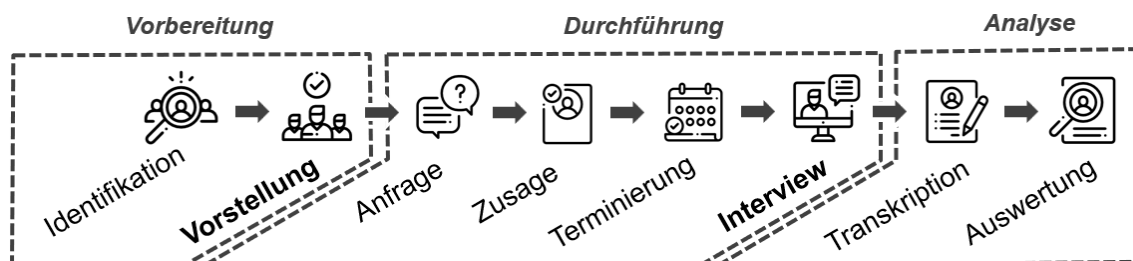


Abbildung 69: Schritte der Interviewdurchführung

Da im Verlauf der Bearbeitung und durch Empfehlungen von Expert*innen weitere Interviews hinzugekommen sind, handelt es sich nicht um einen statischen Ablauf, sondern einen dynamischen Bearbeitungsprozess. Bis zum Ende der ersten Projektphase wurden 23 Expert*innen zu unterschiedlichen Schwerpunkten befragt.

Vorbereitung

Im Rahmen der Literaturrecherche und im Austausch mit der Wissenschaftsstadt Darmstadt und der Landeshauptstadt Wiesbaden wurden zunächst wichtige Stakeholder identifiziert und hinsichtlich ihres Handlungsbereichs kategorisiert. Um speziell die Bedarfe zu erfassen, standen zunächst kommunale Ämter mit Berührungspunkten zum Städtebau und dem Gebäudesektor im Mittelpunkt der Untersuchung. Neben Mitarbeiter*innen aus dem Bereich Umwelt haben u.a. auch die Stadtplanung, die Vermessung und die kommunale Entsorgung von Abbruchmaterialien zahlreiche Schnittstellen mit der Thematik. Um eine Analyse über den Prozess zu ermöglichen, wurden anschließend Abbruchunternehmen hinzugezogen und auch Verbände aus dem Abbruch, Baugewerbe und Baustoffhandel angeschrieben. Limitierungen, die bei der Literaturanalyse für die rechtlichen Handlungsmöglichkeiten aufgekommen sind, sollten durch ein Interview im Bereich Bau- und Immobilienrecht genauer ausgeführt werden. Alle Interviewpartner wurden in einer Excel-Tabelle gegliedert nach Organisation, Abteilung und Tätigkeit sowie mit Kontaktdaten gelistet.

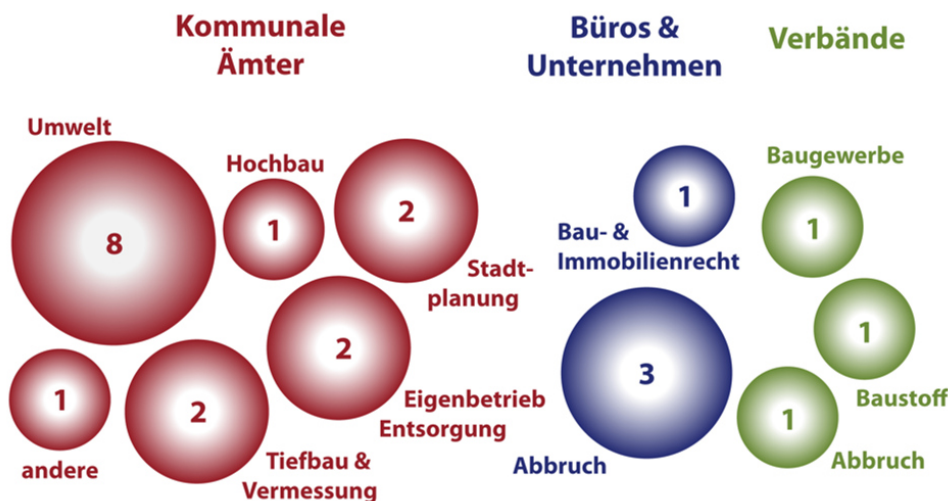


Abbildung 70 Expert*innencluster

Bevor die Interviews durchgeführt wurden, gab es in den Kommunen mit allen potenziellen kommunalen Expert*innen eine Projektvorstellung. Hierbei wurden die jeweiligen Schwerpunkte der Projektpartner präsentiert und den kommunalen Mitarbeiter*innen wurden Anknüpfungspunkte an die jeweilige Tätigkeit aufgezeigt. Durch die kritische Diskussion konnten weitere Expert*innen identifiziert und erste Bedarfe festgehalten werden.

Durchführung

Nach der Vorstellung in den Kommunen wurden, an die für das Projekt inhaltlich passenden Ämter Einladungen zu den Experteninterviews versendet. Nach der Zusage erfolgten die Terminierung und Festlegung des Formats. Die Expert*innen konnten zwischen einem persönlichen Interview in ihrem Amt, einer digitalen Durchführung per Zoom oder einem Telefonat auswählen. Ein Teil der Interviews wurde vor Ort, der große Teil jedoch online mit Zoom durchgeführt. Die Organisation der Termine und der Status der Rückmeldung wurden ebenfalls in der Excel-Tabelle erfasst.

Für die Interviews wurde ein modularer Fragenkatalog entwickelt, der unterschiedliche Themenbereiche abdeckt und abhängig von den Interviewpartnern zusammengestellt werden kann. Die in Tabelle 28 dargestellten Modulbausteine wurden konzipiert.

Tabelle 28 Modulare Bausteine der Interviews

1	Bauleitplanung	5	Building Information Modeling	9	Abbruch
2	Umweltbericht	6	Landschaftsplan & Biotoptypenkartierung	10	Abfallströme
3	Integriertes Klimaschutzkonzept	7	Entsorgungskonzept	11	Öffentlichkeitsarbeit
4	Geoinformationssysteme	8	Sekundärbaustoffe		

Die jeweilige Zusammenstellung an Modulen wurde zu einem Leitfaden zusammengeführt und hinsichtlich der Hintergründe des bzw. der jeweiligen Expert*in modifiziert. Zusätzlich wurden in jedem Leitfaden Einstiegsfragen zu den allgemeinen Aufgaben zu Beginn und Abschlussfragen zur potenziellen Entwicklung in der Zukunft am Ende gestellt. Der Leitfaden wurde als Vorbereitung vorab den Expert*innen per E-Mail zugestellt.

Die Interviewdurchführung dauerte in der Regel zwischen 45 und 90 Minuten. Der Leitfaden diente lediglich zur Orientierung, d.h. die Fragen wurden nicht wörtlich oder systematisch durchgearbeitet. Vielmehr konnte mithilfe des halbstrukturierten Interviews ein interaktives Gespräch geführt werden, bei dem bestimmte Themen auf Nachfragen vertieft behandelt wurden. Die offenen Fragen verhalfen zudem den Expert*innen frei und ohne jegliche Vorgabe Ausführungen vorzunehmen und damit Erkenntnisse aus der Praxis bzw. eigenen Tätigkeit verständlich und nachvollziehbar vorzustellen. Wäre der Gesprächsverlauf zu sehr von den Fragestellungen abgewichen, so wäre ein Eingriff notwendig gewesen. Dies war jedoch in keinem der Interviews der Fall.

Analyse

Alle Gespräche wurden mittels eines Diktiergeräts oder der Zoom-Aufnahme aufgezeichnet und anschließend händisch transkribiert. Eine Genehmigung hierfür wurde mit einer Datenschutzerklärung bei den jeweiligen Personen eingeholt.

Die Transkripte wurden zusammen mit Literatur und Dokumenten in das Programm MAXQDA eingepflegt und eine Codeliste zum systematischen Auswerten wurde angelegt. Dadurch konnten die einzelnen Themen einfacher zusammengetragen und Sachverhalte schneller gegenübergestellt werden.

11.2. Prozess- und Bedarfsanalyse

Das Thema der Ressourceneffizienz hat im Kontext der Baustoffverwertung bisher noch keinen Einzug in kommunale Tätigkeiten und Beschlüsse gefunden (Umweltamt Wiesbaden, 2020a; Umweltamt Darmstadt, 2020). Vielmehr lag der bisherige Fokus der Stadtentwicklung auf der Energieeffizienz, die insbesondere im Bestand erhöht werden soll. Der Betrachtungsrahmen, beispielsweise in Wiesbaden in Bezug auf Energiemanagement, liegt weiterhin vorwiegend auf einzelnen Gebäuden, nicht jedoch auf der Quartiersebene (Umweltamt Darmstadt, 2020; Hochbauamt Wiesbaden, 2020).

11.2.1. Kommunale Abläufe

Das Thema der Ressourcenschonung fließt bereits in die Tätigkeiten des Stadtplanungsamtes ein. Als Verwaltungseinheit führt das Stadtplanungsamt die Beschlüsse der Stadtverordnetenversammlung aus, kann aber auch Vorschläge für eine beispielsweise ressourcenschonende Umsetzung vorlegen (Stadtplanungsamt Darmstadt, 2020).

Dennoch zeigt sich, dass andere Zielsetzungen überwiegen. Der schnellen Schaffung von Wohnraum und damit der Sicherung der Daseinsvorsorge wird demnach besonderes Gewicht in Darmstadt zugeordnet. Die ist allerdings auch damit zu begründen, dass Fördermittel für sozialen Wohnungsbau an zeitliche Fristen gebunden sind und eine ökologische Realisierung, die zu Verzögerungen führen könnte, ein finanzielles Risiko für die Stadt darstellt. Daher sind auf Landesebene die Rahmenbedingungen für Fördermittel so anzupassen, dass sozialer Wohnungsbau vor allem unter ökologischen Gesichtspunkten gefördert werden sollte, ohne jedoch die Planungssicherheit bezüglich der Haushalte von Land und Bund zu gefährden (ebd.).

Datenverarbeitung und Datenbereitstellung

Der Zugang zu möglichst aktuellen und realitätsnahen Daten ist essenziell für die quantitative Analyse der Gebäudebestände sowie die qualitative Einordnung möglicher Bedarfe. Auch wenn Gebäudedaten zum Gebäudealter vorliegen, so fehlen beispielsweise Informationen über bereits

vorgenommene Sanierungen, die das Bild des eigentlichen Energieverbrauchs verzerren (Umweltamt Wiesbaden, 2020a). Während bodenbezogene Daten in der Regel vorliegen, sind Daten zu Siedlungsbereichen sehr lückenhaft (Umweltamt Wiesbaden, 2020b).

Die Geodaten sind in Darmstadt beim Vermessungsamt verordnet. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass nicht alle Daten weitergegeben werden dürfen (beispielsweise die Katasterdaten vom Land Hessen) und Zugriffe beschränkt sind. Anders verhält es sich nur bei Daten, die die Stadt selbst erhoben hat. Für ein eigenes Gebäudekataster fehlen in der Wissenschaftsstadt Mittel und Ressourcen (Vermessungsamt Darmstadt, 2020). Für die dezernatsübergreifende Zusammenarbeit wäre ein Datenzugriff aller an Bauvorhaben beteiligter Ämter auf ein solches Kataster gewinnbringend.

In Wiesbaden liegen viele Daten bei den Ämtern vor, das Bauaufsichtsamt hat jedoch noch viele nicht-digitalisierte Daten in Papierform (Tiefbau- und Vermessungsamt Wiesbaden, 2020). Bei den Darmstädter Ämtern werden aktuell noch viele verschiedene Systeme genutzt, eine Abstimmung erfolgt zumindest zunehmend. In der Vergangenheit wurden allerdings Daten parallel erhoben, da keine Absprache erfolgte. Ein einheitliches System und eine abgestimmte Strategie sollten in Zukunft umgesetzt werden (Amt für interne Dienste Darmstadt, 2020).

Das Umweltamt der Wissenschaftsstadt führt gebäudebezogene Daten zusammen, um diese für die CO₂-Bilanzierung durch externe Büros zur Verfügung zu stellen. Neben statistischen Daten zu Einwohnerzahlen sind es insbesondere Informationen über die Energieverbräuche sowie die Infrastrukturen Strom, Wärme und Erdgas (Umweltamt Darmstadt, 2020). Auch dem Wiesbadener Umweltamt liegen viele, eigens erarbeitete Daten in sehr guter Qualität vor (Umweltamt Wiesbaden, 2020a).

