

Einfach Um-Bauen

Konzepte für das robuste Sanieren von Wohngebäuden - CO₂-Reduktion ohne Steigerung der Warmmiete

Technische Universität München

Lehrstuhl für Entwerfen und Konstruieren:

Tilmann Jarmer, Anne Niemann, Ana Sammeck, Florian Nagler, Julia Reichelt

Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen:

Annalena Veit, Thomas Auer, Clemens Britsch, Junfeng Xiao

Professur für Entwerfen, Umbau und Denkmalpflege:

Valerie Kronauer, Andreas Hild, Johanna Müller

Hochschule Bochum

Lehrgebiet Entwerfen und Konstruieren/Nachhaltiges Bauen:

Matthäus Nowak, Jutta Albus,

Das Forschungsprojekt entstand in Kooperation mit folgenden Drittmittelgebern:



DJH-Landesverbände Unterweser-Ems, Westfalen- Lippe und Bayern



Münchner Wohnen



B&O Gruppe.

München, den 17.09.2025

Einfach Um-Bauen

Konzepte für das robuste Sanieren von Wohngebäuden - CO₂-Reduktion ohne Steigerung der Warmmiete

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-23.26

Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung	VI
Abstract	VII
1. Einführung	1
1.1. Problemstellung	1
1.2. Stand der Forschung	1
1.3. Forschungslücke	2
1.4. Entwicklungsbedarf	2
1.5. Zielstellung	3
2. Projektverlauf	4
2.1. Koordination und Forschungsdesign	4
2.2. AP 2 Typologie und Weiterbau	6
2.2.1. Recherche Referenzgebäude	6
2.2.2. Kriterien zur Repräsentantenfindung	6
2.2.3. Identifikation und Eingrenzung der Quellen	7
2.2.4. Gebäudeauswahl und Beschreibung	10
2.2.5. Szenarien	13
2.3. AP 3 Digitale Planungsprozesse	15
2.3.1. Einleitung	15
2.3.2. Datenmanagement im Bestand	16
2.3.3. Datenqualität & Zielformulierung	28
2.3.4. Digitale Planungsstrategien	34
2.3.5. Datenmanagement im Bestandsprojekten	35
2.4. AP 4 Architektur/Baukonstruktion	44
2.4.1. Baukonstruktion der Repräsentanten	45
2.4.2. Energetischer Standard der Repräsentanten	55
2.4.3. Untersuchte Sanierungs-Varianten	59
2.5. AP 5 Raumklima und Energie	65
2.5.1. Datengrundlage	65
2.5.2. Robuste Gebäudetechniksysteme für die Einfach Um-Bauen Typologien	69
2.5.3. Erstellung von Varianten und Berechnungen mittels thermisch dynamischer Gebäudesimulation	80
2.5.4. Ergebnisse der thermisch dynamischen Simulationen	86
2.5.5. Ergebnisse der „Wärmepumpen-Ready“ Untersuchung	88
2.5.6. Fazit Raumklima und Energie	91

2.6. AP 6 Ökologische und ökonomische Bewertung	93
2.6.1. Nutzerprofil	93
2.6.2. Lebenszyklusbetrachtung	94
2.6.3. Investitionskosten	95
2.6.4. Graue Emissionen	95
2.6.5. Energieeffizienz	95
3. Ergebnisse	97
3.1. Baualtersklasse 1 (BAK 01), 1950 – 1956	97
3.2. Weitere Baualtersklassen	110
4. Fazit	114
4.1. Nutzbarkeit der Ergebnisse	114
4.2. Bewertung der Ergebnisse	115
4.3. Abgleich mit vergleichbaren Studien	116
4.4. Perspektive Warmmiete	117
4.5. Empfehlung für Förderrichtlinien	118
4.6. Nutzen für die Praxis des Deutschen Jugendherbergswerk	120
Literaturverzeichnis	121
Abbildungsverzeichnis	126
Tabellenverzeichnis	131

Kurzbeschreibung

Die Senkung des Energiebedarfs im Wohnungsbestand Deutschlands ist eine zentrale Aufgabe der nächsten Jahre. Dazu muss die Sanierungsquote rasch gesteigert werden. Hierfür werden kostengünstige und materialsparende Lösungen benötigt.

In einer umfassenden Untersuchung wird der Lebenszyklus typischer Bestandswohngebäude analysiert. Dabei werden die graue Energie der Sanierungsmaßnahmen sowie standortspezifische Energieversorgungsoptionen, berücksichtigt. Ebenfalls einbezogen wird das Performance Gap, also die Abweichung zwischen berechnetem Energiebedarf und tatsächlichem Verbrauch im Betrieb.

Dieser Methode liegt die These zugrunde, dass sich durch diese ganzheitliche Betrachtung Sanierungslösungen finden lassen, die in der Praxis den Energiebedarf wirksam senken, weniger kosten und trotzdem im Vergleich zu einer EH55-Sanierung genauso viel CO₂ einsparen. Vier Repräsentanten aus dem Bestand der Münchner Wohnen (Baujahre 1950–1984) wurden detailliert untersucht. Insgesamt wurden 1.140 Sanierungsvarianten analysiert. Berücksichtigt wurden:

- einzelne und kombinierte bauliche Maßnahmen,
- Wechsel der Wärmeerzeugung (Gas, Fernwärme, Wärmepumpe, Pellets),
- Lebenszykluskosten, graue Emissionen,
- energetische Simulation unter realistischen Nutzungsannahmen.

Die Untersuchung zeigt klare Trends bei der energetischen Gebäudesanierung: Der Wechsel des Wärmeerzeugungssystems – insbesondere zu Fernwärme oder Pelletheizungen – erweist sich als die wirtschaftlichste und ökologisch effektivste Maßnahme. Die abnehmende Gebäudekompaktheit und der verbesserte Ausgangsdämmstandard jüngerer Gebäudegenerationen führen zu höheren spezifischen Sanierungskosten und verringern das Einsparpotenzial zusätzlicher Maßnahmen. Umfassende Dämmmaßnahmen auf EH55-Niveau erweisen sich in nahezu allen untersuchten Fällen als unwirtschaftlich. Gebäudespezifisch angepasste Maßnahmenkombinationen bieten das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Abstract

Reducing the energy demand of Germany's residential building stock is a central task for the coming years. To achieve this, the renovation rate must be increased rapidly. This requires cost-effective and resource-efficient solutions.

In a comprehensive study, the life cycle of typical existing residential buildings was analyzed. Both the embodied (grey) energy of renovation measures and the site-specific energy supply options are taken into account. Also taken into account is the *performance gap*—the discrepancy between calculated energy demand and actual energy consumption in operation.

This method is based on the hypothesis that such a holistic approach can lead to renovation solutions that effectively reduce energy demand in practice, cost less, and still save just as much CO₂ as an EH55 (Efficiency House 55) renovation. Four representative buildings from the housing stock of Münchner Wohnen (built between 1950 and 1984) were analyzed in detail. A total of 1,140 renovation variants were evaluated. The following aspects were considered:

- individual and combined structural measures,
- changes in heat generation systems (gas, district heating, heat pumps, wood pellets),
- life cycle costs and embodied emissions,
- energy simulations based on realistic user behavior.

The analysis reveals clear trends in energy-efficient building renovation: Switching the heat generation system—particularly to district heating or pellet heating—proves to be the most economically and ecologically effective measure. Decreasing building compactness and improved baseline insulation in newer building generations lead to higher specific renovation costs and reduce the potential for additional savings. Comprehensive insulation measures to EH55 standards prove to be uneconomical in almost all cases studied. Instead, building-specific combinations of measures offer the best cost-benefit ratio.

1. Einführung

1.1. Problemstellung

Der vom Menschen verursachte Klimawandel bedroht unsere Lebensgrundlagen. Es haben weitverbreitete und schnelle Veränderungen in der Atmosphäre, im Ozean und in der Biosphäre stattgefunden. Der Klimawandel wirkt sich bereits auf viele Wetter- und Klimaextreme in allen Regionen der Welt aus. Dies hat zu weitverbreiteten nachteiligen Folgen und damit verbundenen Verlusten und Schäden für Natur und Menschen geführt. [Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, 2023] Es ist deshalb sinnvoll unsere Lebensweise „im Einklang mit den natürlichen Lebensgrundlagen zu entwickeln.“ [Beck et al, 2024]

In Deutschland hat die Bundesregierung deshalb das Klimaschutzgesetz erlassen [KSG 2019]. Deutschland soll demnach bis 2050 klimaneutral werden. Mit einer Novelle des Gesetzes wurde dieses Ziel noch einmal auf 2045 vorgezogen.

1.2. Stand der Forschung

Um dieses Ziel zu erreichen, soll auch die Energiemenge, die zur Erwärmung unserer Gebäude notwendig ist, reduziert werden. In einer Metastudie hat das Bundesumweltamt die systemischen Herausforderungen der Wärmewende zusammengetragen [Engelmann et al, 2021]. Parallel hat das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) in der Studie „Wege zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes“ [Steinbach et al, 2021] analysiert, wie sich der Gebäudebestand entwickeln muss, um die Klimaziele zu erreichen. Dabei wurden auch steigende CO₂- und Energiepreise, die technologischen Entwicklungen der Wärmeversorgungssysteme, die Entwicklung des Klimas, sowie die Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung modelliert. Sowohl [Engelmann et al, 2021] als auch [Steinbach et al, 2021] kommen zu dem Schluss, dass mit einer Kombination aus ambitionierter Sanierung, Umstellung der Wärmeversorgung und technologischem Fortschritt möglich ist, die Klimaziele zu erreichen.

1.3. Forschungslücke

Wenn man Gebäude energetisch saniert, entstehen Kosten und Treibhausgase, auch „Graue Emission“ genannt. Durch das Bundesumweltamt wurden verschiedene Gebäudetypen entsprechend untersucht. [Mahler et al. 2019] Dabei wurden eine Volldämmung nach gesetzlichen Mindestanforderungen mit erhöhter Volldämmung für Passivhaus und Nullenergiestandard verglichen. Diese energetische Sanierung wurden mit Technikkonzepten wie Wohnraumlüftung und Photovoltaik auf dem Dach kombiniert.

Allerdings findet weder eine Untersuchung von einzelnen Maßnahmen, wie zum Beispiel das alleinige Dämmen des Kellers oder das Dämmen des Daches statt. Weiterhin wird in der Betrachtung davon ausgegangen, dass die Maßnahmen optimal greifen. Minderleistung durch Technikversagen, fehlerhafte Bauausführung oder nicht ideales Nutzerverhalten werden nicht modelliert. Abweichungen zwischen berechnetem Verbrauch und tatsächlichem Verbrauch werden „Performance Gap“ genannt.

Da diese Effekte nicht zu vernachlässigen sind, wurde inzwischen mehrfach durch Messungen nachgewiesen. [GEWOFAG, 2015] [Knecht & Sigrist 2019] [Loga & Behem 2021] [Walberg & Gniechwitz 2021].

1.4. Entwicklungsbedarf

Neben der Berücksichtigung des Performance Gaps – also dem Effekt der Maßnahmen – gibt es auch bei der Geschwindigkeit der Umsetzung der notwendigen Maßnahmen Abweichungen zwischen den modellierten Szenarien und der tatsächlichen Bautätigkeit. Nach Berechnungen der [dena 2021] soll die jährliche Sanierungsquote bis 2031 auf ca. 1,9 % steigen. In den Jahren 2022 bis 2024 lag die Quote unter 1 % und war in diesem Zeitraum rückläufig. [BuVEG 2025] Trotz einer Stabilisierung des Immobilienmarkts, einem Absinken der Inflationsrate und dem Anstieg der Reallöhne sinkt die Sanierungsquote weiter und man kann eine Investitionszurückhaltung erkennen, so die Studie.

Sanierungsquote für Klimaneutralität [dena 2021]

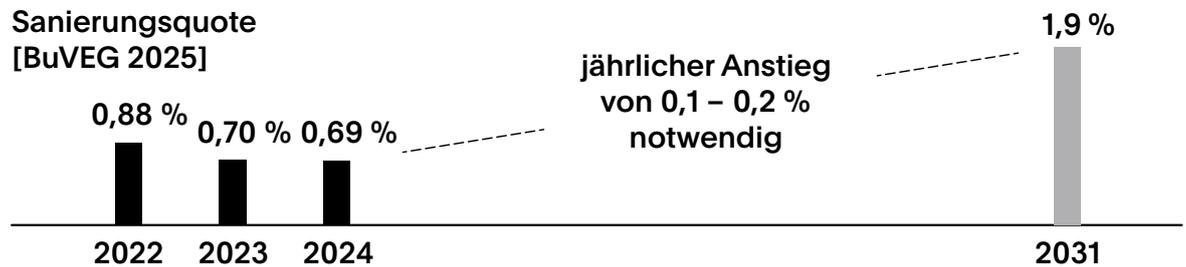


Abbildung 1: notwendige Entwicklung der Sanierungsquote bis 2031

1.5. Zielstellung

Mit Projekt „Einfach Um-Bauen“ soll diese Forschungslücke geschlossen werden. Für Geschosswohnungsbauten der Nachkriegszeit soll systematisch und detailliert auf Gebäudeebene untersucht werden, welche Maßnahmen sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvoll sind. Dabei werden typische Repräsentanten der Nachkriegszeit analysiert, um daraus Rückschlüsse zu ziehen, welche Maßnahmen zur energetischen Sanierung in den Fokus genommen werden sollten. Ziel ist es, mit reduziertem Aufwand, zielgerichteten Planungs- und Datenerhebungsstrategien und schnellen Maßnahmen die Ökobilanz der Gebäude ganzheitlich zu verbessern und gleichzeitig kosteneffizient zu handeln.

2. Projektverlauf

2.1. Koordination und Forschungsdesign

Das Forschungsprojekt „Einfach Um-Bauen“ untersucht die Möglichkeiten einer kostengünstigen und materialsparenden Sanierung von Bestandsgebäuden. Um eine ganzheitliche Betrachtung zu gewährleisten, werden neben den baulichen Maßnahmen auch die vorhandenen Energieversorgungsoptionen, die grauen Emissionen der Sanierung sowie das Performance Gap berücksichtigt.

Mittels thermischer Simulationen wird der tatsächliche Energieverbrauch bewertet. Die zentrale These des Projekts lautet, dass durch eine ganzheitliche Betrachtung energetische Sanierungslösungen gefunden werden können, die kostengünstiger als eine Sanierung nach EH55-Standard sind, dabei jedoch die gleiche CO₂-Einsparung erzielen. Ziel ist es, mit minimalinvasiven und schnell umsetzbaren Maßnahmen eine realistische und effektive Strategie zur Steigerung der Sanierungsquote zu entwickeln. Die Forschungsergebnisse werden abschließend in einem leicht verständlichen Leitfaden für Bauherren, Planer und andere Interessierte aufbereitet.

Das Projekt wird in Zusammenarbeit zwischen der Technischen Universität München (TUM) und der Hochschule Bochum durchgeführt. Die Professur für Entwerfen, Umbau und Denkmalpflege an der TUM trägt zur Einordnung des Begriffs „Umbau“ bei. Auch die Methodik zur Auswahl der Repräsentanten aus dem Gebäudebestand der *Münchner Wohnen* (zuvor *GEWOFAG*) mit über 1000 Gebäuden wurde durch die Professur unter der Leitung von Prof. Andreas Hild entwickelt.

Die Professur für Entwerfen und Konstruieren / Nachhaltiges Bauen (Hochschule Bochum) untersucht, welche Bestandsdaten erhoben werden müssen, um eine fundierte Entscheidungsgrundlage für den Start einer energetischen Sanierung zu schaffen. Prof. Jutta Albus wird für den Leitfaden zudem eine Checkliste entwickeln, die hilft, das Verhältnis von Aufwand und Ertrag bei der Bestandserfassung im Blick zu behalten.

Der Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen (TUM) analysiert die energetischen Auswirkungen der verschiedenen Sanierungsoptionen in der Betriebsphase. Hierfür nutzt Prof. Thomas Auer die Simulations-Software *TRNSYS* mit

der Gebäudemodell-Komponente *TRNBuild*. Zusätzlich setzt sich der Lehrstuhl mit robuster Gebäudetechnik im Sanierungsfall auseinander.

Am Lehrstuhl für Entwerfen und Konstruieren laufen die Ergebnisse zusammen. Die ausgewählten Repräsentanten werden mit einem Set typischer Sanierungsoptionen verknüpft. Für jede mögliche Variante werden die Baukosten und die mit der Sanierung verbundene graue Emission ermittelt. Auf Basis dieser Daten sowie der Verbrauchssimulationen wird eine ökologische und ökonomische Gesamtbilanz bis 2050 erstellt.

Die Ergebnisse sollen es ermöglichen, ökologisch und ökonomisch sinnvolle Sanierungsoptionen zu identifizieren und daraus Pilotprojekte für einfaches Umbauen zu entwickeln. Zudem werden auf Basis der Forschungsergebnisse Empfehlungen für Förderrichtlinien abgeleitet.