Insgesamt kann festgehalten werden, dass eine umfangreiche Datenbasis und mit Tools generierte Informationen in Form von Karten, Statistiken und Texten ein gutes Potenzial bieten, um darauf aufbauend Entscheidungen über Förderung für Stadtentwicklungskonzepte zu treffen (Umweltamt Wiesbaden, 2020b; Umweltamt Wiesbaden, 2020c). Zum einen sollte beim Einsatz von Tools eine einfache Oberfläche und Handhabbarkeit gegeben sein, zum anderen sollte aber auch die Möglichkeit bestehen, einzelne Einstellung eigenständig anpassen und damit Abhängigkeiten und deren Auswirkungen identifizieren zu können (Umweltamt Wiesbaden, 2020c). Länder und Kommunen nutzen bereits Geoportale, um Bürger*innen georeferenzierte Informationen zur Verfügung zu stellen. So werden beispielsweise bereits Flächen, die sich besonders für die Installation von Photovoltaikanlagen eignen, in online abrufbaren Karten angezeigt. Ob gebäudebezogene Daten, wie die Baumasse und Geschosszahl veröffentlicht werden dürfen, muss datenschutzrechtlich geprüft werden (Vermessungsamt Darmstadt, 2020).

Klimaschutzkonzepte und Masterpläne

Viele deutsche Kommunen haben Klimaschutzkonzepte und Masterpläne entwickelt, in denen nach Sektoren gegliedert Maßnahmen zur Einsparung von CO₂ aufgeführt werden. Oft scheitert es jedoch an der Umsetzung von Maßnahmen, einem stetigen Monitoring und regelmäßigen Anpassungen an neue Rahmenbedingungen (Stadtplanungsamt Darmstadt, 2020). In der Folge werden nicht nur Maßnahmen nicht umgesetzt, vielmehr werden auch sektorenbezogene und sektorübergreifende Zielsetzungen zur CO₂-Reduktion verfehlt.

In Darmstadt fehlten so beispielsweise eine Priorisierung und Vergleichbarkeit der Maßnahmen, was die Umsetzbarkeit erschwerte (ebd.). Zudem wurden in der Vergangenheit lediglich die Bundesziele im Klimaschutz heruntergebrochen und übernommen, statt stadteigene Ziele zu formulieren. Im Zuge einer Neuaufstellung sollen nun die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens einbezogen und direkte Einflussmöglichkeiten des Magistrats berücksichtigt werden, um für die Wissenschaftsstadt bis 2035 die Klimaneutralität (netto Null CO₂-Emissionen) zu erreichen. Auch ein entsprechendes Monitoringkonzept (mindestens 2-jährig) soll hinterlegt werden und der Klimaschutzbeirat, der als Kontrollgremium agiert, wird für ein stetiges Controlling neu aufgestellt (Umweltamt Darmstadt, 2020).

Auch Wiesbaden steht vor der Herausforderung, unverbindlichen und weichen Maßnahmen aus dem Klimaschutzkonzept Priorität beizumessen und umzusetzen. Das informelle Konzept müsste hier aktuelleren Gegebenheiten angepasst werden, aufgrund der formell fehlenden Dringlichkeit blieb dies bisher aus (Umweltamt Wiesbaden, 2020d).

Umgang mit Konsistenz in Sanierungsgebieten

Die Festsetzung energetischer Standards und damit lediglich die Betrachtung der Betriebsphase des Gebäudes kann dazu führen, dass zum Erreichen der Standards verklebte Baustoffe verwendet werden. Dies führt jedoch dazu, dass bei einem späteren Rückbau die Baustoffe nur unter erheblichem Energieaufwand wieder getrennt werden können (Stadtplanungsamt Darmstadt, 2020). Die Festlegung von Quoten für das Baustoffrecycling sehen Expert*innen jedoch kritisch (Umweltamt Wiesbaden, 2020a).

Eine Lebenszyklusanalyse, die die Bauphase, den Betrieb und den späteren Rückbau in die CO₂-Bilanzierung einbezieht, müsste mit einem Bauantrag eingefordert werden. Ein Quartiersansatz, der die größten Potenziale zur Stadterneuerung aufzeigt und zugleich eine Sanierungsstrategie liefert, würde einen hohen Mehrwert bieten. In RessStadtQuartier entwickelte Tools könnten dabei helfen Quartiere zu priorisieren und einen Fahrplan für das Vorgehen in der Stadtentwicklung zu empfehlen (Umweltamt Darmstadt, 2020).

Die Fallstudie "Ludwigshöhviertel" der Stadt Darmstadt zeigt, dass eine ressourcenschonende Umsetzung oft schwierig ist. Im Interesse von Investoren steht selten der Erhalt bestehender Gebäude (hier alte Kasernen) aufgrund von ökologischen Gründen. Vielmehr sind zeitgemäße Grundrisse, eine Statik, die eine mögliche Aufstockung zulässt, und die Schaffung zusätzlicher Wohnflächen im Fokus der Investoren. Vor allem bei Vorhaben dieser Größenordnung spielen zahlreiche Faktoren eine Rolle, so dass aktuell rechtlich nicht gesicherte Festsetzungen beispielsweise zu einer Recyclingquote kritisch betrachtet werden (Stadtplanungsamt Darmstadt, 2020).

Werden größere Gebiete mithilfe von Förderprogrammen saniert, so bietet sich die strategische Quartiersbetrachtung zur Erfassung der Baustoffmengen und -arten an. Problematisch ist jedoch, dass Förderprogramme mit Restriktionen und Verpflichtungen verbunden sind, die dazu führen können, dass bestimmte Maßnahmen (beispielsweise lokales Baustoffrecycling) aufgrund des Zeitdrucks keinen Eingang in die Umsetzung finden (Klimaschutzagentur, 2020).

11.2.2. Herausforderungen und Limitierungen

Die Handlungsmöglichkeiten sind einerseits rechtlich eingeschränkt, andererseits muss im Rahmen der Transformation auch Akzeptanz geschaffen werden.

Rechtliche Limitierungen

Im November 2020 wurden das Energieeinspeisegesetz, die Energieeinsparverordnung und das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz durch das Gebäudeenergiegesetz (GEG) ersetzt. Hierbei lag der Fokus wie zuvor jedoch ausschließlich auf der energetischen Qualität des Gebäudes (BMWK, 2020), ohne jedoch graue, im Gebäude verbaute Energie zu berücksichtigen (Klimaschutzagentur Wiesbaden, 2020).

Welche Festsetzungen insbesondere in neuen Feldern wie der Baustoffkonsistenz vorgenommen werden dürfen, wird aus den vorherrschenden rechtlichen Vorgaben nicht immer deutlich. Oft sind es Rahmen, die von den Kommunen zu schaffen sind oder es muss eine Verhältnismäßigkeit geben. Festsetzungen, die in einem Bebauungsplan getroffen werden, müssen Einfluss auf den Geltungsbereich haben. Dies ist jedoch bei Klimaschutz- und Klimaanpassungsaspekten schwer nachweisbar und daher kaum umsetzbar. In Darmstadt erhält das Stadtplanungsamt vom Rechtsamt Stellungnahmen, die auf rechtlichen Festsetzungen und gesprochenen Urteilen aufbauen. Der Vollzug der Festsetzungen im Bebauungsplan oder der allgemeinen Vorschriften muss zudem immer gesichert sein, was zum Teil für Städte kaum umsetzbar ist (Stadtplanungsamt Darmstadt, 2020).

Zusammengefasst ist zu konstatieren, dass die Werkzeuge, um ressourceneffizientes Handeln planungsrechtlich festzusetzen, bisher noch fehlen. Die rechtlichen Rahmenbedingungen hierfür

sind auf Landesebene zu schaffen (ebd.; Umweltamt Darmstadt, 2020; Hochbauamt Wiesbaden, 2020).

Exkurs Kreislaufwirtschaft

Der Abbruch von Gebäuden erfolgt abhängig vom Grad der vor Ort vorgenommenen Vorselektion konventionell, teilselektiv oder selektiv. Bestandteile der Vorselektion sind die Entrümpelung, die Entkernung und die Entsorgung, die die Verwertung und Beseitigung von Abfällen umfasst. Neben den stofflichen und energetischen Nutzen, der aus den Abfällen gezogen werden kann, sind auch die Kosten für das Vorgehen entscheidend (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 2001). Zu beachten sind rechtliche Vorschriften der Bundes- und Landesebene (KrWG; AVV; HAKrWG; HBO).

Vorgehen

Schritt 1: Entrümpelung

Unter Entrümpelung wird die Beseitigung aller nicht mit dem Gebäude fest verbundenen Materialien und Gegenständen verstanden (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 2001).

Schritt 2: Entkernung

Bei der Entkernung werden auch fest mit dem Gebäude verbundene Materialien und Gegenstände, die keinen Einfluss auf die Standsicherheit des Gebäudes haben, entfernt (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 2001).

Schritt 3: Entsorgung

Entsorgung ist der Oberbegriff von Verwertung und Beseitigung. Ziel der **Verwertung** ist es, einen stofflichen und energetischen Nutzen aus den Abfällen zu ziehen. Ist dies nicht mehr möglich, so werden im Rahmen der **Beseitigung** die Abfälle aus dem Stoffkreislauf genommen (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 2001; §3 Abs. 1 S. 1 KrWG). Die Verwertung hat – sofern eine Beseitigung für den Schutz von Mensch und Umwelt nicht besser gewährleistet wird – Vorrang vor der Beseitigung (§7 Abs. 2 S. 3 KrWG; Anmerkung: Eine Ausnahme gilt auch für bei Forschung und Entwicklung anfallenden Abfällen, was für den Projektbezug hier jedoch nicht relevant ist).

Abbruchvarianten

Es wird zwischen konventionellem, teilselektivem und selektivem Abbruch unterschieden.

Konventioneller Abbruch

Beim Abbruch entsteht im Rahmen von Zertrümmerungsprozessen ein heterogenes Gemisch aller Baustoffe, das in einer Sortieranlage getrennt werden muss. Hierbei fallen nicht nur höhere Kosten an, auch Schad- und Störstoffe lassen sich kaum entfernen (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2001).

Teilselektiver Abbruch

Der teilselektive Abbruch bewegt sich zwischen dem konventionellen und selektiven Abbruch, d.h. Ziel ist es, die Vermischung zu reduzieren und noch vorhandene Schad- und Störstoffe in den Abfällen möglichst auszusortieren (ebd.).

Selektiver Abbruch

Dem konventionellen Abbruch steht der selektive Abbruch gegenüber. Dabei erfolgt eine sortenreine Verwertung und Beseitigung der Abfälle. Durch die vollständige Demontage können Bauteile wiederverwendet und Stör- sowie Fremdstoffe ausgeschleust werden (ebd.).

Rechtliche Vorschriften

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) hat es zum Ziel, einen möglichst schonenden Umgang mit natürlichen Ressourcen sowie einen richtigen Umgang bei der Bewirtschaftung und Entsorgung von Abfällen herbeizuführen (§1f. KrWG). Um dies sicherzustellen, ist der Erzeuger oder Besitzer, d.h. Bauherr und Abbruchunternehmer, von Abfällen zur Verwertung verpflichtet (§7 Abs. 2 S. 1 KrWG; Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 2001). Der Abbruch bzw. die Beseitigung bedarf einer Baugenehmigung (§62 Abs. 1. S. 1 HBO), sofern nicht einer der in der Anlage zu §63 HBO aufgeführten Tatbestände vorliegt (Anlage zu §63 IV HBO). Die Umsetzung des KrWG erfolgt in Hessen mit dem "Hessischen Ausführungsgesetz zum Kreislaufwirtschaftsgesetz" (HAKrWG).

Die Grenzen der Pflicht zur Verwertung ergeben sich durch die technischen Möglichkeiten (ggf. auch mit Vorbehandlung) und die wirtschaftliche Zumutbarkeit. Der Tatbestand der wirtschaftlichen Zumutbarkeit ist erfüllt, wenn die Kosten für die Verwertung nicht außer Verhältnis zu den bei einer Beseitigung anfallenden Kosten stehen (§7 Abs. 4 KrWG).

Auch die gesetzlichen Vorschriften zur Rangfolge und Hochwertigkeit der Verwertungsmaßnahmen sind zum Schutz von Mensch und Umwelt zu befolgen. Daher hat die Wahl der Verwertungsmaßnahme entsprechend des Rangs des Schutzes zu erfolgen, sofern keine Gleichrangigkeit besteht (§8 KrWG). Der Abfall ist zudem nach

Abfallschlüsseln der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) einzuordnen. Eine Mantelverordnung befindet sich derzeit in der Planung, die voraussichtlich höhere Anforderungen an die Wiederverwendung stellen wird (EAD, 2020).