In regelmäßigen Besprechungen auf Arbeitsebene sowie mit den Projektpartnern und Förderern wurde die Bearbeitung des Projekts vom Lehrstuhl für Entwerfen und Konstruieren koordiniert. Besonders die Übermittlung und Sichtung der Daten zum Gebäudebestand der Münchner Wohnen (vormals GEWOFAG) erforderte mehrfach Abstimmungen. Nach der Auswahl der Repräsentanten – siehe dazu auch Abschnitt 2.2 – mussten für die Untersuchung notwendige, aber in den übergebenen Daten nicht enthaltene Informationen durch externe Quellen ergänzt werden.

2.2. AP 2 Typologie und Weiterbau

2.2.1. Recherche Referenzgebäude

Die *Münchner Wohnen* (zuvor *GEWOFAG*) übermittelte Mitte Dezember 2023 eine Tabelle mit Daten zu 1096 Gebäuden, welche den Gesamtbestand der *GEWOFAG* darstellt. Das erste Ziel der anschließenden Erhebung war die Identifikation von repräsentativen Modellgebäuden, anhand derer verschiedene Optimierungsmaßnahmen für Gebäudehülle und Wärmeversorgung untersucht werden konnten. Diese – im Projekt als Repräsentanten bezeichneten Gebäude – sollten aufgrund ihrer charakteristischen Merkmale eine hohe Übertragbarkeit auf den Gesamtbestand [der Münchner Wohnen] ermöglichen.

2.2.2. Kriterien zur Repräsentantenfindung

Im ersten methodischen Schritt wurde der Gebäudebestand anhand energierelevanter Kriterien gefiltert, um eine fundierte Analyse der energetischen Potenziale sowie der daraus ableitbaren baulichen Handlungsoptionen zu ermöglichen:

K01: Baujahr 1950–1984 – gemäß Förderantrag; zutreffend auf 403 Gebäude (36,8 % des Gesamtbestands).

K02: Fassade ohne Volldämmung; teilgedämmter Zustand wurde akzeptiert, da dies nur geringe Maßnahmen betrifft; zutreffend auf 283 der 403 Gebäude-Vorauswahl (K01); entspricht 70% der Vorauswahl (K01).

K03: Kellerdecke unsaniert; zutreffend auf 352 der 403 Gebäude-Vorauswahl (K01); entspricht 87% der Vorauswahl (K01).

K04: U-Wert Fenster > 1,3; U-Wert entspricht aktuellen Anforderungen, siehe GEG-Anlage 7, Stand 16.10.23; zutreffend auf 315 der 403 Gebäude-Vorauswahl (K01); entspricht 78% der Vorauswahl (K01).

K05: Zustand Dämmung oberste Geschossdecke nicht ausreichend; gedämmter Zustand wurde akzeptiert, da dieser meist mit 5 cm Dämmstärke angegeben ist und somit nicht den o.g. aktuellen Anforderungen entspricht;

zutreffend auf 279 der 403 Gebäude-Vorauswahl (K01); entspricht 69% der Vorauswahl (K01).

K06: Kein Einzelbaudenkmal – zutreffend auf 401 der 403 Gebäude der Vorauswahl (K01); entspricht 99,5 % der Vorauswahl (K01).

K07: Kein Ensembleschutz – zutreffend auf 393 der 403 Gebäude der Vorauswahl (K01); entspricht 97,5 % der Vorauswahl (K01).

2.2.3. Identifikation und Eingrenzung der Quellen

Nach Anwendung dieser Kriterien umfasste die Vorauswahl 151 Gebäude, die anschließend in vier Baualtersklassen (kurz: BAK) gruppiert wurden. Der Begriff „Baualtersklasse“ bezeichnet die systematische Einteilung von Gebäuden nach dem Zeitpunkt ihrer Errichtung bzw. wesentlichen baulichen Veränderung. Diese Klassifizierung dient dazu, typische Merkmale hinsichtlich Bauweise, energetischer Qualität und technischer Ausstattung zu erfassen, die für bestimmte Bauperioden charakteristisch sind [BAnz, 2020]. In der Deutschen Gebäudetypologie des Instituts Wohnen und Umwelt (kurz: IWU) bildet die Baualtersklasse die Grundlage für die energetische Analyse des Wohngebäudebestands. Sie basiert auf historischen Entwicklungen, statistischen Erhebungen und bauordnungsrechtlichen Änderungen wie z. B. Wärmeschutzverordnungen [IWU, 2015]. Auch im Rahmen europäischer Projekte wie TABULA1, EPISCOPE2 und MOBASY3 wurde das Konzept der Baualtersklassen

¹ IWU-Projekt „Typology Approach for Building Stock Energy Assessment – TABULA“, (2009-2012) gefördert durch das EU-Programm „Intelligent Energy Europe“ und die Forschungsinitiative „ZukunftBau“.

² IWU-Projekt „Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stock – EPISCOPE“, (2013-2016) gefördert durch das EU-Programm „Intelligent Energy Europe“.

³ IWU-Projekt „Modellierung der Bandbreiten und systematischen Abhängigkeiten des Energieverbrauchs zur Anwendung im Verbrauchscontrolling von Wohngebäudebeständen – MOBASY“ (2017-2022), gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.

verwendet, um vergleichbare energetische Bewertungen von Wohngebäuden zu ermöglichen.

Die hier vorgenommene Eingrenzung orientiert sich an einschlägigen gesetzlichen Vorgaben, technischen Verordnungen sowie den baulichen Entwicklungen im Gebäudebestand der Münchner Wohnen.⁴ Die daraus abgeleitete Gliederung ermöglicht Rückschlüsse auf charakteristische energetische Kennwerte – etwa Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) von Dächern, Außenwänden oder Fenstern – und schafft damit die Grundlage für eine fundierte energetische Bewertung:

BAK 01: 1950-1956; Erstes Wohnungsbaugesetz; DIN 4108

BAK 02: 1957-1968; Zweites Wohnungsbaugesetz; DIN 4109

BAK 03: 1969-1977; Ölkrise; Energieeinsparungsgesetz; Erweiterung DIN 4108

BAK 04: 1978-1984; 1. Wärmeschutzverordnung; 2. Wärmeschutzverordnung

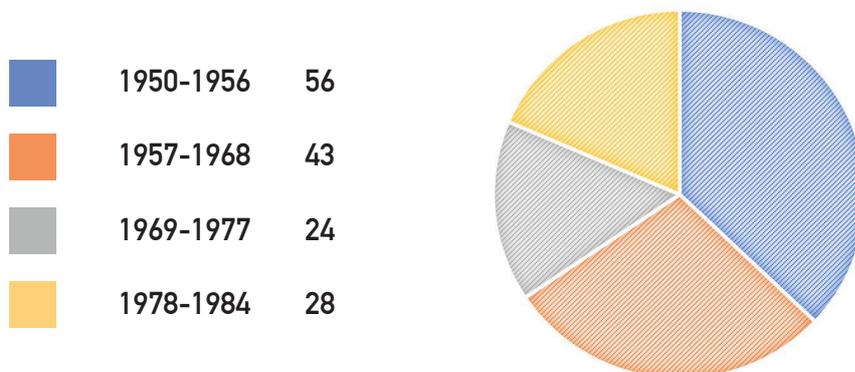


Abbildung 2: Verteilung der Gebäude auf die Baualtersklassen in Bezug auf die Gesamtauswahl der 151 Gebäude.

Die anschließende Typologisierung wurde auf Grundlage numerischer und phänotypischer Merkmale vorgenommen – darunter etwa die Anzahl der

⁴ Anmerkung: Im Gespräch mit der *Münchner Wohnen* (10.01.2024) wurden die angegebenen Baujahreszahlen als Inbetriebnahme bzw. Fertigstellung identifiziert. Die Genehmigung bzw. der Baubeginn lagen tendenziell ein bis zwei Jahre vor angegebenen Jahreszahlen.

Vollgeschosse, die Dachform und -neigung sowie der Öffnungsanteil der Fassade.⁵ Für jedes betrachtete Charakteristikum wurden sowohl die absoluten als auch die prozentualen Häufigkeiten der jeweils vorkommenden Ausprägungen erfasst.

Zur weiteren Feinsortierung wurden zwei zusätzliche Selektionskriterien definiert, um eine konsistente und statistisch repräsentative Auswahl zu gewährleisten:

1. Die ausgewählten Charakteristika mussten in mindestens 50 % der Gebäude einer Baualtersklasse vorkommen, um eine typologische Relevanz im Bestand zu sichern.
2. Die Gebäude wurden mittels digitaler Kartierungsdienste (Google Street View, Google Earth, Apple Maps) einer visuellen Prüfung unterzogen. Es wurden solche Objekte ausgeschlossen, bei denen bereits augenscheinlich energetische Sanierungsmaßnahmen vorgenommen wurden, um den Fokus auf unsanierte, originalgetreue Zustände zu bewahren.

Durch diesen mehrstufigen Auswahlprozess konnte die Ausgangsmenge von 1.096 Gebäuden auf zwölf Repräsentanten reduziert werden, die als Grundlage für die weitere Analyse und Ableitung übertragbarer Transformationsstrategien dient.

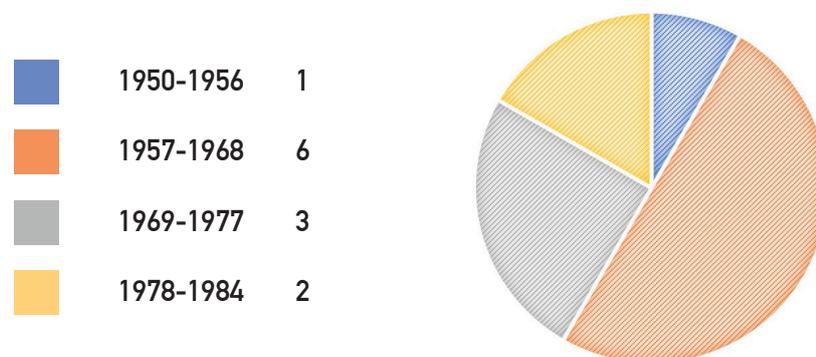


Abbildung 3: Verteilung der zwölf Repräsentanten auf die Baualtersklassen.

⁵ Die Auswahl dieser Merkmale erfolgte vor der Ableitung baulicher Maßnahmen und Handlungsoptionen und umfasst daher auch Merkmale, die sich im Nachhinein als energetisch weniger relevant oder nicht ausschlaggebend erwiesen haben.

2.2.4. Gebäudeauswahl und Beschreibung

Die Auswahl der Objekte erfolgte in enger Abstimmung mit der Münchner Wohnen. Ende Februar 2024 wurde die Auswahl von zwölf potenziell geeigneten Gebäuden an die Münchner Wohnen übermittelt. Parallel dazu erfolgten eine Sichtung und Auswertung der vorliegenden Planunterlagen. Der Rücklauf der Münchner Wohnen ging im März 2024 ein. Es wurde mitgeteilt, dass für einige der vorgeschlagenen Gebäude ein Abriss vorgesehen ist, während bei anderen eine Modernisierung in naher Zukunft geplant sei. Die durch die Münchner Wohnen getroffene Auswahl wurde anschließend mit den Ergebnissen der Sichtung und Analyse der Planunterlagen harmonisiert. Auf dieser Grundlage konnte eine Einigung auf vier geeignete Gebäude erzielt werden:

BAK 01	1950-1956	Claudius-Keller-Straße 44-62
BAK 02	1957-1968	Isareckstraße 49-55
BAK 03	1969-1977	Lindenring 4
BAK 04	1978-1984	Josephsburgstraße 12-16a

Es folgt eine Kurzbeschreibung der Objekte mit Fokus auf ihre formalen Eigenschaften. Ergänzende Beschreibungen zu Konstruktion und Energie sind den Kapiteln 2.4 beziehungsweise 2.5 zu entnehmen.

BAK 01, Claudius-Keller-Straße, Baujahr 1950

Das Wohnhaus in der Claudius-Keller-Straße 44-62 ist Teil einer Zeilensiedlung in München-Ramersdorf. Es wurde 1950 nach einem Bebauungsplan von 1939 errichtet, ursprünglich zur Unterbringung von Angehörigen der amerikanischen Luftwaffe.

Die viergeschossige Zeilenbebauung umfasst zehn Häuser mit insgesamt 80 Wohneinheiten. Sie folgt der typischen Bauweise der Nachkriegszeit mit klar gegliederten Strukturen und effizienter Erschließung. Die Dachgestaltung variiert in

Abhängigkeit von der Quartiersausrichtung: Nach Südosten weist sie eine Walmausbildung auf, während zur quartiersinternen Nordwestseite ein Satteldach ausgeführt wurde. Ursprünglich umfassten die Wohnungen mehr als 100 m², wurden jedoch 1968 für die Allgemeinbevölkerung in kleinere 2-Zimmer-Küche-Bad-Wohnungen umstrukturiert. Die Erschließung erfolgt über rückseitig angeordnete, schlichte Eingangstüren aus Holz mit Glaseinsatz, die ohne Vordach auskommen. Die natürlich belichteten Treppenhäuser sind im Zweispänner-Prinzip organisiert. Die Fassade ist in blaugrauem Putz mit einem farblich abgesetzten Sockel gehalten und als Lochfassade mit einer klaren Rasterstruktur ausgeführt. Ab dem zweiten Obergeschoss ergänzen Erker die zur Straße orientierten Wohnräume. Das Gebäude stellt ein typisches Beispiel der funktionalen und wirtschaftlichen Bauweise der 1950er-Jahre dar, die primär auf schnelle Wohnraumschaffung ausgerichtet war.

BAK 02, Isareckstraße 49-55, Baujahr 1966

Das Wohnhaus in der Isareckstraße 49-55 wurde 1966 als eines von zwei baugleichen Zeilenbauten in München-Ramersdorf errichtet. Die Umgebung ist durch eine heterogene Bebauung aus Zeilenbauten und Hochhäusern der 1950er- bis 1970er-Jahre geprägt. Der fünfgeschossige Zeilenbau mit Satteldach umfasst vier Häuser mit insgesamt 45 Wohneinheiten. Die südliche Giebelfassade orientiert sich zur Straße, während die längeren Gebäudeseiten entlang der Freiflächen und benachbarten Wohnbauten verlaufen. Die Erschließung erfolgt über die Ostfassade, die an eine gemeinschaftlich genutzte Grünfläche mit Wäschebereichen, Spielplatz und zentralem Müllhaus anschließt. Die Hauseingänge sind als filigrane Messing-Glas-Portale ausgebildet und führen in natürlich belichtete Treppenhäuser. Die meisten Treppenhäuser sind als Zweispänner organisiert und erschließen je Etage zwei Wohnungen mit drei oder vier Zimmern, Küche und Bad. Eine Ausnahme bildet die Hausnummer 55 mit einem Dreispänner, der pro Geschoss zwei 4-Zimmer- sowie eine 2-Zimmer-Wohnung umfasst. Alle Wohnungen verfügen über eine nach Westen ausgerichtete Loggia, die direkt an den Wohnraum anschließt. Einzig die 2-Zimmer-Wohnung im Dreispänner besitzt stattdessen ein bodentiefes Fenster mit französischem Balkon. Die Fassaden sind in gelbem Putz gehalten und durch einen farblich abgesetzten Sockel gegliedert.

BAK 03 Lindenring 4, Baujahr 1971

Das Wohnhaus am Lindenring 4 in Taufkirchen wurde 1971 als eines von vier nahezu identischen Punkthochhäusern errichtet. Es ist Teil der Großsiedlung „Am Wald“, die ab Ende der 1960er Jahre südöstlich von München entstand. Das Gebäude umfasst 13 Vollgeschosse mit insgesamt 52 Wohneinheiten auf einer Grundfläche von circa 436 m². Je Etage befinden sich zwei 3-Zimmer-Wohnungen sowie jeweils eine 4-Zimmer- und eine 1-Zimmer-Wohnung. Alle Wohnungen verfügen über ein innenliegendes Bad, eine separate Abstellkammer sowie umlaufende, wohnungseigene Außenbereiche, welche von sämtlichen Wohnräumen aus betreten werden können. Die geschossweise Erschließung erfolgt über einen zentralen Mittelgang mit zwei Aufzügen. Ein separates Fluchttreppenhaus ist geschossweise über eine Loggia zugänglich, jedoch nicht direkt mit dem Flur verbunden. Das Punkthochhaus zeichnet sich durch seine extrudierte Grundrissform aus. Die vorgefertigten Fassadenelemente integrieren teils schmale Über-Eck-Balkone sowie charakteristische Pflanzenkübel, die direkt in die Betonteile eingebunden sind. Die Fassade besteht aus geschlossenen Bereichen mit Waschbetonplatten in Kombination mit farblich akzentuierten Fensterzonen, wodurch eine strukturierte und lebendige Gebäudeerscheinung entsteht.