Rechtsebene	Regelwerk	Inhalt
Bundesrecht	Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	Behandlung von Abfällen (Verwertung & Beseitigung)
Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) Einstufung nach Abfallschlüsseln & Festlegung der Überwachungsbedürftigkeit		
Landesrecht	Hessischen Ausführungsgesetz zum Kreislaufwirtschaftsgesetz (HAKrWG)	Ausführungsgesetz zum KrWG
Hessische Bauordnung (HBO) Gesetz zur Bauausführung		
Kommunalrecht	Kreislaufwirtschaftssatzung (Wiesbaden)	Satzung zur Ausführung der übergeordneten gesetzlichen Vorgaben

Auf städtischer Ebene sind die jeweils kommunalen Vorschriften, falls vorhanden, zu berücksichtigen. Die Landeshauptstadt Wiesbaden hat satzungstechnisch festgehalten, dass Abfälle am Ort der Erzeugung getrennt zu halten und jeweils gesondert zu verwerten bzw. zu beseitigen sind (§5 Abs. 1 Kreislaufwirtschaftssatzung). Hierbei ist die Pflicht zur Verwertung gegeben, sofern es technisch möglich und wirtschaftlich nicht unzumutbar ist. Die Zumutbarkeit ist gegeben, wenn das Verhältnis zur Entsorgung gerechtfertigt ist (vgl. § 6 Abs. 1 Kreislaufwirtschaftssatzung). Mit §22 geht die Satzung insbesondere auf anfallenden Bauschutt ein und gibt vor, diesen - wenn möglich - vor Ort wiederzuverwerten und bei einem Volumen über 4 Kubikmeter nach verwertbaren Teilen des Bauguts zu trennen (§22 Kreislaufwirtschaftssatzung).

Akteursvorbehalte

Die Abweichung von etablierten Lieferketten und die Nutzung noch eher unbekannter Technologien birgt für **Handwerker*innen** Unternehmensrisiken. Ihr Vertrauen wird bevorzugt bewährten Bauprodukten geschenkt und sie unterliegen Industrieinteressen. Zudem sind sie mit Aufträgen ausgelastet und stehen der Problematik, keine Nachwuchskräfte zu finden, gegenüber (Klimaschutzagentur Wiesbaden, 2020).

Architekten fühlen sich durch Vorgaben, wie sie beispielsweise von der Energieeinsparverordnung oder dem Gebäude-Energie-Gesetz gemacht werden, in ihrer

Gestaltungsfreiheit eingegrenzt (Klimaschutzagentur Wiesbaden, 2020). Viele Vorgaben können dazu führen, die Umsetzung von Projekten deutlich komplexer und somit für Investoren oder Eigentümer*innen unattraktiver zu machen (Kanzlei für Verwaltungsrecht, 2020).

Länder und Kommunen nutzen bereits Geoportale, um **Eigentümer*innen** georeferenzierte Informationen öffentlich zugänglich zu machen. Flächen, die sich besonders für die Installation von Photovoltaikanlagen eignen, werden bereits in online abrufbaren Karten angezeigt. Ob gebäude-bezogene Daten, wie die Baumasse und Geschosshöhe veröffentlicht werden dürfen, muss datenschutzrechtlich geprüft werden (Vermessungsamt Darmstadt, 2020).

Exkurs Bereitschaft

Wirtschaftliche Umsetzbarkeit

Zu den größten Kostenpositionen zählen die Abbruch- und Demontagekosten, die Entsorgungskosten, die Transportkosten und die Planungskosten. Wird ein Gebäude konventionell abgebrochen, so stehen den geringen Kosten für minimale Entkernungsarbeiten hohe Kosten für die Entsorgung gegenüber. Der aufwendigere (teil)selektive Abbruch kann durch niedrigere Entsorgungskosten die gesamten Abbruchkosten reduzieren (Landes-anstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 2001). Sofern es wirtschaftlich zumutbar ist, ist der Erzeuger (Besitzer) zur Verwertung der Abfälle verpflichtet (§7 Abs. 4 S. 1 KrWG).

Gesellschaftliche Akzeptanz

Gesellschaftliche Vorbehalte zur Nutzung von Recyclingmaterial sind abzubauen. Ein Umdenken in der Bevölkerung und Offenheit für den Einbau von bereits genutzten Baustoffen ist notwendig. Eine Subventionierung oder Steuererleichterung für Recyclingbaustoffe oder eine höhere Besteuerung neuer Baustoffe wird erst dazu führen, dass viele Eigentümer*innen ihre Baustoffwahl ändern (EAD, 2020).

11.2.3. Nutzung der Projektergebnisse

Das Projekt RessStadtQuartier bietet den kommunalen Ämtern eine Datengrundlage, um gebäudebezogene Daten je nach Schwerpunkt auswerten und sachdienliche Informationen bereitstellen zu können. Für politische Entscheidungsträger werden somit Entscheidungshilfen für städtebauliche Sanierungsmaßnahmen geschaffen. Die Zielgruppen wie auch der Zielnutzen werden in folgender Tabelle 29 zusammengefasst.

Amt	Nutzen
Vermessungsämter mit Geoportalen	<ul style="list-style-type: none"> • Erweiterung der Geoinformations-Datenbank • Implementierung von Building Information Modeling
Umweltämter mit Klimaschutzagenturen	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung von CO₂-Bilanzen • Roh-/Baustoffkartierung • Umweltbericht • Öffentlichkeitsarbeit
Stadtplanungsämter	<p>Berücksichtigung und formelle Einbindung der umweltbezogenen Informationen in</p> <ul style="list-style-type: none"> • der Bauleitplanung und • in städtebaulichen Verträgen

Tabelle 29 Ämter und jeweiliger Nutzen der RSQ-Ergebnisse

Die Implementierung von ressourceneffizientem Handeln birgt Herausforderungen, bietet aber auch Chancen, die zuvor erläutert und in der folgenden Tabelle 30 zusammengetragen wurden.

Herausforderungen	Chancen
<ul style="list-style-type: none"> • heterogene Eigentümerstrukturen führen zu komplexeren Vorhaben • Abweichung zwischen Planung und Umsetzung verzerren die Datengrundlage • politische Entscheidungen werden vorwiegend auf ökonomischer Grundlage getroffen • Rechtsrahmen gibt nicht immer Rechtssicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> • vernetzte kommunale Verwaltungsstrukturen führen zu einer effizienteren Verwaltungsarbeit • Bedeutungsgewinn des Gebäudesektors im Umwelt- und Klimaschutz • Betrachtung zukunftsweisender Themen (bspw. Schaffung von Stellen im Bereich BIM) • Tools, insbesondere die CO₂-Bilanzierung, dienen als Grundlage für kommunale Strategien

Tabelle 30 Kommunale Herausforderungen und Chancen für die Implementierung von Konsistenzstrategien

Das Projekt zeigt rechtliche Limitierungen und gesetzliche Anpassungsbedarfe auf. So müssen Vorschriften zur Verwendung von Recyclingbaustoffen sowie zur Erweiterung der planungsrechtlichen Handlungsmöglichkeiten für ein konsistentes Handeln geprüft werden. Zum einen ergaben sich aus den Expertengesprächen Forderung zur Anpassung gesetzlicher Grundlagen auf Landes- (HBO) und Bundesebene (BauGB) unter Berücksichtigung der jeweiligen Zielsetzungen (bspw. Bauleitplanung). Zum anderen wurden aufgrund der Eingrenzungen der

Handlungsmöglichkeiten Forderung zur Änderung von Förderrichtlinien auf Bundes- und Landesebene genannt. Für zielführende planungsrechtliche Festsetzungen müssen daher noch gesetzliche Grundlagen geschaffen werden.

Auf der anderen Seite sehen sich alle am Bau beteiligten Akteure, insbesondere die Bauträger, einer Vielzahl an Vorschriften konfrontiert. Neben Gesetzen zur Kreislaufwirtschafts sind Belange des Naturschutzes, des Bodenschutzes und der Aspekt Gefahrenstoffe zu berücksichtigen. Die verschiedenen Rechtsbereiche regulieren alle die Verwertung, stehen aber nicht immer im Einklang zueinander (Deutscher Abbruchverband e.V., 2020).

11.3. Handlungsleitfaden

Der Handlungsleitfaden gibt Mitarbeiter*innen der Verwaltung ebenso wie Entscheidungsträger*innen einen modularen Katalog mit Instrumenten und Maßnahmen an die Hand, um ressourceneffizientes Handeln verstärkt in die kommunalen Prozesse einzubinden.

11.3.1. Ausgangslage

Nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz sind Erzeuger oder Besitzer von Abfällen zur Verwertung verpflichtet (§7 Abs. 2 S. 1 KrWG), was demnach auch die bei der Gebäudesanierung oder dem Gebäuderückbau anfallenden Baustoffe und Bauteile einschließt (LUBW, 2001). Die Grenzen dieser Pflicht werden jedoch durch die technischen Möglichkeiten, die nach dem aktuellen Stand der Technik zu bemessen sind, und die wirtschaftliche Zumutbarkeit, die nach dem Verhältnismäßigkeitsprinzip abzuwägen ist, gesetzt (§7 Abs. 4 KrWG). Um der Konsistenzstrategie gerecht zu werden, bedarf es daher bereits bei der Planung eines Gebäudes der Festlegung von Baustoffen und Bauteilen, deren Wiederverwendbarkeit sowohl technisch als auch wirtschaftlich umsetzbar ist und damit juristisch eingefordert werden kann.

11.3.2. Formelle Instrumente

Um den Verursacher zu einer Verwertung am Entstehungsort zu verpflichten, eignen sich städtebauliche Instrumente unter Anwendung der aktuellen Rechtslage nur bei Vorliegen bestimmter Voraussetzungen.

Bebauungsplan

Mit dem Bebauungsplan nach §10 Abs. 1 BauGB können Rahmenbedingungen gesetzt werden, innerhalb derer Bauvorhabenträger ihre Gestaltungsfreiheit ausüben dürfen. Die aktuellen Bauvorschriften erlauben es Festsetzungen hinsichtlich der Flächennutzung und -bereitstellung zu treffen, die beispielsweise energetische Aspekte durch eine optimale Flächen-Volumen-Ausweisung, die Gebäudeausrichtung oder eine EE-Flächenbereitstellung berücksichtigen (Bunzel

et al., 2017). Auf die Gebäudehülle und die darin verbauten Baustoffe sowie Bauteile kann mit dem Bebauungsplan jedoch kein Einfluss genommen werden (Umweltamt Darmstadt, 2020).

Exkurs Bebauungsplan

Ein Bebauungsplan ist ein Plan der Bauleitplanung, in der Art und Maß der baulichen Nutzung, überbaubare Grundstücksflächen und örtliche Verkehrsflächen in einem räumlichen Geltungsbereich rechtsverbindlich durch die Kommune festgesetzt werden. Der Bebauungsplan ist aus dem Flächennutzungsplan zu entwickeln (vgl. §8 Abs. 1 & 2 BauGB).

Inhalt

Die Inhalte, die in einem Bebauungsplan festgesetzt werden können, sind §9 BauGB zu entnehmen. Regelungen, die einen direkten Bezug zu ressourceneffizientem Handeln haben, sind bisher nicht vorgesehen. Übergeordnete Festsetzungen zur Verwendung von Bauprodukten sind lediglich in der Hessischen Bauordnung zu finden (§§18-28 & 29-35 HBO), allerdings beziehen sich diese auf Eigenschaften oder das Brandverhalten und lassen keine individuelle Festlegung zu.

Aufstellung

Die Aufstellung von Plänen der Bauleitplanung erfolgt durch die Gemeinden in eigener Verantwortung (§2 Abs. 1 S.1 BauGB).

Das Verfahren wird durch einen kommunalen Aufstellungsbeschluss gestartet, bedarf einer ortsüblichen Bekanntmachung und nach Ausarbeitung des Planentwurfs der frühzeitigen Beteiligung sowohl der Träger öffentlicher Belange wie auch der Öffentlichkeit (§2ff. BauGB). In Wiesbaden werden Bebauungspläne in eigener Regie, über städtische Gesellschaften oder über externe Büros erstellt (Umweltamt Wiesbaden, 2020a). Bei vorhaben-bezogenen Bebauungsplänen verlangt die Landeshauptstadt zudem ein Energiekonzept (Umweltamt Wiesbaden, 2020c). In Darmstadt erfolgt die Erarbeitung des Bebauungsplans ebenfalls im Stadtplanungsamt, ggf. in Zusammenarbeit mit externen Büros. Ein frühzeitiger Austausch mit dem Umweltamt und die Erstellung eines Klimagutachtens werden bereits in den Prozess implementiert (Stadtplanungsamt Darmstadt, 2020).

Für den daraus entwickelten Entwurf des Bauleitplans ist eine öffentliche Auslegung bekannt zu machen und durchzuführen. Ebenfalls sind Behörden und Träger öffentlicher Belange erneut einzubinden. Die Stellungnahmen sind zu prüfen, abzuwägen und ggf. in

die Planung zu integrieren. Bedarf es grundlegender Änderungen, so ist eine neue Auslegung durchzuführen und der Verfahrensschritt zu Wiederholen (§2ff. BauGB).

Weicht der Flächennutzungsplan vom Bebauungsplan ab, der sich in der Aufstellung, Änderung oder Ergänzung befindet, so ist er im Rahmen eines Parallelverfahrens zu ändern bzw. zu ergänzen (vgl. §8 Abs. 3f. BauGB). Weitere Ausnahmeregelungen sind dem BauGB zu entnehmen.

Der ausgearbeitete Bebauungsplan wird von der Gemeinde als Satzung beschlossen, ist ortsüblich bekannt zu machen und tritt mit der Bekanntmachung in Kraft (§10 Abs 1 & Abs. 3 S. 1 & 4 BauGB).

Schlussfolgerung

Flächen, die aus Sicht der Kreislaufwirtschaft besonders wertvoll sind, könnten entsprechend §9 Abs. 5 BauGB gekennzeichnet werden. Eine mögliche Formulierung wäre: "Flächen, die Gebäude mit hohem Sanierungspotenzial umfassen" sowie "Flächen, auf denen sich Gebäude befinden, die bei Sanierung oder Rückbau wertvolle Baustoffe freisetzen".

Über die BauNVO könnte eine Zusatzkategorie wie beispielsweise "baustoffreiche Kerngebiete" für Gebäude genutzt werden, die aufgrund ihrer Struktur und ihres Baualters besonders für die Wiederverwendung bestimmter Baustoffe geeignet sind.

Dennoch ist festzuhalten, dass der Bebauungsplan Eigentümer*innen immer eine gewisse Wahlfreiheit bieten muss und lediglich einen strukturellen Rahmen schafft (Stadtplanungsamt Darmstadt, 2020; Umweltamt Wiesbaden, 2020b). Zudem stehen lange komplexe Verfahren der Aufnahme weiterer Anforderungen entgegen. Aus juristischer Sicht ist vielmehr eine Verschlankung der Verfahren anzustreben (Kanzlei für Verwaltungsrecht, 2020).

Satzung

Mit dem Instrument der Satzung (ein Bebauungsplan wird auch als Satzung beschlossen) können für Ortsteile oder die gesamte Kommune nur solche Festsetzungen beschlossen werden, die in §91 der Hessischen Bauordnung (HBO) gelistet sind. Neben den formellen Anforderungen (Ordnungsgemäßer Satzungsbeschluss, Genehmigung, Bekanntmachung, In-Kraft-Treten, keine Rechtsverletzung) müssen zudem die materiellen Anforderungen des Bestimmtheitsgebots und der Übermaßverbots (=Verhältnismäßigkeitsgrundsatz) gegeben sein. Mit letzterem ist daher immer eine nur schwer durchführbare Abwägung zwischen Grundrechtseingriff und verfolgtem

Zweck durch die Kommune vorzunehmen, mit dem Risiko, dass das Verwaltungsgericht im juristischen Prozess die Nichtigkeit der Satzung feststellt.

Exkurs Satzung

Kommunen muss das Recht gewährleistet werden, Angelegenheiten auf örtlicher Ebene in eigener Verantwortung unter Einhaltung der Gesetze zu regeln (Prinzip der Subsidiarität gem. Art. 28 Abs. 2 GG). Sie können Satzungen beschließen und müssen hierfür die im jeweiligen Landesgesetz festgesetzten Rechtsvorschriften beachten. In Hessen sind hierfür die Regelungen in §5 der Hessischen Gemeindeordnung (HGO) zu berücksichtigen.

Inhalt

Es können nur solche Festsetzungen beschlossen werden, die in §91 der Hessischen Bauordnung (HBO) gelistet sind. In §91 Abs. 1 S.1 Nr. 1 gibt der Gesetzgeber vor, dass Vorschriften über die "Verwirklichung von Zielen des rationellen Umgangs mit Energie und Wasser in bestimmten, genau abgegrenzten bebauten oder unbebauten Teilen des Gemeindegebietes" erlassen werden können. Es ist zu prüfen, ob in der Auslegung die Energie neben der Strom- und Wärmeenergie auch die graue Energie umfasst. Demnach umfasse eine Satzung auch Festsetzungsmöglichkeiten für ein konsistentes Handeln im Quartier.

Aufstellung

Für die wirksame Aufstellung einer Satzung müssen ein ordnungsgemäßer Satzungsbeschluss nach §53 Abs. 1 S. 1 HGO sowie eine aufsichtsbehördliche Genehmigung nach §5 Abs. 1 S. 2 HGO vorliegen. Vergleichbar mit dem Prozess der Planaufstellung ist vor dem In-Kraft-Treten (§5 Abs. 3 S. 2 HGO) der Satzung ebenfalls eine öffentliche Bekanntmachung im ortsüblichen Blatt bzw. im Amtsblatt vorzunehmen (§5 Abs. 3 S. 1 HGO).

Rechtmäßigkeit

Für die Rechtmäßigkeit der Satzung sind formelle und materielle Anforderungen einzuhalten.

I. Formelle Anforderungen

Die formellen Anforderungen betreffen die wirksame und die frei von Rechtsverletzungen durchgeführte Aufstellung der Satzung.

(1) Ordnungsgemäßer Satzungsbeschluss (nach §53 Abs. 1 S. 1 HGO müssen mind. die

Hälfte der gesetzlichen Zahl der Gemeindevertreter anwesend sein; Sonderfälle sind im §53 HGO zu prüfen)

(2) Aufsichtsbehördliche Genehmigung (§5 Abs. 1 S. 2 HGO)

(3) Öffentliche Bekanntmachung im ortsüblichen Blatt / im Amtsblatt (§5 Abs. 3 S. 1 HGO)

(4) In-Kraft-Treten der Satzung (§5 Abs. 3 S. 2 HGO)

(5) Keine geltend gemachte Rechtsverletzung; Frist von 6 Monaten (§5 Abs. 4 HGO)

II. Materielle Anforderungen

Die rechtsstaatlichen Anforderungen - Bestimmtheit und Übermaßverbot - sind einzuhalten.

(1) Bestimmtheitsgebot (abgeleitet aus dem Rechtsstaatsgebot (Art. 20 Abs. 3 GG))

Es wird eine hinreichende Bestimmtheit und Klarheit der gegenständlichen Norm gefordert. Die Rechtslage, d. h. Inhalt und Grenzen der Gebots- und Verbotsnormen müssen von einem Betroffenen in zumutbarer Weise erkannt werden. Je intensiver der Eingriff ist, der sich durch die mit der Norm wirkenden Rechtslage ergibt, desto höher sind die Anforderungen an die Bestimmtheit im Einzelfall.

(2) Übermaßverbot = Verhältnismäßigkeitsgrundsatz = stimmige Mittel-Zweck-Relation

"Formulierungsmuster: Der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit verlangt, dass ein Grundrechtseingriff einem legitimen Zweck dient und als Mittel zu diesem Zweck geeignet, erforderlich und angemessen ist (BVerfGE 118, 168 [193])" (Universität des Saarlandes, 2020).

a) Zweck, den der Gesetzgeber mit der Beschränkung verfolgt, muss legitim sein, d.h. darf aus verfassungsrechtlichen Gründen verfolgt werden

b) Eingriff muss als Mittel zur Erreichung dieses Zwecks sein

aa) geeignet = zweckdienlich

bb) erforderlich = notwendig („mildestes Mittel“)

cc) angemessen = verhältnismäßig i.e.S.: Abwägung zwischen Gewicht des Grundrechtseingriffs und verfolgtem Zweck (Proportionalität, Zumutbarkeit)

Formulierungsmuster: "Das Gebot der Verhältnismäßigkeit i.e.S. verlangt, dass die Schwere des Eingriffs bei einer Gesamtabwägung nicht außer Verhältnis zu dem Gewicht der ihn rechtfertigenden Gründen stehen darf (BVerfGE 118, 168 [195])" (ebd.).

Fallstudien

Gebäude, die in Wiesbaden im Bereich einer Fernwärmeversorgung liegen, sind zum Anschluss berechtigt und verpflichtet. Sie müssen die Wärmeenergie entsprechend auch über Fernwärme beziehen (Anschlusszwang nach §3 Abs. 1 und Benutzungszwang nach §4 Abs. 1 Fernwärmesatzung), sofern keine Ausnahmen nach §6 vorliegen.

Für die Kreislaufwirtschaft hat die Stadt Wiesbaden eine Satzung aufgestellt, in der auch Festlegungen zum Thema Bauschutt getroffen werden (Kreislaufwirtschaftssatzung). Die Angemessenheit ist demnach dann gegeben, wenn die Verwertung nicht außer Verhältnis zur Entsorgung steht (entspricht auch den gesetzlichen Vorgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (vgl. § 6 Abs. 1 Kreislaufwirtschaftssatzung und §7 Abs. 4 KrWG).

Für die Stadt Darmstadt liegen keine Satzungen, die die vom Projekt RessStadtQuartier betreffenden Themen berühren, vor.

Schlussfolgerung

Wird eine Satzung erlassen, die für das gesamte Stadtgebiet gilt, so ist nachzuweisen, wie wichtig die darin enthaltenen Forderungen und Verpflichtungen sind. Vertreter*innen der Stadtplanung stufen dies jedoch als sehr schwierig ein. Eine Abwägung kann - wie das Prüfschema deutlich macht - auch nur dann erfolgen, wenn Wirkung und Aufwendung in angemessenem Verhältnis stehen (Stadtplanungsamt Darmstadt 2020). Aufgrund der zusätzlichen, in Satzungen geforderten Anforderungen steigt auch die Komplexität bei der Umsetzung von Vorhaben (Kanzlei für Verwaltungsrecht, 2020).

Städtebaulicher Vertrag

Im Vergleich zur Satzung, die nach Beschluss für alle Bauvorhabenträger rechtsverbindlich gilt, ist ein Städtebaulicher Vertrag eine rechtsverbindliche Vereinbarung zwischen der Kommune und einem oder mehreren Bauträgern. Auch hier sind formelle Anforderungen (Schriftform) und materielle Anforderungen (Verhältnismäßigkeitsgrundsatz, Kopplungsverbot) einzuhalten. Die Verhältnismäßigkeit ist nicht gegeben, wenn die Leistung den gesamten Umständen nach nicht angemessen ist und einen zu hohen wirtschaftlichen Nachteil darstellt. Eine genaue Definition der Abgrenzung hiervon fehlt jedoch.

Exkurs Städtebaulicher Vertrag

Die Gemeinde hat die Möglichkeit im Rahmen eines Bebauungsplanverfahrens mit einem oder mehreren Grundstückseigentümern, Bauwerbern oder Bauträgern, i. d. R. jedoch einem Träger eines größeren Bauvorhabens bzw. einem Investor, einen städtebaulichen Vertrag zu schließen (§11 Abs. 1 S. 1 BauGB). Sie gehören zu einem in Städten vielfach genutzten Instrument der Bauleitplanung (Bröll, o.J.). Hierbei handelt es sich um ein Instrument für die Zusammenarbeit von öffentlicher Hand und Investor (§11 BauGB).

Inhalt

In einem städtebaulichen Vertrag können die Vorbereitung und Durchführung städtebaulicher Maßnahmen durch den Investor und dessen Kosten festgelegt werden (§11 Abs. 1 S. 2 Nr. 1 BauGB). Die Verantwortung für das Planaufstellungsverfahren kann nicht übertragen werden und liegt bei der Kommune (ebd. Nr. 1). Gegenstand des städtebaulichen Vertrags ist insbesondere die Förderung und Sicherung der mit der Bauleitplanung verfolgten Ziele (ebd. Nr. 2).

Die Errichtung und Nutzung von Anlagen und Einrichtungen der Erzeugung erneuerbarer Energien und die Anforderung an die energetische Qualität von Gebäuden kann vertraglich vereinbart werden (ebd. Nr. 4 & 5). Auch die Forderung des Baustoffrecyclings wäre möglich, sofern die im Prüfschema genannten Punkte erfüllt sind (Stadtplanungsamt Darmstadt, 2020). Insgesamt bietet der städtebauliche Vertrag im Vergleich zum Bebauungsplan und anderen Satzungen deutlich mehr Vertragsfreiheit (Umweltamt Darmstadt, 2020).