BAK 04 Josefsburgstraße 12-16 a, Baujahr 1982

Das Wohnhaus in der Josefsburgstraße 12-16a wurde 1982 in München-Ramersdorf errichtet. Die Anlage bildet einen nach Norden offenen Hof und wird von zwei zeitgleich errichteten Gebäuden flankiert. Die umliegende Bebauung setzt sich aus einer Kleingartensiedlung, einem ehemaligen Bauernhaus sowie Wohnbauten verschiedener Baualtersklassen zusammen. Die Wohnanlage besteht aus fünf miteinander verbundenen Gebäuden, die sich um einen zentralen Innenhof gruppieren. Die außenliegenden Gebäude (Hausnummern 12, 12a und 16a) sind viergeschossig, während die beiden mittleren (14 und 14a) mit fünf Geschossen höher ausfallen. Die Erschließung erfolgt über fassadenseitig angeordnete Treppenhäuser, die fünfgeschossigen Häuser sind zusätzlich mit Aufzügen ausgestattet. Die Hauseingänge sind durch Pultvordächer mit terracottafarbenen Dachziegeln betont, verfügen über eine halbseitige Glasfassade sowie einen formexpressiven oberen Abschluss.

Insgesamt umfasst die Anlage 44 Wohnungen, die als Zweispänner organisiert sind. Das Wohnungsangebot reicht von 3- bis 5-Zimmer-Wohnungen. Die privaten Außenbereiche sind als Terrassen im Erdgeschoss sowie als Loggien in den Obergeschossen ausgebildet und orientieren sich zur hofabgewandten Seite, während die Erschließung über den Innenhof erfolgt. Unter diesem Innenhof befindet sich eine Tiefgarage. Die Fenster sind einflügelig, zwei- oder dreigeteilt, wobei letztere beiden durch schmale horizontale und vertikale Elemente gegliedert sind.

2.2.5. Szenarien

Im Arbeitspaket 2 „Typologie und Weiterbau“ wurden aus dem Gesamtbestand der Münchner Wohnen vier repräsentative Modellgebäude identifiziert, die exemplarisch für die projektspezifisch definierten Baualtersklassen der Nachkriegszeit (1950–1984) stehen. Die Auswahl erfolgte auf Basis eines mehrstufigen Analyseverfahrens, das energierelevante Kriterien, bauliche Kennwerte sowie visuell überprüfte Erhaltungszustände einbezog. Ziel war es, eine belastbare Grundlage für die differenzierte Übertragbarkeit und Hochrechnung von Transformationsstrategien auf den konkreten Gebäudebestand der Münchner Wohnen zu schaffen.

Durch eine systematische Gebäudetypologisierung und strukturierte Klassifizierung konnten charakteristische energetische Schwachstellen sowie technische Potenziale identifiziert und dokumentiert werden. Die ausgewählten Objekte dienen darüber hinaus als Ausgangspunkt für simulationsgestützte Analysen, auf deren Basis unterschiedliche Sanierungsszenarien entwickelt und bewertet werden. Diese Szenarien berücksichtigen variierende Rahmenbedingungen – etwa energetische Zielvorgaben, wirtschaftliche Machbarkeit oder klimarelevante Anforderungen – und ermöglichen eine fundierte Bewertung der Maßnahmen hinsichtlich ihrer ökologischen und ökonomischen Wirkung

Die Erkenntnisse aus der exemplarischen Analyse der vier Repräsentanten bilden somit die Grundlage für ein übertragbares Maßnahmenkonzept, das gezielt auf den von der GEWOFAG übermittelten Bestand der Münchner Wohnen angewendet werden kann und darüber hinaus einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung eines resilienten, zukunftsfähigen Transformationspfads für den Geschosswohnungsbau der Nachkriegszeit in Deutschland leistet.

Ein Abgleich mit der Deutschen Wohngebäudetypologie [IWU, 2015] zeigt, dass die projektspezifisch ausgewählten Modellgebäude in ihren phänotypischen Merkmalen – wie Geschossanzahl, Dachform oder Vorhandensein von Balkonen – mit den dort beschriebenen Typen der entsprechenden Baualters- und Größenklassen (Mehrfamilienhaus bzw. großes Mehrfamilienhaus) weitgehend übereinstimmen. Diese typologischen Parallelen stützen die Annahme, dass die im Projekt entwickelten Strategien prinzipiell auch auf einen breiteren westdeutschen Gebäudebestand übertragbar sind.

2.3. AP 3 Digitale Planungsprozesse

2.3.1. Einleitung

Obwohl sich mehr und mehr Bauvorhaben in einem bereits bestehenden Kontext abspielen [Hovestadt et al, 2020] und das Bauen im Bestand auch im Hinblick auf ein nachhaltig und ressourcenschonend aufgestelltes Bauwesen von immenser Bedeutung ist, existiert häufig eine große Diskrepanz zwischen Anspruch und Wirklichkeit im Umstand mit dem baulichen Bestand in Deutschland. Dies liegt nicht zuletzt an der unzureichenden Datenlage zum Gebäudebestand, welche als „unbefriedigend“ [BBSR, 2016], lückenhaft und unvollständig bezeichnet werden muss, insbesondere im Bereich einer qualitativen Erfassung der energetischen Zustände der Bauwerke [BBSR, 2016]. Gerade diese Informationen sind jedoch für die Realisierung einer konstanten und fortlaufend hohen Sanierungsquote unerlässlich. Auch wenn die Situation im Wohngebäudebereich als insgesamt positiver einzuschätzen ist [BBSR, 2016], erscheint die Aufgabe aufgrund der knapp 20 Millionen Wohngebäude in Deutschland enorm und das Ziel eines allumfassenden, zentralen und fortlaufend aktualisierten Gebäuderegisters [BBSR, 2016] in weite Ferne. Zudem erschweren die bestehenden rechtlichen Rahmenbedingungen eine effiziente und vollständige Datenerfassung bzw. eine Zusammenführung bereits vorliegender Daten u.a. bei unterschiedlichen öffentlichen Stellen und/oder Ämtern. Dabei ist grundlegend nur in Kenntnis der besonderen Eigenarten einer jeweiligen, vorgefundenen Bestandssituation eine fundierte Planung möglich. [Cramer et al, 2007] Unzureichende Grundlagen zur Bestandssituation vor Ort führen nicht selten zu steigenden Kosten sowie einer längeren Bauzeit. Sie schließen ebenso häufig – aufgrund fehlender, nicht aktueller oder schlichtweg falscher Daten – zielgerichtete Sanierungs- und Umbaukonzepte von vornherein aus. Dies bildet ein Hemmnis für Immobilieneigentümer*innen, selbst minimale Verbesserungen in Angriff zu nehmen.

All dies spielt sich nun vor dem Hintergrund großer digitaler Transformationsprozesse in Architektur und Bauwesen ab. Seit Anfang der 1980er-Jahre existieren 2D-CAD/CAAD-Programme, seit den 1990er-Jahren 3D-CAD/CAAD-Software. [Hauschild et al, 2010] In den letzten Jahrzehnten richtete sich der Blick dann in Richtung einer objektbasierten Planung – bis zum vollumfänglichen Bauwerks-Informations-Modell, als allumfassenden Projektdatenspeicher - und weiter hin zu „regelbasierten (parametrischen) Softwaretechniken“ [Hauschild et al, 2010]. Der komplexe

Arbeitsprozess, in dem geometrische, räumliche und technische Daten zusammengeführt, analysiert, optimiert und ihr Output simuliert werden [Marble, 2012], ist heute – bis zur Weitergabe der Daten an vollautomatisierte Produktionsmaschinen – auch in der Architektur technisch umsetzbar. Dieser ermöglicht durchaus positive Aspekte, wie die Vermeidung von Fehlern und Schnittstellenproblematiken, den effektiven und somit ressourcenschonenden Einsatz von Baumaterialien sowie eine Optimierung von Planungs- und Fertigungsprozessen. Viele dieser digitalen Planungsmethoden bewegen sich dabei im Bereich der Neuplanung und -konzeption von Bauwerken. Doch auch im Bereich des Bauens im Bestand stehen nunmehr vielfältige Anwendungsmethoden zur Verfügung, welche vor zwanzig Jahren noch undenkbar erschienen: seien es neue Methoden der digitalen Erhebung von (geometrischen) Daten am Objekt oder sogar das digitale Abbild eines Bauwerks mit allen nur erdenklichen Informationsebenen.

Obwohl Anwendungen wie 3D-CAD-Software im Bauwesen schon länger technischer Standard sind, kommen viele der digitalen Möglichkeiten in der Realität nicht zum Einsatz: lediglich 35% der Unternehmen im Bausektor haben in den Jahren 2016 bis 2019 Digitalisierungsprojekte durchgeführt [BBSR, 2019], da der Investitions- und Zeitaufwand der Implementierung als zu hoch eingeschätzt wird. Auch müssen wir uns fragen, ob die potenziell vorhandenen Möglichkeiten der digitalen Prozesse tatsächlich per se hilfreich sind, um beim Bauen im Bestand Hemmnisse bei Immobilieneigentümer*innen abzubauen und somit schlussendlich die Umsetzung von zielgerichteten Sanierungsmaßnahmen voranzutreiben. Es stellt sich konkret die Frage nach dem Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag/Zieldefinition. So widmet sich dieses Kapitel dem Umgang mit teils diffusen und komplexen Datenmengen beim Bauen im Bestand, der Frage nach Möglichkeiten der Aufarbeitung der zur Verfügung stehenden (häufig analogen) Bestandsinformationen sowie ihrer sinnvollen Ergänzung und Vervollständigung hin zur einer belastbaren Datenbasis zur Klärung der entwickelten Sanierungsszenarien eines „einfachen“ Umbaus.

2.3.2. Datenmanagement im Bestand

Zum Einstieg in das Forschungsprojekt fand eine tiefgreifende Auseinandersetzung mit den grundlegenden Themen als Literatur- und Internetrecherche zum Stand der Technik im Umgang mit Bestandsbauten statt. Diese erste Recherchephase wurde bewusst offen und thematisch breit gefächert durchgeführt und mündete in der

Aufstellung eines umfangreichen Quellen- und Literaturverzeichnisses, welches in drei übergeordnete Themen gegliedert wurde: „Digitalisierung im Bauwesen“, „Bauen im Bestand“ sowie „Datenerhebung und -aufnahme im Bestand“. Parallel hierzu erfolgte die Zusammenstellung eines Glossars. Im nächsten Schritt wurden diejenigen Quellen näher betrachtet, welche sich bei der ersten Durchsicht als thematisch passend zur Aufgabe und den damit einhergehenden Fragestellungen dargestellt haben; diese wurden um eine Recherche zu Forschungsprojekten, Start-Up-Gründungen, usw. ergänzt, welche (noch) nicht den aktuellen Stand der Technik bei der Bestandserfassung (am Plan/Dokument und/oder am Objekt) bzw. der Aufarbeitung und/oder Digitalisierung bereits vorhandener Daten darstellen, jedoch einen möglichen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen aufzeigen könnten.

Ausgehend von dieser einleitenden Recherchephase wurden die beiden entscheidenden Datenquellen für eine gesamtheitliche Planungsstrategie im Bestand definiert, näher betrachtet und - im Hinblick auf die Relevanz für das Forschungsprojekt sowie darüber hinaus für den praxistauglichen Einsatz in der Breite – bewertet: die Zusammenstellung, Aufarbeitung, Nutzbarmachung und Bewertung bereits bestehender Daten („Ist“-Daten) sowie die Vervollständigung dieser Daten u.a. durch die (analoge und digitale) Datenerfassung am Objekt („Kann“-Daten).

Das Bauen im Bestand unterscheidet sich fundamental von der Neukonzeption und -errichtung von Bauwerken, sowohl in den allgemeinen Rahmenbedingungen als auch in den spezifischen Anforderungen. Beim Umgang mit Bestandsbauten sind die vorherrschenden Gegebenheiten zu berücksichtigen; so steht am Anfang jeglicher Auseinandersetzung mit dem jeweiligen Objekt die „systematische Erfassung und Erkundung des Bestands“ [Cramer et al, 2007]. Dabei lassen sich zwei grundlegende Datenquellen erkennen: die bereits vorliegenden Bestandsdaten, welche als „Ist“-Daten in unterschiedlichster Form, Inhalt (geometrische, technische, usw. Informationen), Qualität und Aktualität an diversen Orten (Eigentümer*innen, Ämter, Archive, usw.) vorliegen, sowie die „Kann“-Daten, welche zusätzlich (am Objekt) erhoben bzw. angenommen werden können, um den bestehenden Datensatz zu vervollständigen, zu aktualisieren bzw. abzugleichen.

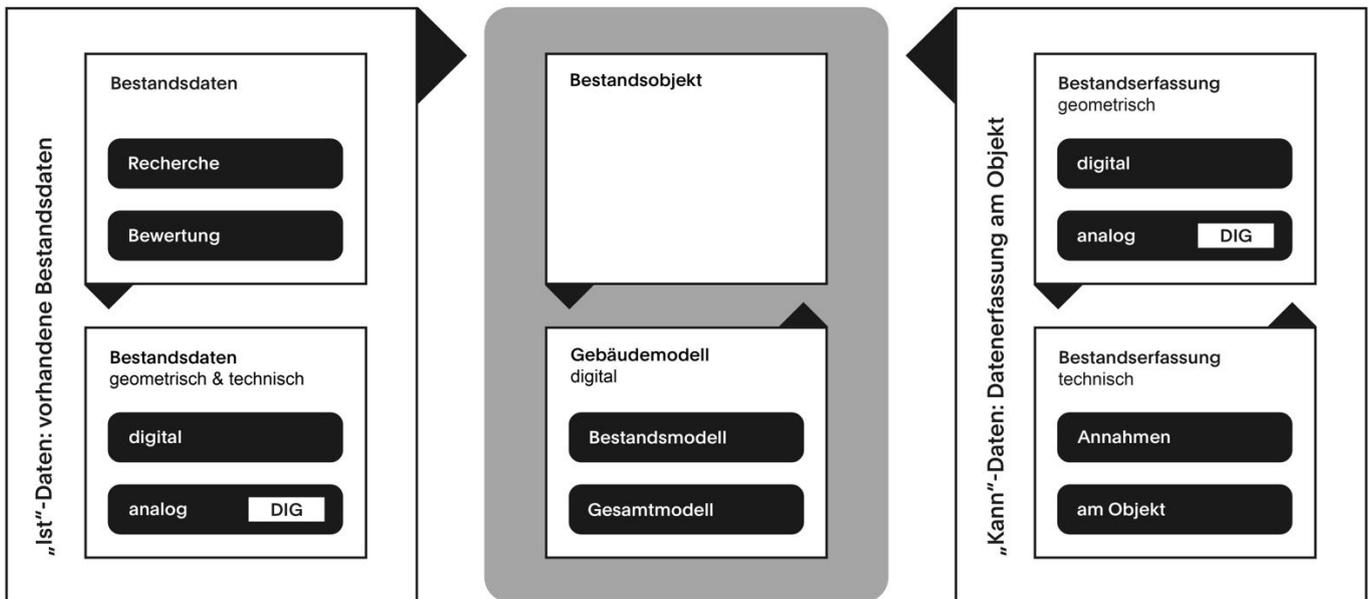


Abbildung 4: Datenerfassung im Bestand

„Ist“- und „Kann“-Daten ermöglichen eine möglichst vollumfängliche, aktuelle und belastbare Repräsentanz des tatsächlichen Bestandsobjekts und bilden somit als eine Art Modell die Grundlage für die im Rahmen eines Sanierungsprozesses notwendigerweise zu treffenden Entscheidungen. Beide Datenstränge („Ist“ und „Kann“) werden im Folgenden näher betrachtet – und schlussendlich um die Dimension der „Soll“-Daten, also der Frage nach dem Verhältnis von Aufwand und Nutzen/Zieldefinition – erweitert.