Vertragsschluss

Der städtebauliche Vertrag ist eine Sonderform öffentlich-rechtlicher Verträge und wird zwischen einer Gemeinde und einem Bauträger oder einer Gruppe von Bauträgern im Rahmen einer "Angebotsplanung" geschlossen (§11 Abs. 1 S. 1 BauGB) (Bröll, o.J.). In Darmstadt liegt die Zuständigkeit beim Stadtplanungsamt (Stadtplanungsamt, 2020).

Rechtmäßigkeit

Für die Rechtmäßigkeit des städtebaulichen Vertrags müssen formelle und materielle Anforderungen eingehalten werden.

I. Formelle Anforderungen

Der städtebauliche Vertrag ist nicht zulässig, wenn

(1) die Schriftform nicht eingehalten wurde, sofern nicht durch Rechtsvorschriften eine

andere Form vorgeschrieben ist (§11 Abs. 3 BauGB).

II. Materielle Anforderungen

Der städtebauliche Vertrag ist nicht zulässig, wenn

(1) Verhältnismäßigkeitsprinzip (§11 Abs. 2 S. 1 BauGB)

die vereinbarten Leistungen den gesamten Umständen nach nicht angemessen sind (ebd.), da sie beispielsweise einen zu hohen wirtschaftlichen Nachteil darstellen.

(2) Kopplungsverbot (§11 Abs. 2 S. 2 BauGB)

a) der Vertragspartner auch ohne die durch den Vertrag zu erbringende Leistung Anspruch auf die Gegenleistung gehabt hätte (ebd.). Hat der Vertragspartner beispielsweise schon einen Rechtsanspruch auf eine Baugenehmigung nach §34 BauGB, so "kann die Gemeinde nicht über einen städtebaulichen Vertrag weitere Leistungen des Privaten verlangen" (Bröll, o.J.).

b) Leistung und Gegenleistung in keinem sachlichen Zusammenhang stehen (ebd.), was bedeutet, dass die von der Gemeinde geforderte Leistung unmittelbar in Zusammenhang mit dem Bebauungsplan zu stehen hat (ebd.).

Schlussfolgerung

Eine Regelung zur Ressourcenverwendung ist im städtebaulichen Vertrag möglich (Kanzlei für Verwaltungsrecht, 2020). Für das Projekt RessStadtQuartier ist insbesondere die Auslegung des Abschnittes Nummer 5 von Bedeutung. Es ist zu prüfen, welche Auflagen unter "Anforderungen an die energetische Qualität von Gebäuden" gefasst werden können (§11 Abs. 1 S. 2 Nr. 4 BauGB). Zudem ist zu prüfen, wann die durch einen Investor zu erbringende Leistung nicht mehr angemessen ist (§11 Abs. 2 S. 1 BauGB). Die Aufnahme von Hinweisen (Umweltplan Wiesbaden, 2020b), die keine Verpflichtungen darstellen, aber Bewusstsein für die Thematik schaffen, sollte aufgrund der Rechtssicherheit bereits erfolgen.

Darstellung in Fachplänen

Werden – anders als bei der Bauleitplanung (hier Bebauungsplanung) – nicht alle räumlichen Nutzungsansprüche gleichermaßen behandelt, sondern wird ein spezieller Bodennutzungsanspruch für ein Fachbelang betrachtet, so können Fachpläne (z.B. Landschaftsplan) geregelt nach Fachgesetzen erstellt werden. Regelungen für eine Fachplanung zum Baustoff- und Bauteilrecycling gibt es derzeit nicht.

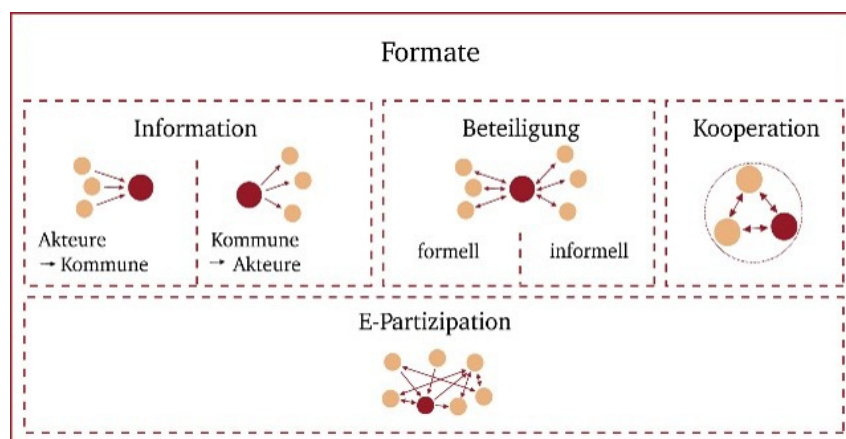
Ausschreibungen

Bei stadteigenen Ausschreibungen sollten die Vergabekriterien dahingehend angepasst werden, dass weniger die Wirtschaftlichkeit als mehr die ökologische Klimaverträglichkeit gewichtet wird. Die Materialoffenheit sollte dahingehend gegeben werden, dass ökologisch gleichwertige Baustoffe eigenständig gewählt werden können. Recyclingbaustoffen und nachhaltigen Baustoffen ist aber in der Regel Vorrang zu gewähren.

11.3.3. Informelle Instrumente

Neben den planungsrechtlichen Rahmenbedingungen ist es die fehlende Akzeptanz gesellschaftlicher, politischer und unternehmerischer Akteure, die die Handlungsmöglichkeiten kommunaler Verwaltungen einschränkt. Diese ist darauf zurückzuführen, dass die Thematik bisher kaum Eingang in den politischen Diskurs gefunden hat und das Bewusstsein noch nicht geschaffen wurde, der Austausch von an Vorhaben beteiligten Akteuren fehlt und die Bauvorhabenträger mit einer Vielzahl an Gesetzen und Verordnungen in verschiedenen Rechtsbereichen konfrontiert werden.

Die Ausgestaltung von Kommunikations- und Partizipationsprozessen erfordert eine qualifizierte Analyse von Stakeholdern, eine detaillierte Untersuchung der Interessen sowie eine Erfassung der Artikulationsfähigkeiten einzelner Akteursgruppen (Beckmann, 2012). Ziel der Formate ist es, nicht nur die Bedeutung von ressourceneffizientem Bauen aufzuzeigen, sondern vielmehr auch ein Verständnis für die Hintergründe und die gesamtgesellschaftliche Bedeutung zu vermitteln. Die Maßnahmen bzw. Formate können in die Prozessschritte "Information", die einerseits das Erkunden von Interessen und andererseits das Informieren beschreibt, "Mitwirken" (hier informelle Beteiligung) und "Kooperieren" untergliedert werden (Bischoff et al., 2005; Langhagen-Rohrbach, 2005). Alle digitalen Angebote, die oft eine Mischform aufweisen, werden unter E-Partizipation aufgeführt (Hekmati, 2012). Die Abbildung 71 veranschaulicht die beschriebene Differenzierung.



Informierende Formate

Mit einer **bürgernahen Beratung** zu energetischen und ressourceneffizienten Sanierungsmaßnahmen kann ein unmittelbarer Dialog zwischen Fachleuten und Bürger*innen ermöglicht werden (Selle, 1994). Die Beratung kann aktivierend sein und zur Partizipation motivieren oder aufsuchend sein und an Info-Ständen bestimmte Zielgruppen ansprechen (ebd.; Staubacher & Kerchner 1986). Es können örtliche Beratungen mit punktuell stattfindenden Terminen, orts-gebundene Beratungsstellen für einen bestimmten Zeitraum in einem Quartier und ortsansässige Beratungen für das Vorhalten eines dauerhaften Angebots genutzt werden. Viele Kommunen bieten bereits über ihre kommunalen Klimaschutzagenturen eine ortsansässige Beratung an, in der in einem kostenlosen Erstgespräch allgemeine Empfehlungen zu energetischen Sanierungsvorhaben gegeben werden (Selle 1994; Schnepf-Orth & Staubach, 1989). Hier besteht das Potenzial, die Beratung zu baustoffbezogenen Themen zu integrieren.

Mit der Klimaschutzagentur hat Wiesbaden einen Verein gegründet, der Bürger*innen eine kostenlose Erstberatung zu energieeffizientem Handeln anbietet. Themenschwerpunkte sind u.a. die energetische Sanierung, die Baustoffkonsistenz ist allerdings noch kein Bestandteil der Gespräche. Da die Beratungen i.d.R. für Nachfragen zur Wirtschaftlichkeit genutzt werden, sind Anknüpfungspunkte zu Förderprogrammen sehr wichtig (Klimaschutzagentur Wiesbaden, 2020).

Wichtig in der Kommunikation sind klare Begrifflichkeiten, das Aufzeigen der Vorteile von Recyclingbaustoffen und ihrer Qualität sowie die Änderung des Images von Recyclingbaustoffen. Auch die Anwendung bei stadteigenen Objekten hat einen informierenden Charakter. Mit Leuchtturmprojekten können Kommunen so als Vorbild agieren und über die Gleichwertigkeit zu klassischen Baustoffen aufklären. Mit Weiterbildungen und Schulungen kann zudem das Fachwissen an die am Bau beteiligten Akteur*innen weitergegeben werden.

Beteiligende Formate

Ebenso wichtig ist es jedoch auch, die an Vorhaben beteiligten Akteure mittels Netzwerken zusammenzubringen, Prozessschnittstellen zu optimieren und einen dauerhaften Wissens- und Erfahrungsaustausch sicherzustellen.

Das informelle Instrument der **Zukunftswerkstatt** bietet die Möglichkeit, Bürger*innen sowie Fachexpert*innen einzubinden. In einer Kritikphase wird eine themenbezogene Bestandsaufnahme vorgenommen, um in der anschließenden Fantasiephase gemeinsam diverse Ideen zusammenzutragen und zuletzt in der Verwirklichungsphase Lösungen hinsichtlich ihrer rechtlichen Rahmenbedingungen und ihrer technischen sowie wirtschaftlichen Umsetzbarkeit zu prüfen (vgl. Bischoff, Selle & Sinning, 2005).

In Kommunen können zudem **Arbeitskreise** (Arbeitsgruppen), bestehend aus den unterschiedlichen Akteuren, eingerichtet werden. In diesen wird ein klar definierter Themenbereich – ggf. unter Hinzunahme einer Moderation – bearbeitet (ebd.).

Kooperierende Formate

Kooperative Instrumente wie **Workshops** helfen dabei, die Handlungsmöglichkeiten verschiedener Akteure auszuloten und ebenfalls Lösungen so zu erarbeiten. Mit dem kooperativen Charakter sind alle Akteure gleichberechtigt, um im Kommunikationsprozess Barrieren zwischen verschiedenen Interessenvertreter*innen abzubauen. Ebenfalls begleitet von einer Moderation, sind Workshops zeitlich begrenzt (Bischoff, Selle & Sinning 2005).

Mit einem **Forum** kann das Thema der Ressourceneffizienz vorgestellt und in der Öffentlichkeit erörtert werden. Es bietet die Möglichkeit an Lösungskonzepten mitzuarbeiten und Einfluss auf die politische Willensbildung zu nehmen. Offene Konflikte werden gelöst und Transparenz im Projekt wird geschaffen (ebd.).

Wie im Workshop sind auch beim **runden Tisch** alle beteiligten Akteure gleichberechtigt. Hierbei sollten insbesondere konfliktbehaftete Themen oder auch neue und noch nicht platzierte Themen wie die Baustoff- und Bauteilwiederverwendung mit ausgewählten Vertreter*innen bearbeitet und Lösungen entwickelt werden. Die Empfehlungen werden dann an die Entscheidungsträger, die kommunalen Politiker*innen, herangetragen (ebd.).

E-Formate

Mit einem kommunalen Solarkataster als Instrument der E-Partizipation, dass über die städtische Webseite abrufbar ist und bei vielen Kommunen bereits im Einsatz ist, können objektbezogene Daten abgerufen und Potenziale für die Installation von Photovoltaik- sowie Solarthermieranlagen aufgezeigt werden. Das **Onlinekataster** könnte zukünftig um das urbane Rohstofflager und die in einzelnen Gebäuden oder gesamten Quartieren verbauten Rohstoffe erweitert werden. Hierdurch können die zu erwartenden Ressourcen, die bei unterschiedlichen Graden an Sanierungs- und Abbruchmaßnahmen anfallen, abgerufen werden. So können kommunale Verwaltungen bei Stadt-sanierungsmaßnahmen wirtschaftlich zumutbare Festsetzungen (über bspw. städtebauliche Verträge) zur lokalen Verwertung treffen.

11.4. Ausblick

Es wird nicht ausreichen, eine Maßnahme oder Festsetzung zu treffen, um eine Lebenszyklusbetrachtung über alle Lebensphasen hinweg im Gebäudesektor zu etablieren. Vielmehr sind es mehrere kleinteilige, aber aufeinander abgestimmte Schritte, die hierfür notwendig sind.

Die Fallbeispiele der untersuchten Kommunen zeigen, dass es bisher noch keine Vorschriften zur ortsgebundenen Verwertung oder generellen Wiederverwendung bestimmter Baustoffe oder Bauteile gibt. Pauschale Auflagen, wie etwa bei Rückbau anfallende Baustoffe an Ort und Stelle zu einem bestimmten Anteil wiederzuverwerten, sind kritisch zu sehen, da unter Umständen eine Nutzungsänderung stattfindet oder das Nachfolgeobjekt auch bei Wohnbebauung andere Rahmenbedingungen aufweist. Der ökologische Fußabdruck, der für die Verwertung anfällt, wäre auch hier der Neuproduktion gegenüberzustellen.

Mit dem Gebäude-Material-Kataster (GMK[®]) wird ein Tool angeboten, das auf Basis von Geodaten und Datenbanken sowohl für Einzelgebäude wie auch Quartiere baustoffbezogene Informationen liefert. Die bei Abbruch, Rückbau und Sanierung freiwerdenden Baustoffe und Bauteile können so erfasst und für einen Verwertungsplan verfügbar gemacht werden. Die synthetischen Gebäude können durch vorliegende Daten in den kommunalen Ämtern und durch Ergebnisse aus Analysen und Schadstoffgutachten mit Realdaten ersetzt bzw. ergänzt werden, um konkretere und realitätsnahe Informationen abzufragen.

Die Handlungsmöglichkeiten für ein effizientes, konsistentes und suffizientes Vorgehen im Neubau sind vielseitig. Hierfür ist eine Ökobilanzierung des Vorhabens über den gesamten Lebenszyklus anzufertigen und somit ein Nachweis zu erbringen, dass die "technische und wirtschaftliche Rückbau-, Trenn- und Verwendbarkeit der im Gebäude verbauten Baustoffe sichergestellt ist" (Bourgoin, Kraff & Mayer, 2020). Ziel im Neubau sollte es sein, keine Baustoffe mehr zuzulassen, die nach Abbruch oder Rückbau unter hohem technischem und energetischem Aufwand getrennt, deponiert oder thermisch verwertet werden müssen (Asam et al., 2018). Mit einem Gesetz, das alle Regulierungen zur Baustoffverwertung zusammenführt, kann bei Bauvorhabenträgern, Planern und ausführenden Unternehmen Rechtssicherheit geschaffen werden (Deutscher Abbruchverband e.V., 2020). Mit städtebaulichen Verträgen können Kommunen im Einzelfall vertragliche Vereinbarungen mit Investoren und Eigentümer*innen treffen, um die Wiederverwendung bestimmter Materialien festzusetzen. Mit einer noch zu entwickelnden bauplanungsrechtlichen Eingriffsregelung mit Ökobilanzierung könnte die Lebenszyklusbetrachtung etabliert werden, denn "so müssten bei einem Neubau die CO₂-Emissionen aus dem gesamten Lebenszyklus mit Bau, Betrieb und Verwertung bilanziert und auf die Jahre der Nutzung aufgeteilt werden" (Bourgoin, Kraff & Mayer, 2020). Die Sicherstellung kann mit dem Einsatz von Building Information Modeling erfolgen. Baumassen und Baustoffe könnten demnach erfasst und CO₂-Äquivalente für eine Bilanzierung hinterlegt werden (ebd.).

Der Eingriff in den Bestand gestaltet sich hingegen schwierig. Mittels Beratungsangeboten, Informationsplattformen und Förderprogrammen sowie städtebaulichen Sanierungskonzepten sollte eine Sensibilisierung sowie ein Anreiz geschaffen werden, ökologisch sinnvolle Maßnahmen

zu ergreifen. Die Zulassung von Handlungsmöglichkeiten, die zukünftig auch einen Eingriff in den Gebäudebestand zulassen, müssen juristisch geprüft werden, um den umfangreichen Bestand energetisch den globalen Klimazielen anpassen zu können.

Eine Wissensvernetzung verschiedener Akteure kann nicht nur neue Technologien schneller in den Markt bringen, sondern steigert auch die Akzeptanz aller an Bauvorhaben beteiligter Parteien. Hierbei können aus der Praxis gewonnene Erfahrungen mit wissenschaftlichen Erkenntnissen kombiniert und Lösungskonzepte im Rahmen von partnerschaftlichen Kooperationsprojekten erarbeitet werden. Bauvorhabenträger, Architekten, Handwerker und Forschungseinrichtungen können so neue Impulse am Markt setzen.

Das Projekt RessStadtQuartier hat zwei hessische Großstädte untersucht und zeigt, dass Baustoffwiederverwendung bereits thematisiert, aber noch in keinen Vorhaben angewendet wird. Mit Blick auf Mittel- und Kleinstädte wird deutlich, dass dort die Thematik noch keinen Einzug erhalten hat und übergeordnete Kompetenz- sowie Ressourcenbündelungen erforderlich sind, um ein rechtssicheres Vorgehen, unabhängig von der Größe der Kommune, zu ermöglichen.

12. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Bourgoin, A.; Kraff, B. D.; Mayer, M. (2020): Gebäudematerialkataster im Städtebau – Möglichkeiten und Grenzen der Umsetzung ressourcenbezogener Zielsetzungen. In: Flächenmanagement und Bodenordnung (fub), 6/2020, S. 263-271

Mack, T.; Schleich, P.; Koch, B.; Schebek, L. (2021): Informationstiefenabhängige BIM-Rekonstruktion auf Basis von synthetischen Quartiers- und Gebäude- sowie Produkt- und Materialdaten; 32. Forum Bauinformatik 2021: Kapitel 7 Machine Learning und künstliche Intelligenz (S299 ff.)

Schebek, L.; Lützkendorf, T.; Uhl, M. (2022): Handreichung zur Typologie von Indikatoren sowie ihrer Anwendung in Planungsprozessen und Projekten zur nachhaltigen Quartiersentwicklung; Darmstadt, Münster, Germany, 2022. Available online: https://ressourceneffizientestadtquartiere.de/wp-content/uploads/2022/03/Handreichung_Indikatoren_2022_01_18_TUprints.pdf

Schebek, L.; Lützkendorf, T. (2022): Assessing Resource Efficiency of City Neighbourhoods: A Methodological Framework for Structuring and Practical Application of Indicators in Urban Planning; Sustainability; <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/13/7951>

Scheich, P.; Rüppel U. (2020): Anwendungspotential des Einsatzes von KI im Bereich der BIM-Methodik. In: Flächenmanagement und Bodenordnung (fub), 6/2020,

Siedlecki, B.; Göllner-Völker, L.; Spielmann, M.; Weyand, S.; Schebek, L. (geplant): From generic buildings to generic quarters: The German residential building stock; in Planung

13. Literaturverzeichnis

- Abele, Eberhard; Bauerdick, Christoph; Schebek, Liselotte; Kannengießer, Jan; Campitelli, Alessio; Fischer, Julia; Anderl, Reiner; Haag, Sebastian; Sauer, Alexander; Mandel, Jörg; Lucke, Dominik; Bogdanov, Ivan; Nuffer, Anne-Kathrin; Steinhilper, Rolf; Böhner, Johannes; Lothes, Gerald; Schock, Christoph; Zühlke, Detlef; Plociennik, Christiane; Bergweiler, Simon (2017):** Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Studien/Studie_Ressourceneffizienz_durch_Industrie_4.0.pdf
- Agentur für erneuerbare Energien (2017):** Integriertes Quartierskonzept – wie funktioniert ein Integriertes Quartierskonzept, online verfügbar unter <http://www.kommunal-erneuerbar.de/de/381/wie-funktioniert/integriertes-quartierskonzept.html>, zuletzt geprüft am 04.05.2017
- Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Omoteso, K., Ajayi, S. O., Bilal, M., Owolabi, H. A., & Looney, J. H. (2017):** BIM-based deconstruction tool: Towards essential functionalities. International Journal of Sustainable Built Environment, 6(1), 260-271. ISSN 2212-6090, Online verfügbar: <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.01.002>. (letzter Zugriff: 23.02.2023)
- Alisch, M. (2002):** Soziale Stadtentwicklung. Widersprüche, Kausalitäten und Lösungen. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften GmbH.
- Amt für interne Dienste Darmstadt (2020):** Expert*inneninterview im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier, durchgeführt von: Kraff, B. D., Wacker, M. & Scheich, P. (13.05.2020).
- Aringer, K., Dorsch, J., Roschlaub, R. (2013):** Erfassung und Fortführung von 3D-Gebäudemodellen auf Basis von Airborne LiDAR-Daten, Image Matching und Katasterinformationen, zfv, S. 405-414
- Asam, C.; Keilhacker, T.; Müller, A. und Schwede, D. (2018):** Schonung der natürlichen Ressourcen durch Materialkreisläufe in der Bauwirtschaft. In: Kommission Nachhaltiges Bauen am **Umweltbundesamt** (Hrsg.): Positionspapier. Berlin. Baugesetzbuch (BauGB) in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634).
- Bartels, N., Höper, J., Theißen, S., Wimmer, R. (2022):** Anwendung der BIM-Methode im nachhaltigen Bauen: Status quo von Einsatzmöglichkeiten in der Praxis, Springer Vieweg.
- Baugesetzbuch (BauGB):** in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634).

BBSR, BBR, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2012): Indikatoren zur Messung der Ressourceneffizienz im Bauwesen, Online verfügbar:
<http://www.irbnet.de/daten/baufo/20148036115/Projektkurzbeschreibung.pdf> (letzter Zugriff: 23.02.2023)

Beckmann, K. J. (2012): Das Kreuz mit den Ungleichgewichten – Information und Kommunikation in der Beteiligung. In: Beckmann, K. J. (Hrsg.): Bürgerbeteiligung in Kommunen. Anmerkungen aus der Stadtforschung zu einer aktuellen Herausforderung, Deutsches Institut für Urbanistik, Bd. 3., Berlin, S. 7-12.

Best, H. (1977): Die quantitative Analyse inhaltlicher und kontextueller Merkmale historischer Dokumente. In: Best, H. & Mann, R. (Hrsg.): Quantitative Methoden in der historisch-sozialwissenschaftlichen Forschung. Stuttgart: Klett-Cotta, 162-205.

Bettgenhäuser, K. (2013): Integrated assessment modelling for building stocks: A technical, economical and ecological analysis (1. Aufl.). Ingenieurwiss. Verl

Bick, W. & Müller, P. J. (1984): Sozialwissenschaftliche Datenkunde für prozessproduzierte Daten. In: Müller, P. J. & Mann, R. (Hrsg.): Sozialforschung und Verwaltungsdaten. Stuttgart: Klett-Cotta, 123-159.

Bischoff, A.; Selle, K. & Sinning, H. (2005): Informieren, Beteiligen, Kooperieren. Kommunikation in Planungsprozessen. Eine Übersicht zu Formen, Verfahren, Methoden und Techniken, Bd. 1, Dortmund.

Bourgoin, A.; Kraff, B. D.; Mayer, M. (2020): Gebäudematerialkataster im Städtebau – Möglichkeiten und Grenzen der Umsetzung ressourcenbezogener Zielsetzungen. In: Flächenmanagement und Bodenordnung (fub), 6/2020, S. 263-271

Bredhorn, J.; Helmus, M.; Jehle, P.; Kelm, A.; Kortmann, J.; Laußat, L.; Meins-Becker, A.; Rüppel, U.; Wagner, S.; Zwinger, U. (2015): BIM-basiertes Bauen mit RFID: Nutzung von konsistenten Informationen für RFID-gesteuerte Planungs-, Ausführungs- und Bewirtschaftungsprozesse. In: Bauingenieur – Bautechnik Jahresausgabe 2015/2016. Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, ISSN 0005-6650, S. 136-139.

Bröll, Helmut (o. J.): Der städtebauliche Vertrag: Möglichkeiten und Grenzen. In:
https://www.haufe.de/recht/deutsches-anwalt-office-premium/der-staedtebauliche-vertrag-moeglichkeiten-und-grenzen-1-allgemeines_idesk_PI17574_HI6997820.html (letzter Zugriff: 22.04.2020).