Vorliegende Bestandsdaten: „Ist“-Daten

Beim Bauen im Bestand stehen den Planenden häufig bereits Unterlagen (Pläne, Dokumente, usw.) des betreffenden Objekts zur Verfügung. Der Umgang mit diesem Material sowie die Einbindung in einen (digitalen) Planungsprozess ist dabei von entscheidender Bedeutung für eine fundierte Durchführung des Umbau- bzw. Sanierungsvorhabens. Die Zusammenstellung der bereits existierenden Bestandsunterlagen aus diversen Quellen, ihre Prüfung und Weiterverarbeitung ist aufgrund der häufig mangel- und/oder lückenhaften Datenqualität sowie der eingeschränkten Datenverfügbarkeit mit einem großen Aufwand verbunden. [Kurzrock et al, 2023] Allein die Klärung der relevanten Quellen einer möglichen Recherche zum einzelnen Objekt, seien es (vorherige) Eigentümer*innen, Ämter und/oder andere Archive, ist als aufwendig zu bezeichnen, zumal jede Quelle häufig ihre eigenen

Archivierungsprinzipien (Planbezeichnungen, Ordnungssysteme, usw.) aufweist. [Cramer et al, 2007]

Da Bestandsunterlagen bei Bauwerken dabei überwiegend noch in analoger Form vorliegen [BBSR, 2016], ist nach Recherche eine Überführung dieser Pläne und Dokumente in ein digitales, einheitlich lesbares und ggf. weiter verarbeitbares Format (und unter Abgleich mit der vorliegenden Bestandssituation, welche durchaus vom dokumentierten Planstand abweichen kann) unabdingbar. Dieser Prozess der Recherche und Digitalisierung geschieht im Normalfall manuell und ist somit als zeitaufwändig und fehleranfällig zu beschreiben, sei es bei der Verwendung von Scansystemen (mit den dafür notwendigen Vor- und Nachbearbeitungstätigkeiten) oder bei der Übertragung von Planunterlagen in ein CAD/CAAD-Programm. [Kurzrock et al, 2023]

Es existieren aktuell keine einheitlichen Regelungen bzw. Orientierungshilfen bei der digitalen Aufbereitung von Bestandsunterlagen, weder in Hinsicht auf die Art und Weise der Digitalisierung noch auf die strukturierte Ablage und Dokumentation [Kurzrock et al, 2023]. Häufig entstehen projekt- oder bauherrnspezifische Formen des Umgangs mit Daten, welche eine allgemeingültige Nutzbarmachung (auch in weiteren Lebenszyklus des Objekts) behindern. Dabei wäre ein grundlegendes Archivierungssystem – wie auch die Klärung der Frage nach standardisierten Datentypen – von entscheidender Bedeutung für eine generelle Lesbarkeit und Überprüfbarkeit von Dokumenten. Hinzu kommt, dass zukünftige Anwendungen einer Künstlichen Intelligenz (KI) bzw. des Maschinellen Lernens (ML) auf eine klassifizierte Dokumentenaufteilung und -ablage der als Scan vorliegenden Daten angewiesen sind, um ihre Potenziale vollends ausschöpfen zu können [Kurzrock et al, 2023]. Allein hierfür wäre eine „Dokumentendigitalisierungsstrategie“ [Kurzrock et al, 2023] notwendig, um z.B. den Einsatz einer automatisierten Informationsextraktion aus digitalen (als Scan vorliegenden) Dokumenten mittels einer Optischen Zeichenerkennung (OCR: Optical Character Recognition) voranzutreiben.

Aktuell bilden diese Systeme jedoch noch in keiner Weise den aktuellen Stand der Technik im Hinblick auf eine breite Anwendbarkeit ab. Zu viele Problematiken schränken die Handhabung dieser Systeme noch ein: von Nöten ist grundlegend eine sehr gute Qualität der Scans. Hierfür sind teils umfangreiche manuelle Vor- und Nachbearbeitungsarbeiten vorzunehmen. Aber auch Art und Qualität des

Dokumenteninhalts (wie Verschmutzungen, Faltungen usw.) beeinflussen die Möglichkeiten beim Einsatz von KI- und ML-basierten Systemen enorm; gleiches gilt bei handgezeichneten Planunterlagen bzw. handschriftlichen Notizen/Textdokumenten, welche aktuell maschinell nicht ausgelesen werden können, bzw. dies nur mit einer sehr großen Fehleranfälligkeit. [Kurzrock et al, 2023] Eine kurzfristige Verbesserung dieser Situation, und somit eine breite Anwendung von KI-Systemen beim Umgang mit Bestandsdaten, ist nicht absehbar, basieren diese Systeme doch auf eigenständigen Lernprozessen, für die jedoch zuerst große Mengen von „Lernmaterial“ zu Verfügung stehen müssen. Diese „Lerndaten“ stehen im Bereich der Architektur und des Bauwesens jedoch kaum allgemein zugänglich zur Verfügung [Schönfelder et al, 2024]. Potenziell besteht hier dennoch die zukünftige Möglichkeit, diese Systeme zu nutzen, um automatisiert und ohne großen Aufwand, Informationen zu einzelnen baulichen Objekten aus vielfältigen Quellen und vielfältiger Art zu extrahieren und digital, u.a. in einem vollumfänglichen digitalen BIM-Bestandsmodell, zu bündeln. So könnte das Building Information Modeling (BIM), neben seinem eigentlichen Einsatz bei der Neuplanung und -errichtung von Bauwerken, verstärkt auch bei Sanierungs- und Umbaumaßnahmen zum Einsatz kommen und hier durchaus seine Vorteile ausspielen. Eine manuelle Erstellung von digitalen Bestandsmodellen bei „einfachen“ Sanierungsmaßnahmen erscheint heutzutage jedoch aufgrund des immensen Aufwands kaum zielführend. [Gann et al, 2023]

Doch unabhängig von den Möglichkeiten, welche die fortschreitende digitale Revolution auch im Bereich der Bestandsdatenanalyse und -weiterverarbeitung zukünftig wohl bieten wird: nicht selten sind die vorliegenden „Ist“-Daten unvollständig, veraltet, nicht lesbar und/oder offensichtlich fehlerhaft [BBSR, 2016], so dass diese zu Etablierung einer belastbaren Planungsgrundlage zwingend verifiziert und/oder vervollständigt und um die „Kann“-Daten ergänzt werden müssen.

Bestandsdatenerfassung: „Kann“-Daten

Die Erhebung von „Kann“-Daten findet in der Regel direkt am konkreten Objekt statt. Sie stellt den „physischen Bestand des Gebäudes in seinen maßlichen und strukturell-konstruktiven Verhältnissen dar und beschreibt den vorgefundenen Zustand“ [Cramer et al, 2007]. Diese Zustandsbeschreibung kann und sollte – in Abhängigkeit der bereits existierenden „Ist“-Daten – diverse Erfassungsebenen beinhalten, seien diese geometrisch, konstruktiv, technisch und/oder funktional. Sie kann dabei oberflächige

Zustände beschreiben oder, wie bei der Bauuntersuchung, tief in die materielle Struktur des Bauwerks eingreifen. Ebenso vielfältig kann der Output sein: denkbar sind Fotos, Planunterlagen, Textdokumente, chemische und bauphysikalische Analysen, usw. Die gewonnenen Daten bilden Teile der tatsächlichen baulichen Struktur ab, beschreiben diese und ermöglichen so fundierte Entscheidungen im Rahmen des Sanierungsprozesses. Dabei ist es erst einmal unerheblich, ob die zusätzlichen „Kann“-Daten analog oder digital erhoben werden, auch wenn für eine Nutzung im Rahmen eines ganzheitlichen Prozesses viel für eine direkte digitale Erhebung spricht.

Im Rahmen des Projekts wurden daher im nächsten Schritt die relevanten Methoden der Bestandserfassung am Objekt erfasst, beschrieben, bewertet und insbesondere unter dem Postulat des Forschungsprojekts kritisch betrachtet.

Analoge Methoden

Bei der Erfassung von geometrischen Daten im Bestand scheinen analoge Methoden nach und nach von digitalen bzw. hybriden Methoden und Werkzeugen ersetzt zu werden. Die Nachteile von Rollmaßband, Lasermessgerät, Winkelspiegel, Nivelliergerät, Theodolit usw. sind aus heutiger Sicht durchaus offensichtlich: auch wenn ihr Einsatz häufig mit wenig Aufwand verbunden ist, ist die erhobene Datenmenge in einem bestimmten Zeitraum durch die notwendige, sich wiederholende Einzelmessung gering und die digitale Weiterverarbeitung sowie die allgemeine Zugänglichkeit der Daten stark eingeschränkt. Die Zusammenführung und Nachbearbeitung der Daten ist zeitintensiv und nicht selten fehleranfällig. Digitale Theodoliten, Lasermess- und Nivelliergeräte mit einer „softwaregesteuerte Ausgabe von Messdaten“ [Helmus et al, 2010] können einzelne Nachteile aufwiegen, grundlegend aber zeigt sich die Stärke der analogen Datenerhebung am Objekt in anderen Aspekten: bei bauphysikalischen, bau- und materialtechnischen Untersuchungen des Objekts.

Eine fundierte Kenntnis über die im Bestand verbauten Materialien sowie über ihre Eigenschaften ist gerade für energetische Optimierungsmaßnahmen von Bedeutung. Bieten die bestehenden „Ist“-Daten keine verlässlichen Hinweise auf Art und Qualität des verbauten Materials (oder sind die darin enthaltenen Angaben nicht mehr aktuell), können zerstörungsfreie (Thermographie, Ultraschall, usw.) und/oder eingreifende Bauuntersuchungen neue, belastbare Erkenntnisse liefern. Bedingt durch die

Notwendigkeit der nachträglichen Zusammenführung der jeweiligen Einzeluntersuchungen, können umfassende Bauteiluntersuchungen als zeitaufwendig und kostenintensiv angesehen werden. So verwundert es nicht, dass analogen Methoden der Bestandserfassung und -prüfung sich gerade im Bereich der Baudenkmalpflege sowie der Bauarchäologie etabliert haben.

Digitale Methoden

Digitale Methoden der Bestandsdatenerhebung und -vermessung können für die tägliche Praxis als unentbehrlich angesehen werden. Sie liefern Basisdaten für die strukturelle Erfassung von Bestandsbauten sowie deren Überführung in weitergehende digitale Gebäudemodelle. [Bundesarchitektenkammer, 2021] Dabei ist „die Effizienz von Bestandsaufnahmen [...] durch neue [digitale] Methoden [in den letzten Jahrzehnten] erheblich gestiegen“ [Hauschild et al, 2010], zumal auch die direkte Verknüpfung von geometrischen Daten mit „Eigenschaftssätzen“ [Bundesarchitektenkammer, 2021] technisch ohne größeren Aufwand möglich ist, was wiederum die Informationstiefe der Datenbasis sowie ihre zielgerichtete Anwendung verbessern kann. Dabei finden insbesondere das 3D-Laserscanning sowie die Photogrammetrie breite Anwendung, weshalb auf beide Methoden im Folgenden näher eingegangen werden soll.

Beim 3D-Laserscanning erfassen einzelne Laserstrahlen Oberflächen in einem festen Raster (bzw. scannen diese) und ordnen diese einer genauen Position im Raum zu. So entsteht ein genaues digitales Abbild der geometrischen Strukturen von Bauwerken. Grundsätzlich handelt es sich beim 3D-Laserscanning um die „Automatisierung des tachymetrischen Messvorgangs“ [Helmus et al, 2010], bei dem Winkel sowie Distanzen einzelner Objektpunkte und ihre räumlichen Verhältnisse zueinander ermittelt werden. Der Scanner erfasst zudem die Intensität des reflektierten Laserstrahls und somit voneinander abweichender Oberflächenbeschaffenheiten, welche sich mittels integrierter Digitalkameras auch farblich darstellen und somit in der Auswertung der Ergebnisse unterscheiden lassen.

Die Verfahren des 3D-Laserscanning lassen sich grundlegend in zwei Methoden unterteilen: das terrestrische Laserscanning sowie das Aerolaserscanning, bei dem im Normalfall mittels einer Drohne (UAV: „unmanned arial vehicle“) das zu erfassende Objekt aus der Luft heraus gescannt wird. Beim terrestrischen Laserscanning

unterscheidet man zwischen dem Einsatz von statischen Scannern („statisches Verfahren“), welche allerdings im Bauwesen aufgrund der stark eingeschränkten Erfassung keine Rolle spielen, und dem „dynamischen oder mobilen Verfahren“, bei dem eine kontinuierliche Änderung der Position des Scanners möglich ist. [Helmus et al, 2010] Weiterhin werden diverse Bauarten der Scanner (Camera-View-Scanner, Panorama-Scanner, usw.) sowie verschiedene Methoden der eigentlichen Distanzmessung unterschieden (Impulslaufzeitverfahren, Phasenvergleichsverfahren, usw.) [Helmus et al, 2010]. Das 3D-Laserscanning hat dabei die Methoden der Bestandsdatenerfassung in den letzten Jahrzehnten massiv verändert. Während bei analogen Mess- und Erhebungsmethoden häufig einzelne Messpunkte bewusst ausgesucht und erfasst werden mussten, generiert das Laserscanverfahren in kürzester Zeit eine riesige Menge von räumlich fixierten Punkten – die sog. „Punktwolke“. Auch bei großen und/oder schwer zugänglichen baulichen Strukturen spielt das 3D-Laserscanning seine Vorteile aus [Hauschild et al, 2010].

Als zweite grundlegende Methode der digitalen Bestandserfassung ist die Photogrammetrie ebenso von großer Bedeutung für die Generierung von Bestandsdaten. So wie das 3D-Laserscanning auf analogen tachymetrischen Prinzipien basiert, ist auch die Methode der Photogrammetrie – bei der mittels Fotografien die räumliche Lage, Größe und Geometrie einzelner Objekte sowie ihre räumliche Beziehung zueinander ermittelt werden - bereits seit dem 19. Jahrhundert im Einsatz. Und auch hier wird zwischen terrestrischer Photogrammetrie und Aerophotogrammetrie unterschieden [Helmus et al, 2010]. Für die weitere Verarbeitung der mittels photogrammetrischer Methoden erhobenen Daten sind diese im Anschluss auszuwerten. Hierbei wird zwischen der Einbildauswertung (welche zwar verzerrungsfreie Ansichten generiert, jedoch ohne eine räumliche Festsetzung), der Mehrbildauswertung (eine Methode, bei der Objektpunkte in ihrer räumlichen Lage bestimmt werden können) sowie der Stereoauswertung unterschieden. Unabhängig von der Auswertungsmethode ist die Qualität der erhobenen Daten abhängig von einer Reihe von Faktoren, u.a. der Auflösungsqualität der Fotos, der Objektivqualität sowie der digitalen Speicherung, bei der im Optimalfall auf Komprimierungsvorgänge verzichtet werden sollte [Helmus et al, 2010].

Das (Zwischen-)Ergebnis digitaler Bestandsdatenerfassung ist die Punktwolke, eine räumliche „Zusammenstellung aller eingemessenen Punkte“ [Helmus et al, 2010]. Im Normalfall erfolgt eine optische (räumlich oder flächenhafte) Darstellung und ein Export

der Daten in gängige CAD/CAAD-Programme, jedoch ist auch ein rein textbasierte Koordinatendarstellung möglich, welche jedoch manuell kaum zu erfassen ist. Auch eine Betrachtung mittels VR-Brille in einem VR-Modus ist möglich. Dabei wandelt sich der augenscheinliche Vorteil digitaler Erhebungsmethoden hier, bei der Weiterverarbeitung der Daten, schnell zum Nachteil. Punktwolken enthalten im Normalfall eine Masse an Daten (zumal viele Datenpunkte zwecks der notwendigen räumlichen Überlagerung doppelt erhoben werden), welche nunmehr den projektspezifischen Ansprüchen angepasst, d.h. interpretiert, bereinigt, geclustert und herausgefiltert werden müssen. Dieser Vorgang macht eine leistungsstarke Soft- und Hardware unumgänglich und findet zudem in der gängigen Praxis manuell statt, auch wenn mittlerweile durchaus automatisierte Verarbeitungsmethoden existieren, welche die teils mühselige Arbeit maschinell übernehmen können [Helmus et al, 2010]. Heutzutage ist je Stunde Datenerfassung am Objekt mit ca. acht Stunden Nachbearbeitungszeit zu kalkulieren [Bundesarchitektenkammer, 2021], welche sich bei zusätzlichen Arbeiten, wie der Einarbeitung von technischen Attributen, noch stark erhöhen kann, können 3D-Laserscan und Photogrammetrie doch immer nur die vorderste Ebene eines Objekts, nicht jedoch die dahinterliegenden Elemente bzw. deren Eigenschaften, erkennen [Hauschild et al, 2010]. Diese „leeren“ Abbilder der gebauten Wirklichkeit erlauben noch keine Aussagen zu den verbauten Materialien, zu deren Qualität, zur Energieeffizienz, usw. So lässt sich „nicht jede Information [...] im Rahmen eines Aufmaßes erfassen“ [Bundesarchitektenkammer, 2021], auch wenn die Datenmengen einer Punktwolke dies vielleicht suggerieren. Zudem noch ein weiterer Aspekt hinzukommt: trotz vielfältiger Bemühungen (wie z.B. durch das 1999 eingeführte herstellerunabhängige IFC-Format („Industry Foundation Class“)) existiert bis heute keine allgemein akzeptierte und standardisierte Schnittstelle zur Weitergabe und zum Austausch von digitalen Daten, so dass Reibungsverluste und Fehler bei diesem notwendigen Prozess nicht selten sind [Hauschild et al, 2010].

Vergleich & Bewertung

Es ist offensichtlich, dass die Nutzbarkeit von jeglichen Daten in großem Maße von deren Qualität abhängt [Hovestadt et al, 2020]. Dies gilt natürlich auch im Kontext der (digitalen) Bestandsdatenerhebung im Bauwesen; auch hier ist „mehr“ nicht gleichzusetzen mit „besser“. So ist auch die Frage nach der richtigen (bzw. zielgerichteten) Methode der Erhebung von Daten im Bestand immer auf das jeweilige Projekt, auf die jeweils angestrebten Ergebnisse – und unter Berücksichtigung der

Qualität von bereits vorhandenen Bestandsdaten - auszurichten. Im Rahmen des Forschungsprojekts werden die beschriebenen Methoden der digitalen Bestandsdatenerfassung gewichtet und bewertet. Grundlage für diese neu erarbeitete Bewertungsmatrix bildete die Bewertung mehrerer analoger und digitaler Aufmaßmethoden (Handaufmaß, Tachymetrie, Photogrammetrie und 3D-Laserscanning) der Bundesarchitektenkammer im Jahre 2021 [Bundesarchitektenkammer, 2021]. Die dort festgesetzten Bewertungskriterien wurden für das Forschungsprojekt ergänzt und in Haupt- und Unterkategorien unterteilt:

Erfassungsqualität

- Geometrische Übereinstimmung
- Detailgenauigkeit
- Fotorealismus
- Vollständigkeit der Erfassung

Anwendbarkeit

- Aufwand & Kosten
- Störungsverhalten
- Geschwindigkeit der Erfassung

Nutzbarkeit

- Datenvolumen
- Analysemöglichkeiten
- Weiternutzung der Daten

Betrachtet wurden dabei sowohl analoge als auch digitale Methoden der Bestandsdatenerfassung und hierbei solche, welche den aktuellen Stand einer breiten Anwendung darstellen: Handaufmaß, Tachymetrie und Bauteiluntersuchungen im Bereich der analogen Methoden; 3D-Laserscanning und Photogrammetrie (jeweils terrestrisch und als Erfassung aus der Luft mittels Drohnen) als digitale Methoden.

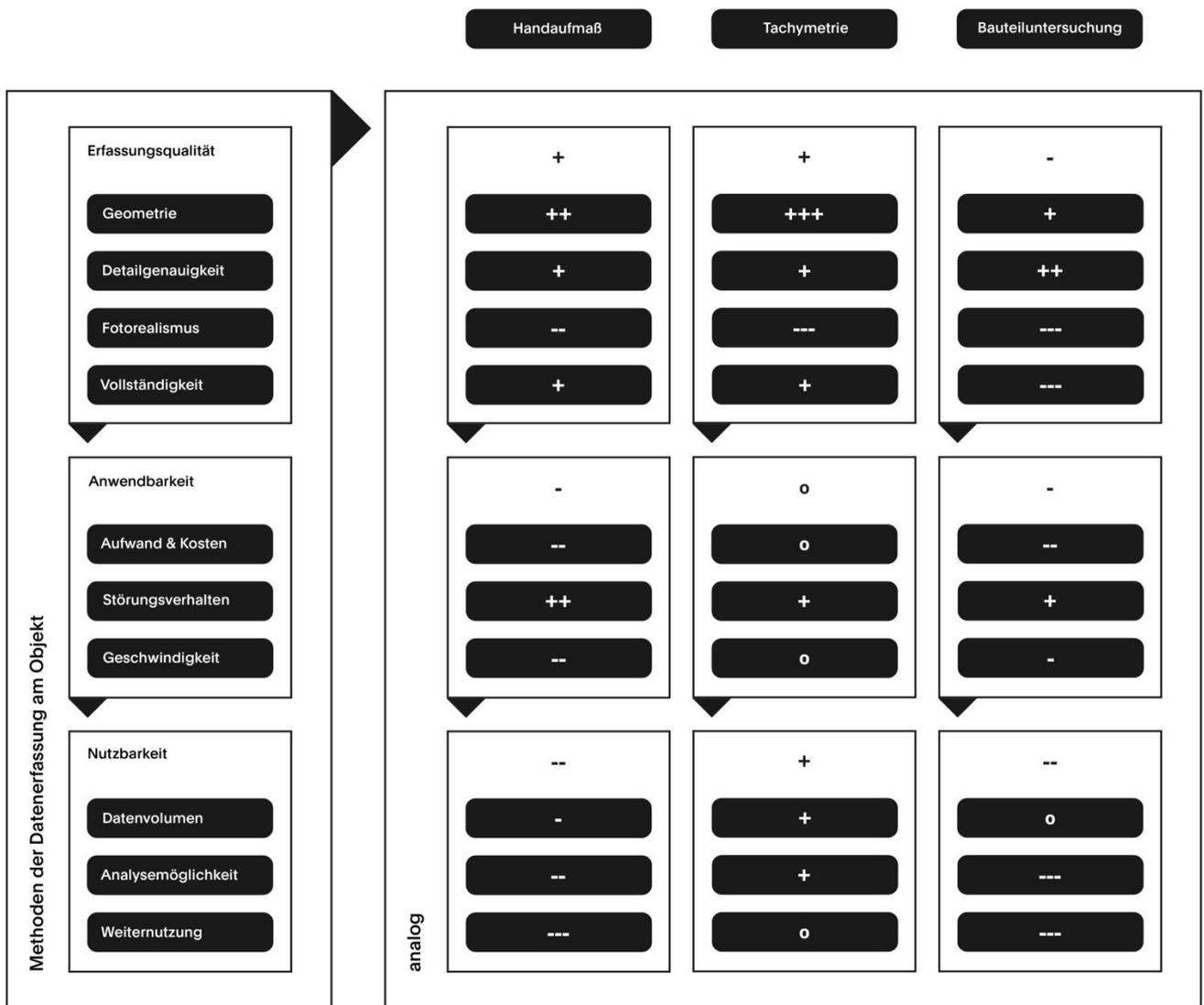


Abbildung 5: Methoden der Datenerhebung: Vergleich & Bewertung, Teil 1: Handaufmaß, Tachymetrie, Bauteiluntersuchung

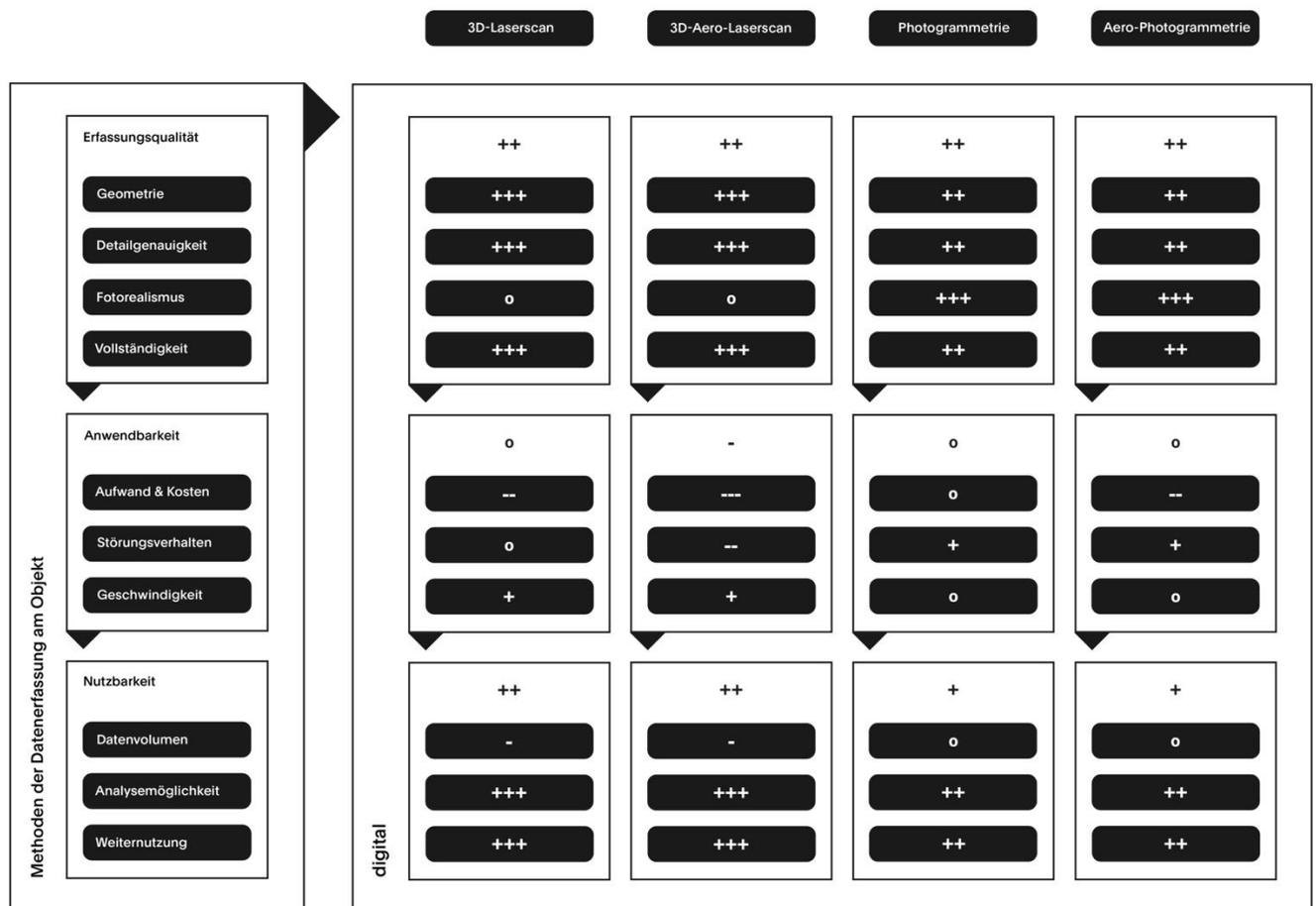


Abbildung 6: Methoden der Datenerhebung: Vergleich & Bewertung, Teil 2: 3D-Laserscan, 3D-Aero-Laserscan, Photogrammetrie, Aero-Photogrammetrie

Die Bewertungsmatrix eröffnet dabei einen wichtigen Blick auf eine zentrale Fragestellung des Forschungsprojekts: welche Möglichkeiten der Erfassung von Bestandsgebäuden stehen aktuell (und ggf. in naher Zukunft) zur Verfügung und wie ist dabei das Verhältnis von Aufwand und Ertrag, gerade unter Berücksichtigung eines aufgabenbezogenen Vorgehens eines „einfachen“ Umbauens und damit verbunden einer Steigerung der Sanierungsquote im Bestand? Welche Daten sind zwingend als Bestandteile bei Auswahl der Sanierungsmaßnahmen anzusehen, um eine möglichst effektive Festlegung zielgerichteter, bauteilbezogener Umsetzungen zu gewährleisten? Beispielhaft sei hier die Erfassung von Bestandsbauten mittels eines 3D-Laserscanners genannt. Bei dieser Methode kann der Bestand in einer enorm hohen Detailgenauigkeit und geometrischen Vollständigkeit erfasst werden, eine weitere Nutzung der Daten im Rahmen eines digitalen Gesamtprozesses ist ebenfalls im hohen Ausmaß gegeben – gleichzeitig ist dieser Vorgang mit einem großen Aufwand, gerade auch in der Nachbearbeitung der Daten in der sog. Punktwolke, verbunden.

Zudem suggeriert diese detailreiche und scheinbar allumfassende Datenmenge – im Gegensatz zu einem Vorgehen mit bewusster Auswahl und Reduktion bei der Datenzusammenführung und -erhebung – eine trügerische Sicherheit, präsentieren die mittels 3D-Laserscan erhobenen Daten doch immer nur ein oberflächiges, geometriebasiertes Bild, nicht jedoch die technischen und/oder materialspezifischen Eigenschaften der Bauteile; ein Aspekt, welcher gerade im Bereich der Optimierung der Energieeffizienz von größter Bedeutung ist.

Bestandsdaten sind immer Repräsentanten des gebauten Objekts, sind analoge und/oder digitale, abstrahierte Abbilder. Anzunehmen ist, dass KI-gesteuerte Prozesse bald digitale Modelle von Bestandsbauten aus einer Reihe diverser Datenquellen (Planunterlagen, Tabellen, Textdokumente, Fotos, usw.) zusammenführen, analysieren und auswerten können werden [Bundesarchitektenkammer, 2021]. Mögen diese Methoden der digitalen Datenverarbeitung in Zukunft die Möglichkeiten eröffnen, auch mit sehr großen diffusen Datenmengen zielgerichtet Entscheidungen herbeizuführen, ist die Abstraktion, die Frage nach Aufwand und Nutzen sowie der notwendigen Datentiefe, von entscheidender Bedeutung für einen zielgerichteten Prozess im Bestand. Der Fokus auf die notwendigen Daten erlaubt dabei – im Abgleich mit den projektspezifischen Zielformulierungen – den Abbau von Hemmnissen bei der Planung und Umsetzung und ermöglicht „einfache“ Sanierungsmaßnahmen in der Breite des baulichen Bestandes.

2.3.3. Datenqualität & Zielformulierung

Die „Menge der produzierten Informationen war noch nie so groß wie heute“ [Kurzrock et al, 2023]. Auch in der Architektur sowie gerade beim Bauen im Bestand, wo valide und umfassende Zusammenführungen und Bewertungen von Bestandsdaten essenziell für eine erfolgreiche und zielgerichtete Projektumsetzung sind, ist - dank digitaler Prozesse – dieser grundlegende Trend zu erkennen. Gleichzeitig existieren viele dieser Daten ohne Kopplung zu einem Anwendungsfall [DiCoMa, 2023]. Eine quantitativ große Menge an Daten führt an sich noch lange nicht zwingend auch zu einer sinnhaften Anwendbarkeit; nicht selten ist aufgrund fehlender Klassifizierungs- und/oder Ordnungssysteme sowie einer fehlenden Verknüpfbarkeit untereinander sogar das Gegenteil der Fall. Von entscheidender Bedeutung ist daher sowohl die Definition der Datenqualität an sich, aber im besonderen Maße gerade ihr Bezug zum Anwendungsfall. Konkret besteht die Aufgabe bei jeder baulichen Maßnahme im

Bestand darin, die passende notwendige Datenqualitätsstufe mit ihrer jeweiligen Anwendung in Einklang zu bringen: wie ist die bestehende Datenlage und -qualität? Welchen Grad an Differenzierung, Verlässlichkeit und Belastbarkeit müssen die Daten in Bezug auf die geplante Maßnahme aufweisen? Was ist das Ziel? Welches Budget steht zur Verfügung und wie groß ist der Aufwand [BBSR, 2022]? Grundsätzlich gilt: Informationen und Daten bilden ein (digitales) Modell der Wirklichkeit ab. Dieses Modell ermöglicht die Abstraktion hochkomplexer Vorgänge und Gegebenheiten, so weit, dass eine Simulation, eine fundierte Entscheidungsfindung, usw. möglich ist. Ein sinnfälliges Modell enthält daher nur die jeweils relevanten Daten – Daten, welche „einen Unterschied machen“ [Marble, 2012] – und nicht alle zur Verfügung stehenden bzw. durch Datenerhebungsstrategien sammelbaren Daten; nicht „so viele Informationen wie möglich, sondern so wenige wie nötig“ [Marble, 2012].

Datenqualität

Bei der Bewertung von Daten aller Art (die „Ist“-Daten, welche weitergehend durch „Kann“-Daten ergänzt bzw. vervollständigt werden können) haben sich diverse Anforderungskategorien etabliert. Für das Forschungsprojekt wird auf die grundlegenden Qualitätskriterien aus [Kurzrock et al, 2023] zurückgegriffen, welche sich in fünf Haupt- und davon ausgehend in unterschiedlich viele Unterkategorien mit den dazugehörigen Zielfragen gliedern:

Verfügbarkeit

Zugänglichkeit

Ist der Zugriff auf die Informationen/Daten über eine vorhandene und zugängliche Schnittstelle möglich? Dürfen die Informationen/Daten im Rahmen des Vorhabens (weiter-) genutzt und/oder veröffentlicht werden?

Aktualität

Ist der Zugriff auf die Informationen/Daten innerhalb einer bestimmten Zeitspanne möglich? Wann wurden die Informationen/Daten erhoben und wann wurden sie letztmalig aktualisiert?

Nutzbarkeit

Glaubwürdigkeit

Sind die Informations-/Datenquellen bekannt und glaubwürdig? Ist der Inhalt der Informationen/Daten überprüfbar? Entsprechen die Informationen/Daten gängigen Standards?

Verlässlichkeit

Präzision

Sind die Informationen/Daten richtig und präzise? Bilden die Informationen/Daten die tatsächlichen Verhältnisse ab? Können mehrdeutige Auslegungen vermieden werden?

Konsistenz

Ist eine Veränderung der Inhalte und Strukturen der Informationen/Daten über einen bestimmten Zeitraum feststellbar? Stimmen Inhalte und Strukturen der Informationen/Daten untereinander überein? Existieren innerhalb des Informations-/Datenbestandes widersprüchliche Aussagen?

Integrität

Entsprechen Datenformat, Struktur und Inhalt der Informationen/Daten den festgelegten Kriterien und Anforderungen?

Vollständigkeit

Sind die Informationen/Daten entsprechend den festgelegten Anforderungen vollständig? Beeinträchtigen einzelne Mängel oder fehlende Informationen/Daten die Nutzbarkeit, Richtigkeit und Integrität der Gesamtheit der vorliegenden Informationen/Daten?

Relevanz

Tauglichkeit

Passen die Informationen/Daten zum übergeordneten Ziel und/oder zu einem spezifischen Aspekt davon? Bilden die Informationen/Daten relevante Aspekte ab?

Darstellungsqualität

Lesbarkeit

Sind Inhalt, Format und Struktur der Informationen/Daten klar und verständlich?