Building As Material Banks (BAMB) (2018): Circular Building Assessment Prototype
<https://www.bamb2020.eu/post/cba-prototype/> (letzter Zugriff: 23.02.2023)

buildingSMART International Ltd. (2016): Industry Foundation Classes Version 4.2 bDI Candidate Standard. In https://standards.buildingsmart.org/IFC/DEV/IFC4_2/FINAL/HTML/ (letzter Zugriff: 23.02.2023)

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2023): Wissenschaftliche Unterstützung in Einzelfragen des ressourceneffizienten Bauens, http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2015/einzelfragen-ressourceneffizienz/01_start.html (letzter Zugriff: 23.02.2023)

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2023): AutoBuild3D: Teilautomatische Generierung von 3D-Modellen aus 2D-Entwurfszeichnungen mit Methoden des Maschinellen Lernens und des räumlichen Schließens. <https://www.forschung-fachhochschulen.de/fachhochschulen/shareddocs/projekte/de/fhprofunt/autobuild3d.html> (letzter Zugriff: 23.02.2023)

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2015): Studienplan Digitales Planen und Bauen, Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken, Berlin, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf> (letzter Zugriff: 23.02.2023)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. (2011): Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWK) (2020): Das neue Gebäudeenergiegesetz. In: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gebaeudeenergiegesetz-zusammengefasst.pdf?__blob=publicationFile (letzter Zugriff: 21.03.2023)

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2018): 6-Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, online verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/Energieforschung/energieforschung-6-energieforschungsprogramm.html> (letzter Zugriff: 20.03.2018)

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) (2023): Energetische Stadtsanierung. Potenziale auf Quartiersebene nutzen, Berlin. Online verfügbar unter <http://www.energetische-stadtsanierung.info/> (letzter Zugriff: 22.02.2023)

Bundesregierung (2022): Generationenvertrag für das Klima. Online verfügbar: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (letzter Zugriff: 13.02.2023)

Bunzel, A.; Fröhlich v. Bodelschingham, F. und Michalski, D. (2017): Klimaschutz in der verbindlichen Bauleitplanung. In: Deutsches Institut für Urbanistik (difu) (Hrsg.): Endbericht. Berlin.

Darmstadt (2023): Standort. Online verfügbar: <https://www.darmstadt.de/standort/stadtportraet> (letzter Zugriff: 22.02.2023)

Dettweiler, M.; Diepes, Ch.; Spatz, L.; Linke, H. J.; Vogt, J. (2017a): Aktive Innenentwicklung mithilfe von Visualisierung - Teil 1, Flächenmanagement und Bodenordnung, Heft 4, S. 183-188

Dettweiler, M.; Diepes, Ch.; Spatz, L.; Linke, H. J.; Vogt, J. (2017b): Aktive Innenentwicklung mithilfe von Visualisierung - Teil 2, Flächenmanagement und Bodenordnung, Heft 6, S. 275-280

Deutscher Abbruchverband e. V. (2020): im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier, durchgeführt von: Kraff, B. D. & Mack, T. (15.07.2020).

Deutscher Verband für Wohnungswesen, Städtebau und Raumordnung (DV) (2012): Policy Recommendations: Energy efficient urban areas and neighbourhoods - A contribution to liveable and competitive cities. Energy Efficient and Integrated Urban Development Action, Berlin

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (2023): Online verfügbar: www.dibt.de (letzter Zugriff: 23.02.2023)

Diederichsen, L.; Jäger, M.; Linke, H.J.; Müller, T. Nintzel, B.; Trollmann, R.; Wittig, J.; Dell, A. (2023): Innenentwicklung 2.0, Flächenmanagement und Bodenordnung, Heft 3, S. 97-110

DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V (2018): DIN V 18599

Disser, M. (2020): BIM von Bestandsbauwerken: Erarbeitung und Umsetzung von Handlungsempfehlungen zur Ableitung von Modellinformationen aus Bildern von Gebäudehüllen der Wohnbebauung. Masterthesis, TU Darmstadt.

Donath, D.; König, R.; Petzold F. (Hrsg.) (2012): KREMLAS Entwicklung einer kreativen evolutionären Entwurfsmethode für Layoutprobleme in Architektur und Städtebau. Weimar: Verlag der Bauhaus-Universität Weimar.

Eckardt, Frank (Hg.) (2012): Handbuch Stadtsoziologie. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften GmbH.

Egger, M., Hausknecht, K., Liebich, T. und Przybylo, J., (2013): BIM-Leitfaden für Deutschland - Information und Ratgeber - Endbericht – Forschungsprogramm ZukunftBAU. Technischer Report, Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), München. Online verfügbar: <http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/3Rahmenbedingungen/2013/BIMLeitfaden/Endbericht.pdf> (letzter Zugriff: 23.02.2023)

Eigenbetrieb für kommunale Aufgaben und Dienstleistungen (EAD) (2020): Expert*innen Interview im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier, durchgeführt von: Kraff, B. D. & Mack, T. (27.08.2020).

European Commission, DG Environment (2002): Analysis of Selected Concepts on Resource Management, A Study to Support the Development of a Thematic Community Strategy on the Sustainable Use of Resources, March 2002, Online verfügbar:

<https://ec.europa.eu/environment/natres/pdf/cowlstudy.pdf> (letzter Zugriff: 24.02.2023)

Franz, S.; Irmeler, R.; Rüppel, U.; Koch, C. (ed.) (2017): Collaborative BIM Reconstruction on Mobile Consumer Devices. In: 24th International Workshop of the European Group for Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE), 10.-12. Juli 2017, Nottingham, United Kingdom. Digital Proceedings of the 24th International Workshop of the European Group for Intelligent Computing in Engineering

Fraunhofer IBP (2018): District Energy Concept Advisor. Online verfügbar: <http://www.district-eca.com/index.php?lang=de> (letzter Zugriff: 20.03.2018)

Galster, G. C. (1986): What is neighbourhood? In: International Journal of Urban and Regional Research 10 (2), S. 243–263. DOI: 10.1111/j.1468-2427.1986.tb00014.x.

GERTEC GmbH – Ingenieurgesellschaft (2002): Klimaschutzrahmenkonzept für die Stadt Wiesbaden.

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) i. d. F. vom 24. Februar 2012 (BGBl. S. 212).

Google Earth (2023): Luftaufnahmen (letzter Aufruf: 22.02.2023)

HEILMANN SOFTWARE (Hrsg.). (2020): Das neue IBP:18599 – Die Energieberatersoftware!; Online Verfügbar: <https://www.heilmannsoftware.com/de/app/ibp18599/> (letzter Zugriff: 24.02.2023)

Hekmati, B. (2012): Echtzeitpartizipation. Potenziale von sozialen Anwendungen der Kommunikationstechnologien für die Motivation Jugendlicher und junger Erwachsener zur Beteiligung an Partizipationsprozessen in der Stadtentwicklung in Deutschland, Dissertation am Fachbereich Architektur der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt.

Hessische Bauordnung (HBO) vom 28. Mai 2018, zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 22. November 2022 (GVBl. S. 571).

Hessische Gemeindeverordnung (HGO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 7. März 2005.

Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG) (2023): Open Data Einführung von Open Data zum 01.02.2022, <https://hvbg.hessen.de/open-data> (letzter Zugriff: 23.02.2023)

Hessisches Ausführungsgesetz zum Kreislaufwirtschaftsgesetz (HAKrWG) vom 6. März 2013 (GVBl. S. 80), zuletzt geändert durch Artikel 15 des Gesetzes vom 3. Mai 2018 (GVBl. S. 82).

Hochbauamt Wiesbaden (2020): Expert*inneninterview im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier, durchgeführt von: Kraff, B. D. (07.05.2020).

Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung (ILS) (2017): Konzepte der Quartiersforschung im Überblick. Neighborhood Trek. Vortrag im Rahmen des Kolloquiums "Multiperspektivische Quartiersforschung". Universität Potsdam. Dortmund. Online verfügbar unter http://www.ils-forschung.de/download/Neighborhood_Trek.pdf , (letzter Zugriff: 04.05.2017)

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (Hrsg.). Energiekonzept-Berater für Stadtquartiere. Online verfügbar: <https://www.district-eca.de/index.php?lang=en> (letzter Zugriff: 24.02.2023)

International Energy Agency Energy in Buildings and Communities Programme (EBC) (2023): The EBC Research Programme. IEA. Online verfügbar: www.iea-ebc.org/ebc (letzter Zugriff: 22.02.2023)

Irmeler, R.; Eller, C.; Rüppel, U. (2016a): A Next Generation Platform for Building Energy Modeling Based on Smart Metering Data, Point Cloud Scans, GIS and Building Typology. In: 23rd EG-ICE International Workshop, 29. Juni - 01. Juli 2016, Krakau, Polen. Proceedings of the 23rd International Workshop of the European Group for Intelligent Computing in Engineering

Irmeler, R.; Schwöbel, C.; Rüppel, U. (2016b): Smart Energy Ranking Game to improve energy efficient user behavior based on smart metering data. In: International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE), 06.-08. Juli 2016, Osaka, Japan. Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering

IWU (2017): „Anforderungen an energieeffiziente und klimaneutrale Quartiere“ (EQ) und „Erweiterte Bilanzierung von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen auf Quartiersebene“ (EQ II). IWU; BBSR. Online verfügbar: <http://www.iwu.de/forschung/integrierte-nachhaltige-entwicklung/eq/> (letzter Zugriff: 27.09.2017)

Kaiser, O.S., Kraus, O. (2015): Systemische Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen, VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 12, Verein Deutscher Ingenieure, Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE); Online verfügbar: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Kurzanalysen/VDI-ZRE_Kurzanalyse-12_Web.pdf (letzter Zugriff: 24.02.2023)

Kanzlei für Verwaltungsrecht (2020): Expert*inneninterview im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier und einer Masterthesis, durchgeführt von: Schütz, J. (07.05.2020).

Karatas, A., El-Rayes K., (2014): Evaluating the performance of sustainable development in urban neighborhoods based on the feedback of multiple stakeholders. In: Sustainable Cities and Society 14, S. 374–382. DOI: 10.1016/j.scs.2014.05.011

KERN INGENIEURKONZEPTE (Hrsg.). (2020): DÄMMWERK Bauphysik- und EnEV-Software für EnEV- und EEWärmeG-Nachweise, für die Energieberatung, die DIN V 18599 und KfW-Förderanträge sowie für bauphysikalische Berechnungen. Online verfügbar: <https://www.bauphysik-software.de/de-de/> (letzter Zugriff: 24.02.2023)

Kiefhaber, P. (2015): Wasser und Abfall * Band 17, Heft 4, Seite 42-47

Klauß, S. (2010): Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit. Kassel.

Kleemann, F., Lehner, H., Szczypińska, A., Lederer, J., Fellner, J. (2018): Bewertung von Abfallströmen aus Gebäudeabbrüchen in Wien auf Grundlage von Bildmatchingbasierter Veränderungsdetektion. Österr Wasser- und Abfallw 70, 138–146. <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0463-y> (letzter Zugriff: 08.02.2023)

Kleemann, F. et al. (2016): A method for determining buildings' material composition prior to demolition, Building Research & Information, 44:1, 51-62, doi: 10.1080/09613218.2014.979029 (print version from 2016)

Klimaschutzagentur Wiesbaden (2020): Expert*inneninterview im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier, durchgeführt von: Kraff, B. D. & Siedlecki, B. (07.05.2020).

König, Holger; Mandl, Wolfgang (2013): SIRADOS Bauteilkatalog Altbau für Wohngebäude: Bausubstanz sicher beurteilen; Maßnahmen wirtschaftlich entscheiden; Altbaukonstruktionen erfolgreich instand setzen und modernisieren. Kissing: WEKA-Media.

Kovacic, I., Honic, M., Rechenberger, H., et al (2018): BIMaterial: Prozess-Design für den BIM-basierten, materiellen Gebäudepass. Wien. Eigenverlag. Online verfügbar: <http://hdl.handle.net/20.500.12708/24562> (letzter Zugriff: 23.02.2023)

Kraff, B. D. (2019): Bedeutung der Projektkommunikation und der Partizipation für die Umsetzung großräumiger Bauvorhaben. Analyse eines Beteiligungsprozesses am Beispiel eines städteübergreifenden Infrastrukturprojekts. Masterthesis, TU Darmstadt.

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LUBW) (2001): Abbruch von Wohn- und Verwaltungsgebäuden. Handlungshilfe. Karlsruhe.

Langhagen-Rohrbach, Christian (2005): Raumordnung und Raumplanung. Geowissen kompakt, Darmstadt.