Ermöglichen die Informationen/Daten eine Bewertung hinsichtlich des Nutzens für das Ziel?

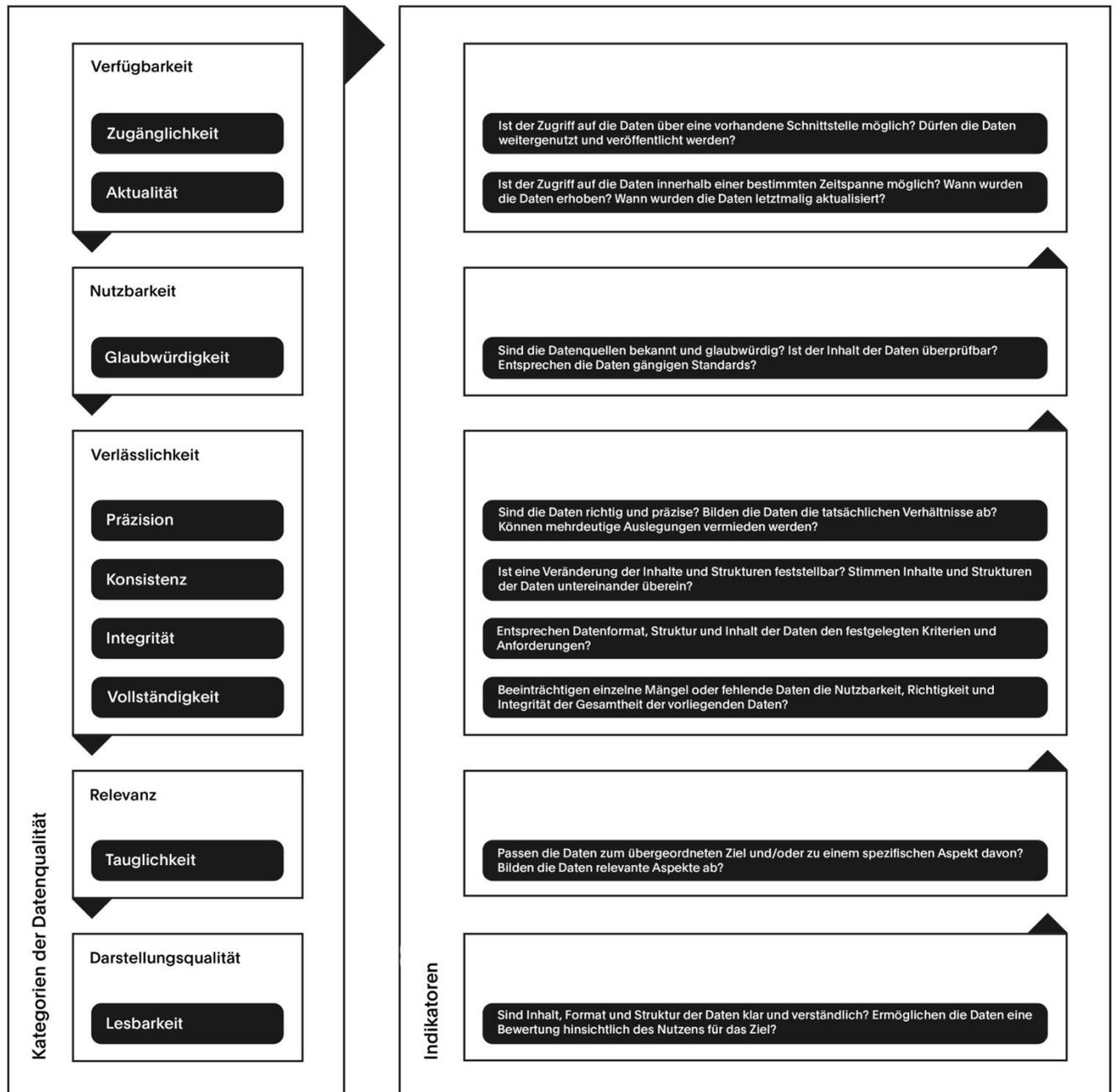


Abbildung 7: Kategorien der Datenqualität

Mit Hilfe dieser grundlegenden Qualitätskriterien ist eine Bewertung und Kategorisierung von Informationen bzw. Daten in einer allgemeingültigen Form

möglich; sie ist unabhängig vom Gegenstand der Betrachtung, d.h. vom Informations-/Dateninhalt. Hierin liegt auch bei der Betrachtung der häufig heterogenen Datensätze beim Umgang mit Bestandsbauten ein Vorteil dieser Bewertungsmethode. Gleichzeitig ist ihre allgemeine Anwendbarkeit auch als nachteilig anzusehen, so dass bei einer abschließenden Bewertung der vorliegenden Datensätze weitere Einordnungs- und Kategorisierungsentscheidungen zu treffen sind. Dabei erscheint es sinnvoll, dass vorab bestimmte, zum Ziel des Vorhabens passende Schlüsselinformationen definiert werden, welche wiederum die Festsetzung von Schlüsseldokumenten fördern können. Es erfolgt demnach eine Einordnung der bereits einzeln bewerteten Inhalte in ein projektspezifisches Klassifizierungssystem. Die Anwendung dieser Dokumentenklassen spielt dabei nicht nur einen entscheidenden Schritt bei der Strukturierung des vorhandenen Datenbestandes im Hinblick auf eine zielgerichtete Anwendbarkeit im Projekt, sondern stellt auch eine erste Basis für eine (zukünftige) maschinenbasierte Extraktion von Inhalten aus Bestandsdokumenten [Kurzrock et al, 2023].

Zielformulierung

Auch wenn die oben dargelegten Qualitätskriterien grundlegender Art sind, ist – wie bereits erwähnt – ihre Nutzung zwingend mit weiteren Festlegungs- und Definitionsprozessen zu koppeln. So ist z.B. die Bewertung der „Integrität“ der Informationen/Daten nicht losgelöst von den dort genannten festgelegten Kriterien und Anforderungen denkbar. Aber auch eine Einteilung in priorisierte Dokumentenklassen ist ohne eine Zielformulierung, von der aus sich weiteren Schritte und Festlegungen ableiten lassen, nicht zielführend. Mit dieser Zieldefinition können Datenqualität, -quantität und -inhalt so definiert werden, dass die „richtigen“ Daten zur Verfügung stehen. Konkret bilden die Festsetzung von Projektinformationen sowie die jeweilige Zieldefinition den ersten Prozessschritt im Rahmen eines (digitalen) Gesamtprozesses, aus dem die notwendige Datenstruktur abgeleitet werden kann. Welche Informationen bzw. Daten sind zur sinnhaften Umsetzung der Zieldefinitionen notwendig („Soll“-Daten)? Welche Informationen/Daten stehen zur Verfügung – und in welcher Qualität („Ist“-Daten)? Schlussendlich lässt sich aus der Gegenüberstellung von „Soll“- und „Ist“-Daten die projektspezifische Datenlücke definieren, welche festlegt, in welchem Umfang zusätzliche Informationen/Daten angenommen bzw. erhoben werden müssen („Kann“-Daten).

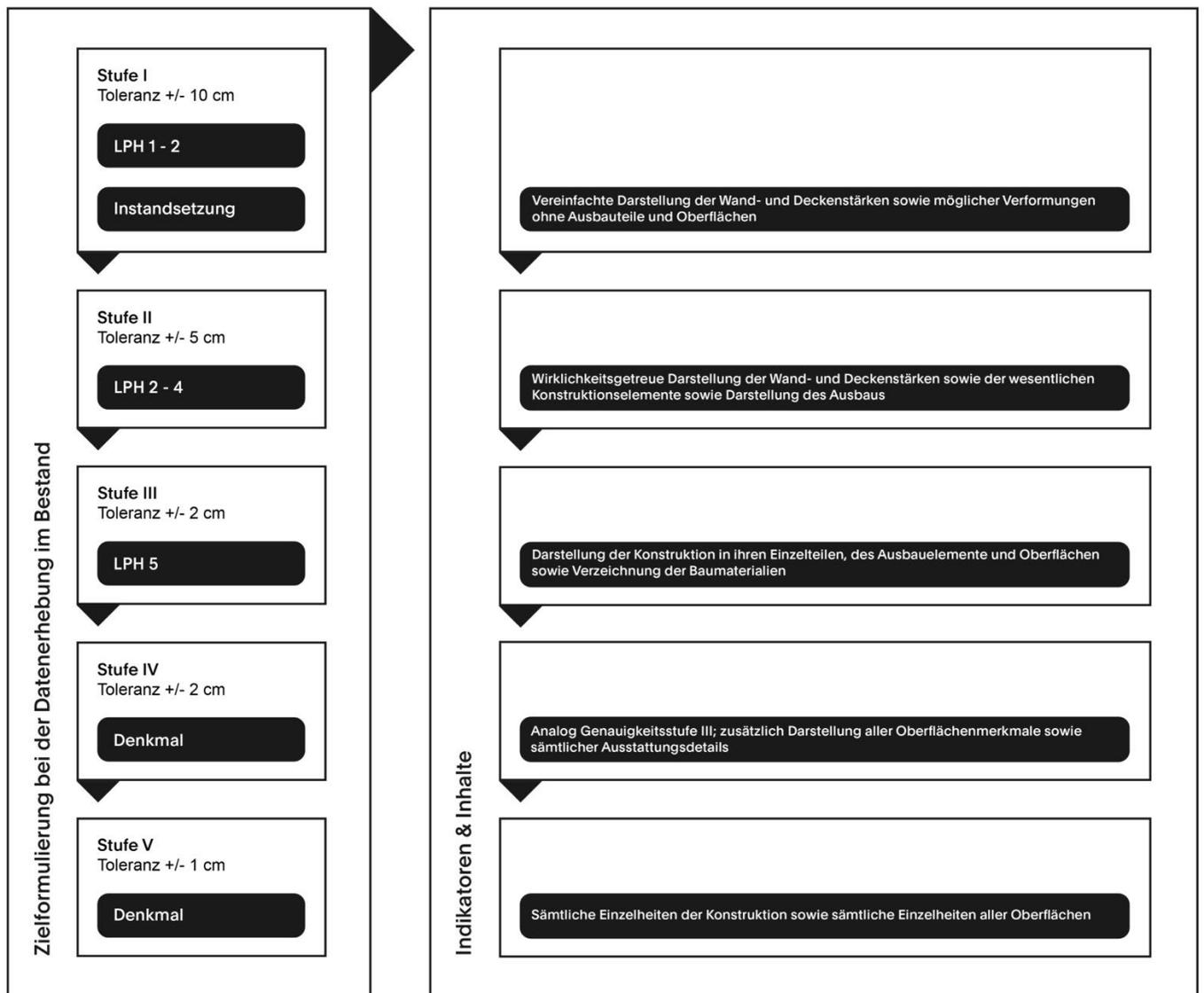
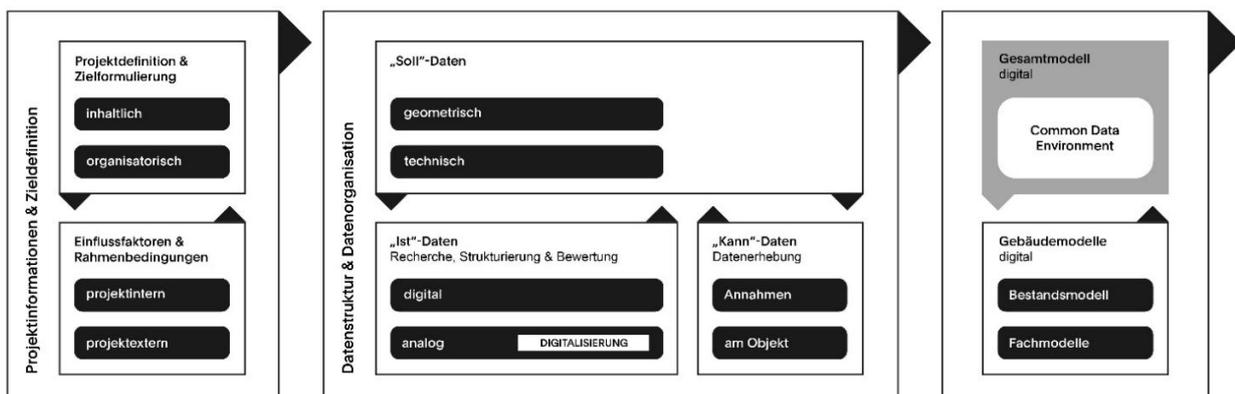


Abbildung 8: Zielformulierung bei der Datenerhebung im Bestand

2.3.4. Digitale Planungsstrategien

Die Zusammenstellung grundlegender Projektinformationen sowie der jeweiligen Zieldefinition erfolgt in zwei sich bedingenden Bausteinen: den projektspezifischen Projektdefinitionen und Zielformulierungen inhaltlicher („Was ist das Ziel des Projekts?“, usw.) und organisatorischer Art („Wer ist beteiligt?“, „Wie wird intern kommuniziert?“, usw.) sowie den allgemeinen Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen, welche projektintern („Welches Budget steht zur Verfügung?“, „Welchen Zeitplan gilt es einzuhalten?“, usw.) und/oder projektextern („Welche rechtlichen Vorgaben gilt es zu beachten?“, usw.) sein können. Abgeleitet davon erfolgt die Untersuchung und Festlegung der Datenstruktur und -organisation, das Zusammenspiel der bereits beschriebenen „Soll“- , „Ist“- und „Kann“-Daten.

Zuerst erfolgt hierbei im Normalfall die Recherche, Strukturierung und Bewertung der „Ist“-Daten, also der bereits vorhandenen Bestandsdaten zum Objekt. Diese sind im Bauwesen grob in geometrische (Planzeichnungen, usw.) und technische (Baubeschreibungen, usw.) zu unterteilen, wobei es nicht selten zu Überschneidungen beim Informationsgehalt kommt. Liegen die „Ist“-Daten in analoger Form vor, ist zudem die Frage nach der Notwendigkeit der Digitalisierung der Unterlagen im Einklang mit den vorab festgelegten Zieldefinitionen zu klären. Parallel hierzu erfolgt die Definition der zur Erreichung des anvisierten Ziels tatsächlich benötigten „Soll“-Daten. Der Abgleich der „Ist“- und „Soll“-Daten führt schlussendlich zur Festlegung von Umfang sowie Art und Weise der „Kann“-Daten, welche am Objekt erhoben werden oder theoretisch als Annahmen abgeleitet werden können. Die „Kann“-Daten schließen somit die problematische Datenlücke im Projekt.



Je nach Zieldefinition des Projekts können „Ist“- und „Kann“-Daten in ein digitales Gesamtmodell überführt werden. Dieses Gesamtmodell kann dabei in großangelegten Projekten so definiert werden, dass es den Ansprüchen an einen BIM-Prozess genügt und in dem diverse Untermodelle, u.a. der jeweiligen Fachplaner und -planerinnen, angelegt werden können. Die – aufwändige – Etablierung dieser BIM-fähigen Modelle erlaubt nicht nur die Planung und Umsetzung der geplanten Maßnahme, sondern auch einen Einsatz während des weiteren Betriebs des Gebäudes im Rahmen des Facility Managements. Dieses Vorgehen erscheint sinnvoll, zumal das digitale Gesamtmodell die kontinuierliche Fortschreibung und Aktualisierung mit (Betriebs-)Daten erlaubt und somit eine spätere Umbau- und/oder Sanierungsmaßnahme im Lebenszyklus des Objekts ohne größeren Aufwand auf einer stets aktuellen Datenbasis geplant und durchgeführt werden kann. Für die breite Masse der Bestandsbauten unter dem Postulat eines „einfachen“ Umbau- bzw. Sanierungsprozesses, ist die Zusammenstellung und Aufbereitung der hierzu notwendigen Datensätzen (sowie die permanente Pflege des Datenmodells) als sehr aufwendig und wenig zielführend anzusehen. Ziel ist hier vielmehr das zielgerichtete Schließen der Datenlücke sowie der Aufbau einer gemeinsamen, nutzbaren Datenbasis, von welcher aus sich der im Forschungsprojekt festgelegte Maßnahmenkatalog belastbar überprüfen und im Hinblick auf Umweltwirkung und Kostenbetrachtung bewerten lässt, ganz dem Leitsatz folgend, dass die Datenquantität nicht der entscheidende Faktor ist, sondern allein ihre Relevanz für das anvisierte Ziel.

2.3.5. Datenmanagement im Bestandsprojekten

Zur Etablierung eines durchgängigen digitalen Planungsprozesses im Bestand müssen im jeweiligen Projekt eine Reihe von aufeinander aufbauende und sich gegenseitig bedingende Schritte – von der ersten Definition des geplanten Vorhabens über die Akquirierung von Bestandsdaten sowie derer Weiterverarbeitung bis hin zur tatsächlichen Projektumsetzung – erfolgen. [Schönfelder et al, 2023] Diese Schrittabfolge des Datenmanagements im Bestand wurde bereits in den vorangegangenen Teilen des Kapitels 2.3. beschrieben und nun konkret auf das Forschungsprojekt angewandt.

Für die Erarbeitung der prozesshaften Darstellung des Datenmanagements im Forschungsprojekt wurde als beispielhafte Immobilie das als Repräsentant seiner Baualtersklasse 1 bestimmte Objekt „Claudius-Keller-Str. 44-62“ ausgewählt. Dabei wurden die dargelegten Prozessschritte – Projektdefinition & Zielformulierung, Betrachtung der vorliegenden „Ist“-Daten, Definition der „Soll“-Daten sowie Klärung der notwendigen Dateninformationstiefe und Schließung der Datenlücke - nun auf das genannte Objekt übertragen.

Projektdefinition & Zielformulierung

Die Zielformulierung des Forschungsprojekts wird inhaltlich durch die vorangestellte Hypothese definiert, dass im Wohnungsbau mit wenigen energetischen Sanierungsmaßnahmen mit reduzierten Investitionskosten – sowie unter Berücksichtigung von Rebound-Effekten – über den Lebenszyklus betrachtet, das gleiche Ergebnis wie bei einer Sanierung nach EH55-Standard erzielt werden kann. Ziel ist die Reduzierung des Energieverbrauchs durch eine ökologisch nachhaltige, sozial verträgliche und ökonomisch sinnvolle Steigerung der Sanierungsquote im Bestand, auch unter Betrachtung des Abbaus von Investitionshemmnissen. Methodisch findet dabei bei den vorab definierten baulichen Repräsentanten der jeweiligen Baualtersklassen ein Vergleich denkbarer energetischer Sanierungs- und Optimierungsmaßnahmen – unter Berücksichtigung technischer Sinnfälligkeit, was u.a. zum Ausschluss von Maßnahmenkombinationen führt, welche ggf. negative Effekte generieren könnten (z.B. Fenstertausch ohne Ertüchtigung der Außenwand mit der möglichen Folge von Tauwasserbildung) - sowie der Optimierung der Wärmeerzeugung innerhalb einer Lebenszyklus-Betrachtung von 25 Jahren statt.

Datenstruktur

Um das oben beschriebene methodische Vorgehen im Rahmen des Forschungsprojekts umsetzen zu können, sind grundlegende Bestandsdaten der jeweiligen Repräsentanten von Nöten. Die seitens des Projektpartners „Münchner Wohnen“, ehem. GEWOFAG, zur Verfügung gestellten Daten – die „Ist“-Daten - zum Gebäudebestand wurden daher im folgenden Schritt bezogen auf den Repräsentanten „Claudius-Keller-Str. 44-62“ analog zur oben beschriebenen Methode betrachtet, kategorisiert und bewertet.

Die „Ist“-Daten zum Objekt lagen dabei digital vor, jedoch lediglich als digitalisierte, d.h. gescannte und somit digital nicht weiter verarbeitbare Papierdokumente. Grundlegend lassen sich die Daten dabei in „geometrische“ und „technische“ Informationsklassen einteilen, welche wiederum in feingliedrige Dokumentenklassen unterteilt wurden:

Geometrische Daten und ihre Dokumentenklassen

- Entwurfsplanung (Architektur)
- Genehmigungsplanung (Architektur)
- Werkplanung (Architektur)
- Gesamtplanung (TGA)

Technische Daten und ihre Dokumentenklassen

- Allgemeine und spezifische Gebäudedaten
- Unterlagen zur Baugenehmigung

Bei der Bewertung der Daten wurden schnell Defizite in der Vollständigkeit des Datensatzes offensichtlich, sowohl bezogen auf die geometrischen als auch auf technische Informationen. Planunterlagen zur Entwurfsplanung (Architektur) lagen überhaupt nicht vor, zur Genehmigungsplanung (Architektur) nur in Hinblick auf bauliche Änderungen in den 1960er-Jahren (und auch nur in Form von Grundrisszeichnungen). Ähnliches gilt für die Dokumente der Werkplanung (Architektur): liegen hier zwar grundlegende Grundrisse sowie ein Gesamtschnitt vor, darüberhinausgehende Konstruktions- und/oder Detailzeichnungen aus denen u.a. Informationen zum energetischen Standard der Gebäudehülle abgelesen werden könnten sind jedoch nicht (mehr) vorhanden. Auch Aktualität, Vollständigkeit und Weiterverarbeitbarkeit der – neben den Planunterlagen vorliegenden – technischen Daten, zum Teil in tabellarischer Form, sind als lückenhaft zu beschreiben.

Im nächsten Schritt wurden diese als unvollständig zu beschreibenden Daten mit den Anforderungen an die Datengrundlage, welche eine sinnhafte Durchführung des Forschungsprojekts ermöglicht, abgeglichen. Hierzu wurden zuerst die notwendigen „Soll“-Daten, unter Berücksichtigung einer möglichst niederschweligen, jedoch belastbaren Herangehensweise, definiert:

Geometrische „Soll“-Daten

- Gebäudekubatur und Grundrissstruktur (Nutzflächen)
- Flächen der jeweiligen Bauteile der Gebäudehülle

Technische „Soll“-Daten

Verbrauchswerte

Qualität, Materialität und Zustand der Gebäudehülle

Wärmeerzeugung

aktuelle und zukünftige Nutzung des Objekts

Diese „Soll“-Daten bilden das Fundament, auf dem eine sinnhafte Betrachtung möglicher Maßnahmen unter dem Postulat des Forschungsprojekts überhaupt erst möglich ist. Dabei wird die Diskrepanz zwischen „Ist“- und „Soll“-Daten – die Datenlücke – sowohl bei den geometrischen als auch bei den technischen Informationen schnell und insbesondere bei den folgenden relevanten Aspekten deutlich: Geometrie (Flächenanteile), Qualität, Materialität und Zustand der Gebäudehülle sowie die jeweiligen Verbrauchswerte des Objekts.

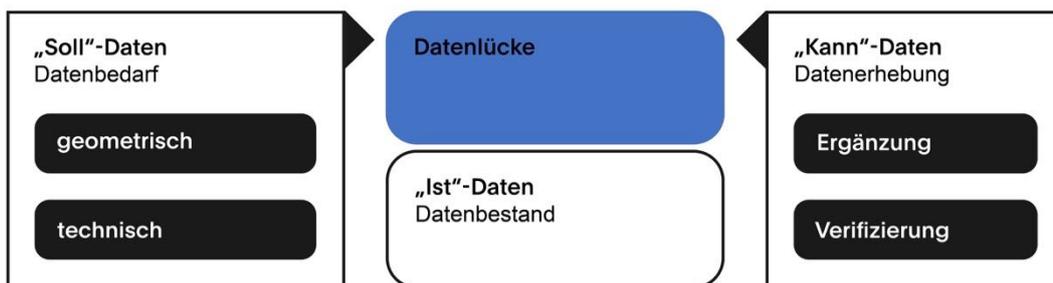


Abbildung 10: „Soll“-, „Ist“- und „Kann“-Daten im Bestand

Wie bereits beschrieben, existieren vielfältige Methoden der (digitalen) Datenerhebung am Bestand, sei es durch 3D-Laserscanning oder Photogrammetrie, zur Vervollständigung und/oder Verifizierung bereits bestehender Datensätze. Zur Schließung der vorhandenen Datenlücke im Projekt erscheint ihr Einsatz im Abgleich mit der Zielformulierung jedoch nicht sinnvoll, stehen Aufwand und Ertrag in einem ungünstigen Verhältnis. Konkret: die digitale Erfassung der Geometrie der jeweiligen repräsentativen Bauwerke hätte die Produktion eines erneuten, großen Datensatzes zur Folge, mit dem primär jedoch zuerst allein die Gebäudekubatur und oberflächige -struktur bestimmt werden könnte. Der Aufwand in Erfassung und Nachbearbeitung wäre jedoch bereits bei einem repräsentativen Objekt enorm. Und gleichzeitig wären damit immer noch keine Aussagen, z.B. über die Qualität der verbauten Materialien sowie der Gebäudehülle, verbunden. Der Zielkonflikt zwischen den digitalen Erfassungsmöglichkeiten und der notwendigen Beschränkung bei der Zusammenführung der sinnfälligen „Kann“-Daten, ist hier klar erkennbar. Ähnliches

lässt sich bei der vorhandenen Datenlücke im Bereich der technischen Daten feststellen: Bauteiluntersuchungen am Objekt zur Klärung der tatsächlich verbauten Materialien und damit verbunden des energetischen Standards der Gebäudehülle, stellen sowohl einen enormen zeitlichen als auch finanziellen Aufwand, und somit – abgeleitet von den Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt – ein Hemmnis bei der tatsächlichen Überführung in die Praxis dar.

Für die Bestimmung des baulichen Zustandes von Bestandsobjekten stehen grundlegenden „mehrere methodische Möglichkeiten“ [BBSR, 2022] zur Verfügung. Eine vollumfängliche (digitale) Erfassung kann dabei bei passender Ziel- und Projektdefinition – z.B. bei technisch und/oder geometrisch hochkomplexen sowie baumassengroßen Vorhaben oder auch verbunden mit dem Wunsch der Etablierung eines digitalen Facility Managements mittels eines digitalen Zwillings – durchaus zielführend sein. Unter der oben beschriebenen Zieldefinition des Forschungsprojekts, ist jedoch ein eher pragmatisches, zielgerichtetes Vorgehen zur Schließung der Datenlücke vorteilhaft. Konkret wurden die notwendigen „Kann“-Daten durch die folgenden Methoden bestimmt:

1. Begehung der repräsentativen Objekte und augenscheinlicher Abgleich der Gebäudekubatur, Grundrissstruktur sowie der Wärmeerzeugung mit den vorhandenen Bestandsunterlagen;
2. Bestimmung der relevanten Flächenmaße sowie der Flächen der jeweiligen Bauteile der Gebäudehülle mittels Überführung der vorhandenen Planunterlagen in CAD/CAAD-Programme;
3. Herleitung der Materialität sowie der Qualität der jeweiligen Gebäudehülle anhand der vorliegenden Unterlagen sowie von baualterstypischen Konstruktionsmethoden der zuvor bestimmten, jeweiligen Baualtersklassen sowie
4. Schätzung und Herleitung der jeweiligen Verbrauchswerte.

Diese in Teilen auf Annahmen basierte Vorgehensweise ermöglicht bei den betrachteten Repräsentanten im Forschungsprojekt – und dabei unter Berücksichtigung der Zielformulierung sowie der vorhandenen „Ist“-Daten – die Verifizierung der Sinnhaftigkeit von einzelnen sowie gekoppelten Maßnahmen im Bestand. Sie ermöglicht auch eine grundlegende Übertragbarkeit der Ergebnisse auf

Objekte der jeweiligen, spezifischen Baualtersklasse. Dennoch ist, spätestens bei der konkreten Planung einer jeweiligen Maßnahme in der Praxis, eine weitergehende Überprüfung am Einzelobjekt unabdingbar, gerade bei speziellen Rahmenparametern, wie z.B. dem gänzlichen Fehlen von Bestandsunterlagen, welche als Grundlage für die o.g. Vorgehensweise und insbesondere bei der baupraktischen Umsetzung der jeweiligen Maßnahmen unabdingbar sind.

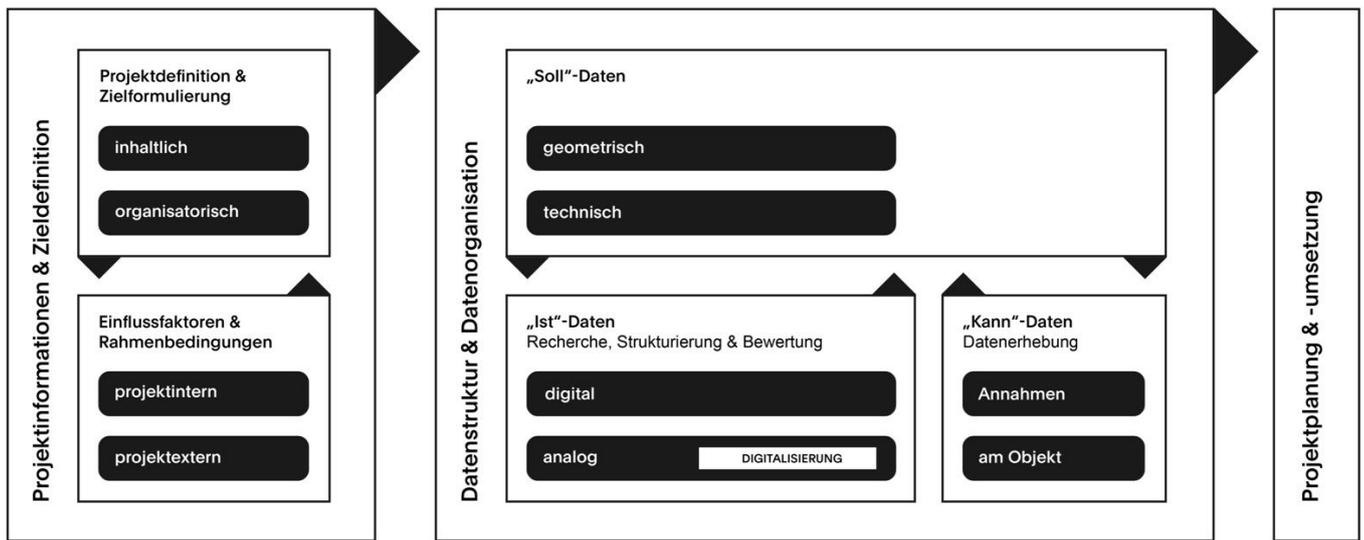


Abbildung 11: Prozessdarstellung des Datenmanagements im Bestand

Bauliche Projekte – gerade im Bestand – „zeichnen sich durch Heterogenität der Projektbeteiligten und komplexe Schnittstellen im Umfeld einer Unikatfertigung aus.“ [Hauschild et al, 2010] Problematiken bei der Informations- und Datenweitergabe sind nicht selten; ein gesteuerter, strukturierter Planungs- und Realisierungsablauf ist von elementarer Bedeutung für eine zielgerichtete Maßnahmenumsetzung. Grob lässt sich dieser in Ableitung der hier dargelegten Prozesse im Forschungsprojekt wie folgt darstellen:

Projektinformationen und Zieldefinition

Wie ist das Projekt inhaltlich und organisatorisch definiert?

Welches Ziel wird angestrebt?

Welche organisatorischen Strukturen sind zum Erreichen des Ziels notwendig?

Wer ist beteiligt?

Welche projektinternen (z.B. Budgetvorgaben) und/oder projektexternen (z.B. rechtliche Vorgaben) Einflussfaktoren wirken sich an das Projekt aus?

Wie sind die Rahmenbedingungen?

Datenstruktur und Datenorganisation

Welche Datenstruktur wird angestrebt?

Wie wird der Zugriff auf die Daten bzw. der Austausch derselben im Projekt organisiert?

Existiert ein einheitliches Austauschformat (ggf. auch über das Einzelprojekt zur weiteren Nutzung der Daten hinaus)?

Welche „Ist“-Daten sind vorhanden und in welcher Form (analog/digital) liegen diese vor?

Müssen die Daten zur Nutzung im Projekt aufgearbeitet (z.B. digitalisiert) und kategorisiert werden?

Welche „Soll“-Daten werden zur Umsetzung des Projekts in Abgleich mit der jeweiligen Zieldefinition benötigt?

Lässt sich im Vergleich zu den vorliegenden „Ist“-Daten eine Datenlücke erkennen?

Durch welche Maßnahmen (am Objekt/als Herleitung und/oder Annahme) kann die erkannte Datenlücke durch „Kann“-Daten geschlossen werden?

Konkrete Projektplanung und -umsetzung

In Ableitung der Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt lässt sich feststellen, dass eine Diskrepanz zwischen „Ist“- und „Soll“-Daten bei Bestandsobjekten – gerade auch aus der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts – die Norm ist. Vorliegende Bestandsdaten sind nicht selten unauffindbar, unvollständig, veraltet und/oder im Rahmen der heutigen technischen Planungsstandards nicht ohne eine zeitintensive Aufbereitung nutzbar. Dabei ist die Planung sowie der Betrieb von Bauwerken geprägt von einer Vielzahl von Planungsdokumenten und Informationen, wie:

Allgemeine Gebäudedaten

Entwurfsplanung (Architektur)

Genehmigungsplanung (Architektur)

Entwurfs-, Genehmigungs- und Werkplanung (TGA) inkl. Strangschema
Entwurfs-, Genehmigungs- und Werkplanung (Statik)
Werkplanung (Architektur)
Baubeschreibungen
Unterlagen zur Baugenehmigung inkl. Entwässerungsgenehmigung
Statische Berechnungen
Gutachten (Brandschutz, Wärmeschutz, Schallschutz, usw.)
Leistungsverzeichnisse der einzelnen Gewerke
Informationen zur Wärmeerzeugung
Verbrauchswerte & Energiebedarfsausweise

Das Zusammenführen dieser teils heterogenen Daten, sowie ihre Ergänzung und Verifizierung, verbunden mit dem Ziel der Etablierung eines von allen Projektbeteiligten nutzbaren Datenmodells, welches geometrische und technische Informationen vereint – ein Common Data Environment -, erscheint aktuell nur bei spezifischen Groß-Projekten sinnvoll. Der praktische Aufwand für die Sammlung, Kategorisierung, Aufbereitung, Erhebung und Zusammenführung der vielfältigen Daten (auch unter der Berücksichtigung der aktuell vorhandenen datenschutzrechtlichen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen), stellt praktisch zu hohe Hürden sowie ein großes Hemmnis für einzelne, gerade private Immobilieneigentümer*innen dar. Zielgerichtete Herleitungen und Annahmen zur Schließung der Datenlücken bei Bestandsobjekten, können – wie im Forschungsprojekt gezeigt – diese Hürden umgehen, eine belastbare Datenbasis generieren und somit die Untersuchung und Bewertung sinnhafter Maßnahmen an Bestandsobjekten ihrer jeweiligen Baualterklasse aufzeigen und die Umsetzung der daraus abgeleiteten „einfachen“ Sanierungs- und Umbaukonzepte forcieren.