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR): Informationssystem Gebaute Umwelt. Online verfügbar: <http://ioer-bdat.de/> (letzter Zugriff: 06.02.2023)

Leifgen, C.; Rüppel, U.; Kuhn, T. E.; Teizer, J. (2016): BIM-based Collaboration Platform for the Holistic Integration of Energy Active Façade Components. In: International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE), 06.-08. Juli 2016, Osaka, Japan. Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering

Lichtmeß, M. (2020): Energie Visionen. Energiebilanz ganz einfach. Online. Verfügbar: <https://www.enec.de/page/EnerCalC/index.html> (letzter Zugriff: 24.02.2023)

Linke, H. J. (2016): Städtebauliche Bodenordnung - Beitrag zu einer flächeneffizienten und ressourcenschonenden Raum- und Siedlungsstruktur. In: W. Freedon, R. Rummel (Hrsg.): Handbuch Geodäsie, Band „Städtebau, Bodenordnung und Landmanagement“, Springer Reference Naturwissenschaften, Springer Berlin Heidelberg, DOI 10.1007/978-3-662-46900-2_88-1

Ludwigshöhviertel (2023): Das Ludwigshöhviertel. Online verfügbar: <https://www.ludwigshoehviertel.de/> (letzter Zugriff: 22.02.2023)

Mack, T.; Scheich, P.; Koch, B.; Schebek, L. (2021): Informationstiefenabhängige BIM-Rekonstruktion auf Basis von synthetischen Quartiers- und Gebäude- sowie Produkt- und Materialdaten. In: 32. Forum Bauinformatik 2021: Kapitel 7 Machine Learning und künstliche Intelligenz (S299 ff.)

Madaster Germany (2022): Madaster Material Passport, Online verfügbar: <https://madaster.de/material-passport/> (letzter Zugriff: 02.03.2022)

Martini J. et al., (2016): Energy storage for residential dwellings. Methodology to improve energy efficiency and habitability. In: Journal of Energy Storage 8, S. 99–110. DOI: 10.1016/j.est.2016.09.009

Meinel, G. (2015): Indicators in Buildings. Online verfügbar: <http://www.ioer-monitor.de/indikatoren/gebäude/> (letzter Zugriff: 18.09.2018)

Michel, P., Serrand, M., Montfort-Climent, D., Jayr, E., Papinot, P. E., (2012): Projet ANR ASURET: Analyse de flux de matière du secteur de la construction à l'échelle de l'ouvrage et du territoire. Online verfügbar: <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61849-FR.pdf> (letzter Zugriff: 23.02.2023)

Möller, L. K. (2017): Detektion von Raumgrundrissen in Gebäude-Punktwolkendaten auf mobilen Endgeräten. In: 29. Forum Bauinformatik, 06.-08. September 2017, Dresden. In: Berichte aus der Bauinformatik

Motzko C., Klingenberger J., Wöltjen J., Löw D., (2013): Bewertungsmatrix für die Kostenplanung beim Abbruch und Bauen im Bestand, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN: 978-3-8167-9624-4

Nonnenmacher, A. (2007): Eignen Sich Stadtteile Für Den Nachweis Von Kontexteffekten? KZfSS Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, 59(3), 493–511.

Ortssatzung über die Kreislaufwirtschaft im Gebiet der Landeshauptstadt Wiesbaden (Kreislaufwirtschaftssatzung).

Petkova, P. J., (2016): Digitales Urban Mining von Gebäuden: Entwicklung informationstiefenabhängiger Ressourcenpässe, Dissertation, Shaker Verlag, Aachen

Petkova, P. J.; Rüppel, U. (2014): A graph-based prediction method for electrical wiring in old residential buildings as a part of BIM for Urban Mining purposes. In: Proceedings of the 10th European Conference on Product & Process Modeling (ECPPM), Wien, Österreich, 17.-19. September 2014, ISBN 978-1-138-02710-7.

planen-bauen 4.0, Gesellschaft zur Digitalisierung des Planens, Bauens und Betriebens mbH (2023): BIM-basierter Bauantrag; Online verfügbar: <https://planen-bauen40.de/bim-basierter-bauantrag/> (letzter Zugriff: 23.02.2023)

Projektträger Energie, Forschungszentrum Jülich, pro:21 GmbH (2013): Case Studies and Guidelines for Energy Efficient Communities – A Guidebook on Successful Urban Energy Planning, ISBN: 978-3-8167-9122-5, Fraunhofer IRB_Verlag

Projektträger Jülich (2023): Forschungsinitiative ENERGIEWENDEBAUEN. Online verfügbar: <https://projektinfos.energiewendebauen.de/landing/> (letzter Zugriff: 22.02.2023)

RessStadtQuartier (RSQ) (2023): Wiki, Online verfügbar: <https://ressourceneffiziente-stadtquartiere.de/?lang=de> (letzter Zugriff: 02.03.2022)

Ristimäki M. et al., (2013): Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design. In: Energy 63, S. 168–179. DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.030

Rüppel, U.; Zwinger, U.; Kreger, M. (2015): BIM und Sensorik im Brandschutz. In: Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (Hrsg.): Building Information Modeling – Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. VDI-Buch, Springer Verlag, ISBN 978-3-658-05605-6, S. 397-406

Salheiser, A. (2014): Natürliche Daten: Dokumente. In: Baur, N., Blasius, J. (Hrsg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Berlin, Bonn: Springer Vieweg, 813-827.

Satzung über die Fernwärmeversorgung in der Landeshauptstadt Wiesbaden
(Fernwärmesatzung)

Schebek, L.; Linke, H.-J. (2021): Der Gebäudebestand als Rohstofflager: Der Beitrag der Digitalisierung für ein zukünftiges regionales Stoffstrommanagement im Baubereich; in: Mertens, A., Ahrend, K.-M., Kopsch, A., Stork, W. (Hrsg.): Smart Region – Die digitale Transformation einer Region nachhaltig gestalten, Gabler Verlag, Wiesbaden

Scheiner, Joachim (2000): Eine Stadt - zwei Alltagswelten? Unter Mitarbeit von FID GEO: Reimer Verlag Berlin.

Schiller, G, et al. (2010): Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. UBA-Texte 52/2010. Online verfügbar:

<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4040.pdf> (letzter Zugriff: 24.02.2023)

Schiller, G., Ortlepp, R., Krauß, N., Steger, S., Schütz, H., Fernandez, J.A., Baumann, J., (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. UBA-Texte 83/2015. Online verfügbar :

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kartierungdes-anthropogenen-lagers-in-deutschland> (letzter Zugriff: 23.02.2023)

Schnell, R., Hill, P. B., Esser, E. (2008): Methoden der empirischen Sozialforschung. München: Oldenbourg. Verlag, 8. Aufl.

Schnepf-Orth, M.; Staubach, R. (1989): Bewohnerorientierte Stadterneuerung. Erfahrungen aus Beispielfällen ortsnaher Beratungs- und Kommunikationsstellen. ILS-Schriftenreihe (Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung), Bd. 27, Dortmund.

Schnur, Olaf (2014): Quartiersforschung. Zwischen Theorie und Praxis. 2. Auflage. Dordrecht: Springer.

Schwöbel, C.; Irmeler, R. (2015): SmartER Game – eine Gamifizierung des Energieverbrauchs privater Haushalte. In: 27. Forum Bauinformatik, 21.-23. September 2015, Aachen. In: Berichte aus der Bauinformatik, 27. Wichmann, VDE Verlag, Berlin

Selle, K. (1994): Was ist bloß mit der Planung los?, Dortmund.

Spielmann, M. (2017): Wärmewende im Quartier: Strategien zur Energieversorgung des deutschen unsanierten Wohngebäudebestandes. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.

Spielmann, M. (2018): Wärmewende im Quartier: Strategien zur Energieversorgung des deutschen unsanierten Wohngebäudebestandes: ganzheitliche Bewertung aus energetischer, ökonomischer und klimatischer Sicht. Schriftenreihe IWAR: Bd. 247. Verein zur Förderung des Instituts IWAR der TU Darmstadt e.V.

Stadtplanungsamt Darmstadt (2020): Expert*inneninterview im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier und einer Masterthesis, durchgeführt von: Kraff, B. D. & Schütz, J. (27.07.2020).

STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.). (2020): Bevölkerung und Erwerbstätigkeit. Haushalte und Familien; Ergebnisse des Mikrozensus, 2019. Online verfügbar:
https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/Publikationen/Downloads-Haushalte/haushalte-familien-2010300197004.pdf?__blob=publicationFile (letzter Zugriff: 24.02.2023)

Staubach, R. & Kerchner, G. (1986): Mieterselbsthilfe bei der Hoferneuerung. Dokumentation Dortmunder Beispiele und Untersuchung zur Förderpraxis in 6 weiteren Städten Nordrhein-Westfalens. Wohnungsbau – kommunaler Hochbau, ILS-Schriftenreihe (Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung), Bd. 23.3037, Dortmund.

Tiefbau- und Vermessungsamt Wiesbaden (2020): Expert*inneninterview im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier, durchgeführt von: Kraff, B. D.; Bourgoïn, A. & Scheich, P. (28.05.2020).

Umweltamt Darmstadt (2020): Expert*inneninterview im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier, durchgeführt von: Kraff, B. D. & Siedlecki, B. (02.09.2020).

Umweltamt Wiesbaden (2020a): Expert*inneninterview im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier, durchgeführt von: Kraff, B. D. & Bourgoïn, A. (26.05.2020).

Umweltamt Wiesbaden (2020b): Expert*inneninterview im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier, durchgeführt von: Kraff, B. D. & Siedlecki, B. (15.06.2020).

Umweltamt Wiesbaden (2020c): Expert*inneninterview im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier, durchgeführt von: Kraff, B. D. & Siedlecki, B. (01.07.2020).

Umweltamt Wiesbaden (2020d): Expert*inneninterview im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier, durchgeführt von: Kraff, B. D. & Siedlecki, B. (30.07.2020).

Universität des Saarlandes (2020): Verfassungsrechtliche Rechtfertigung von Grundrechtseingriffen. Online verfügbar: https://www.uni-saarland.de/fileadmin/user_upload/Professoren/fr11_ProfGroepf/lehre_nur_Pdfs/_lehre13/Folien_GR/GR05.pdf (letzter Zugriff: 06.03.2020)

VDI 4800 Blatt 1: „Ressourceneffizienz –Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien“

Vermessungsamt Darmstadt (2020): Expert*inneninterview im Rahmen des Projekts RessStadtQuartier, durchgeführt von: Kraff, B. D., Wacker, M. & Scheich, P. (17.06.2020).

Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV) vom 10. Dezember 2001 (BGBl. I S. 3379), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2644) geändert worden ist.

Verwaltungsrecht Studium (2020): Das Bestimmtheitsgebot. Online verfügbar:
<https://verwaltungsrecht-studium.de/bestimmtheitsgebot-anforderungen/> (letzter Zugriff: 06.03.2020)

Walberg, D. & Gniechwitz, T. (2016): Wohngebäude - Fakten 2016: Eine Analyse des Wohngebäudezustandes in Deutschland. Mitteilungsblatt der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e. V: 253 Heft 1/2016. Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen.

Weißmann, C. (2017): Effizienter Einsatz erneuerbarer Energieträger in vernetzen Wohnquartieren. Dissertation. Technische Universität Darmstadt

Wiesbaden (2023a): Lebendige Zentren Innenstadt-West. Online verfügbar:
<https://www.wiesbaden.de/leben-in-wiesbaden/planen/staedtebauliche-projekte/innenstadt-west/innenstadt-west.php> (letzter Zugriff: 22.02.2023).

Wiesbaden (2023b): Sozialer Zusammenhalt Biebrich-Mitte. Online verfügbar:
<https://www.wiesbaden.de/leben-in-wiesbaden/planen/wohnen/stadterneuerung/sozialer-zusammenhalt-biebrich-mitte/sozialer-zusammenhalt-biebrich-mitte.php> (letzter Zugriff: 22.02.2023).

Wiesbaden (2023c): Gräselberg. Online verfügbar:
<https://www.wiesbaden.de/microsite/stadtlexikon/a-z/Graeselberg.php> (letzter Zugriff: 22.02.2023).

Wiesbaden (2023d): Kultur. Online verfügbar:
<https://www.wiesbaden.de/kultur/stadtgeschichte/kompakt/index.php> (letzter Zugriff: 22.02.2023).

Wittmer, D. (2006): Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt, ETH Zürich, vdf Hochschulverlag.

Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (ZUB) (2010): Deutschlandkarte Altbaumaterialien und -Konstruktionen. Online verfügbar: <http://www.altbaukonstruktionen.de/> (letzter Zugriff: 23.02.2023)

Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (ZUB) (2009): Erfassung regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten. Kassel.