Fazit

Bestandsdaten sind immer Repräsentanten und abstrahierte Abbilder des gebauten Objekts. Sie bilden die Grundlage für die im Rahmen eines Sanierungsprozesses notwendigerweise zu treffenden Entscheidungen im Hinblick auf die Sinnhaftigkeit einzelner Maßnahmen. Der Abgleich der vorhandenen Daten („Ist“-Daten) mit den – unter Berücksichtigung der Zielformulierung sowie den spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Projekts – notwendigen Daten („Soll“-Daten), definiert die Datenlücke im Projekt. Aufgrund der unzureichenden Datenlage zum Gebäudebestand in

Deutschland [BBSR, 2016], ist das zielgerichtete Schließen der Datenlücke durch „Kann“-Daten von entscheidender Bedeutung. Zur Erhebung und Herleitung dieser Daten stehen diverse Ansätze und Methoden zur Verfügung. Dabei ist eine vollumfängliche, digitale Bestandserfassung (verbunden mit dem Aufbau eines digitalen Gesamtmodells), auch aufgrund des mitunter immensen technischen und zeitlichen Aufwands, nur eine Möglichkeit von vielen. So können zielgerichtete Annahmen zur Bestandsdatenverifizierung und -ergänzung – wie im Forschungsprojekt betrieben – unter Betrachtung des Verhältnisses von Aufwand und Ertrag, ebenso belastbare Ergebnisse ermöglichen. So ist nicht allein die Datenmenge der entscheidende Faktor, sondern ihre Relevanz für das anvisierte Ziel.

2.4. AP 4 Architektur/Baukonstruktion

Zu Beginn wurde die bereitgestellte Datentabelle der Münchner Wohnen gesichtet und auf Angaben zum Sanierungszustand der Gebäude untersucht. Diese wurden mit den aktuellen energetischen Anforderungen nach [GEG 2020], §48, Anlage 7, abgeglichen und daraufhin Kriterien zur Eingrenzung der Auswahl der Gebäude-Repräsentanten festgelegt. Ziel war dabei, dass die Repräsentanten möglichst unsaniert sein sollten, bzw. noch Optimierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle zuließen.

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, wurden bei der Filterung vier Kriterien berücksichtigt, die als energierelevante Faktoren eine sinnvolle Eingrenzung ermöglichen.

Um eine Übertragbarkeit des energetischen Standards der Repräsentanten auf den deutschen Gesamtbestand zu ermöglichen, wurde für die Ermittlung der U-Werte auf Tabellen aus der vom Bundesministerium veröffentlichten Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand [BAnz, 2020] zurückgegriffen. Dort finden sich in Punkt 3.2 die Tabellen 2 und 3 zur vereinfachten Ermittlung der energetischen Qualität bestehender Bauteile, sortiert nach Konstruktionsart und Baualtersklasse.

Für die obersten Geschossdecken wurde unabhängig von der Baualtersklasse durchgängig ein U-Wert von $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ angenommen. Dieser Wert entspricht lt. Tabelle [BAnz, 2020] den Jahren 1969–1983 und erfüllt somit nach [GEG 2020] § 47 die aktuellen Anforderungen an den Mindestwärmeschutz gemäß [DIN 4108-2:2013-02]. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass die Dämmeigenschaften der Repräsentanten den üblichen Werten der entsprechenden Bauzeit entsprechen und die Ergebnisse der folgenden Untersuchungen allgemeingültiger ausfallen können.

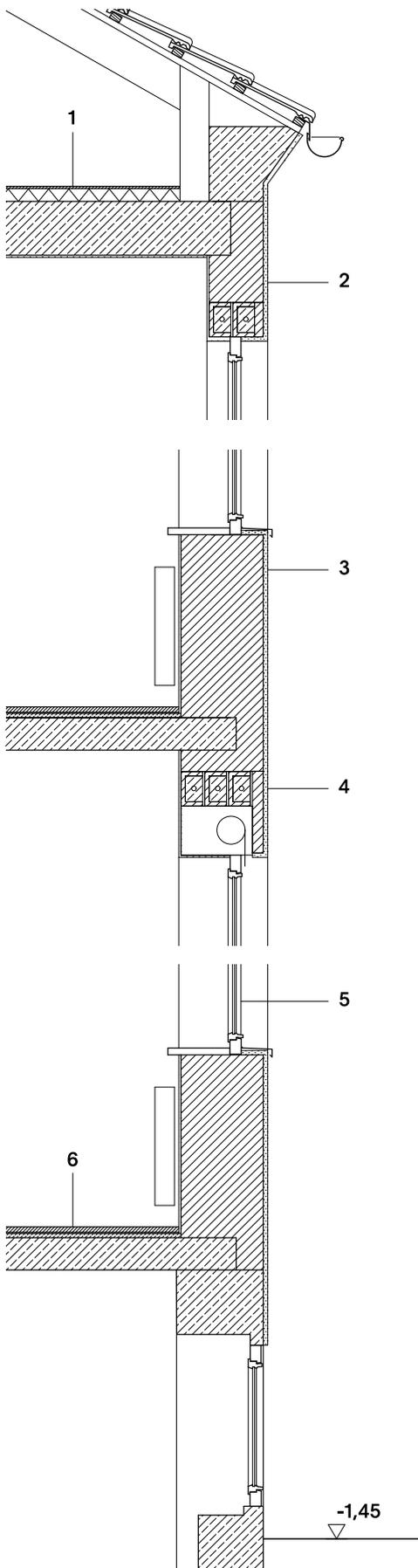
Für die Fenster wurde unabhängig vom Sanierungszustand ein U-Wert von $2,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ angenommen, welcher lt. Tabelle [BAnz, 2020] in allen Baualtersklassen für bauzeitliche Holzfenster mit Doppelverglasung angenommen werden kann. Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit der folgenden Untersuchungen.

2.4.1. Baukonstruktion der Repräsentanten

Um die Konstruktion im Ganzen zu erfassen und die Erkenntnisse zu dokumentieren, wurde zu jedem Repräsentanten Fassadenschnitte im Maßstab 1:20 angefertigt und sind im Folgenden beschrieben:

BAK 01, Claudius-Keller-Straße, Baujahr 1950:

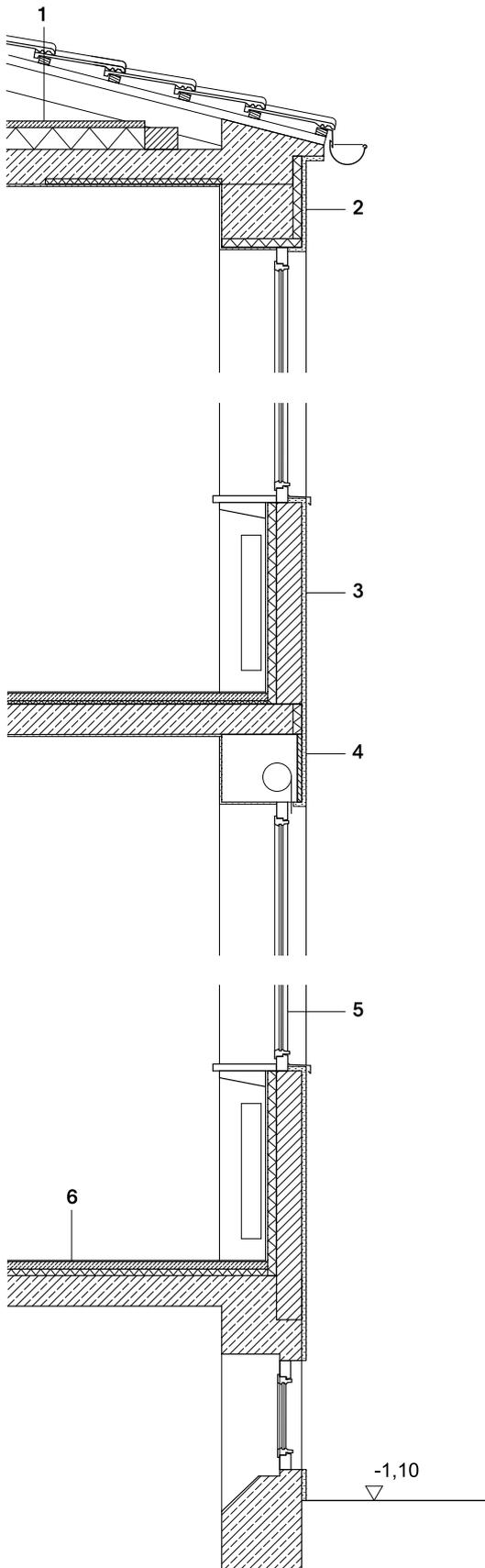
Die Konstruktion ist in Massivbauweise mit Außenwänden in verputztem Vollziegelmauerwerk ausgeführt. Der Wandquerschnitt der Außenwände verjüngt sich nach oben hin: in den unteren beiden Geschossen beträgt die Wandstärke 38 cm, in den oberen beiden Geschossen 25 cm. Statisches System ist die Längswandbauweise, in dem die Geschosdecken zwischen den Außenwänden und parallel liegenden Innenwänden in der Gebäudemitte aufliegen. Die Geschosdecken wurden als Stahlbetonfertigteildecken ausgeführt. Die Fensterstürze bestehen aus bewehrten Mauerwerksbalken. Darunter befinden sich im Erdgeschoss und in allen Geschossen südseitig Rollladenkästen. Die Fenster sind südseitig bauzeitliche Holzfenster mit 2-fach Verglasung, nordseitig, zur stark befahrenen Straße, wurden sie durch Kunststofffenster mit Isolierverglasung ersetzt. Die oberste Geschosdecke wurde teilweise nachträglich gedämmt.



- 1 Spanplatte 15 mm
Dämmung 60 mm
Stahlbeton-Fertigteildecke 250 mm
Innenputz 10 mm
- 2 Außenputz 20 mm
Vollziegel 250 mm (2.+3.OG)
Innenputz 10 mm
- 3 Außenputz 20 mm
Vollziegel 380 mm (EG+1.OG)
Innenputz 10 mm
- 4 Außenputz 20 mm
Putzträgerplatte 40 mm
2-3 MW-Balken bew. 10/16
darunter Rolladenkasten (im EG + südseitig)
Innenputz 10 mm
- 5 Holzfenster, zwei Scheiben (südseitig)
Kunststofffenster, Isolierverglasung (nordseitig)
- 6 Fußbodenaufbau 50 mm
Stahlbeton-Fertigteildecke 250/150 mm

BAK 02, Isareckstraße, Baujahr 1966:

Die Konstruktion wurde in Massivbauweise mit Außenwänden aus verputzten Hochlochziegeln ausgeführt. Die Mauerwerksstärke beträgt 36,5 cm. Unter den Fenstern befinden sich Heizkörpernischen, die mit einer Innendämmung versehen sind. Das statische System ist die Schottenbauweise, bei der die Geschossdecken zwischen den quer zur Außenwand liegenden Innenwänden aufliegen. Die Geschossdecken wurden als Stahlbetondecken ausgeführt. Dabei wurden die Loggien- bzw. Balkonplatten ohne thermische Entkopplung mitbetoniert. Die Fensterstürze bestehen aus Stahlbeton und sind außen- und unterseitig mit einer dünnen Dämmschicht versehen. Im Bereich der darüber liegenden Balkonplatten sind sie zudem innen- und deckenunterseitig gedämmt. Im Erdgeschoss befinden sich anstelle der Fensterstürze Rollladenkästen. Die Fenster wurden durch Kunststofffenster mit Isolierverglasung erneuert. Ein Fensterelement pro Wohnung ist als Fenstertür zum Balkon hin ausgeführt. Die oberste Geschossdecke ist gedämmt.



- 1 Zementestrich 30 mm
Dämmung 100mm
Stahlbetondecke 160/140 mm
Innenputz 10 mm
- 2 Außenputz 20 mm
Dämmung Durisol 40 mm
Fenstersturz Stahlbeton
Innenputz 10 mm
- 3 Außenputz 20 mm
Hochlochziegel 365 mm
Innenputz 10 mm
bzw. unter Fenster:
Heizkörpernische, innengedämmt
- 4 Außenputz 20 mm
Putzträgerplatte
Rolladenkasten im EG
Innenputz 10 mm
- 5 Kunststofffenster, Isolierverglasung
- 6 Linoleum 5 mm
Eporit-Estrich 35 mm
Bitumenpapier
Torf-Isotherm 30 mm
Stahlbetondecke 160/140 mm

Abbildung 13 Fassadenschnitt BAK 02, o.M.

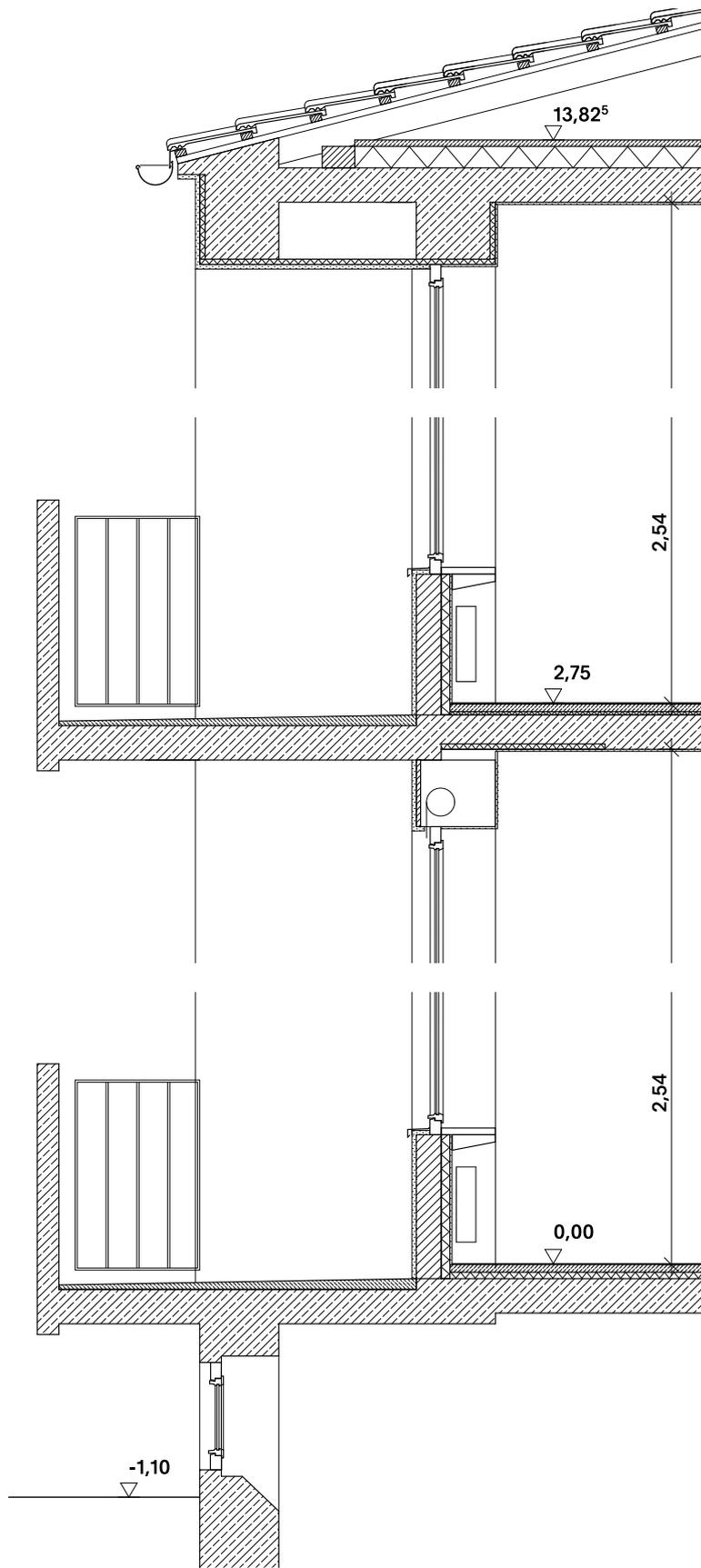
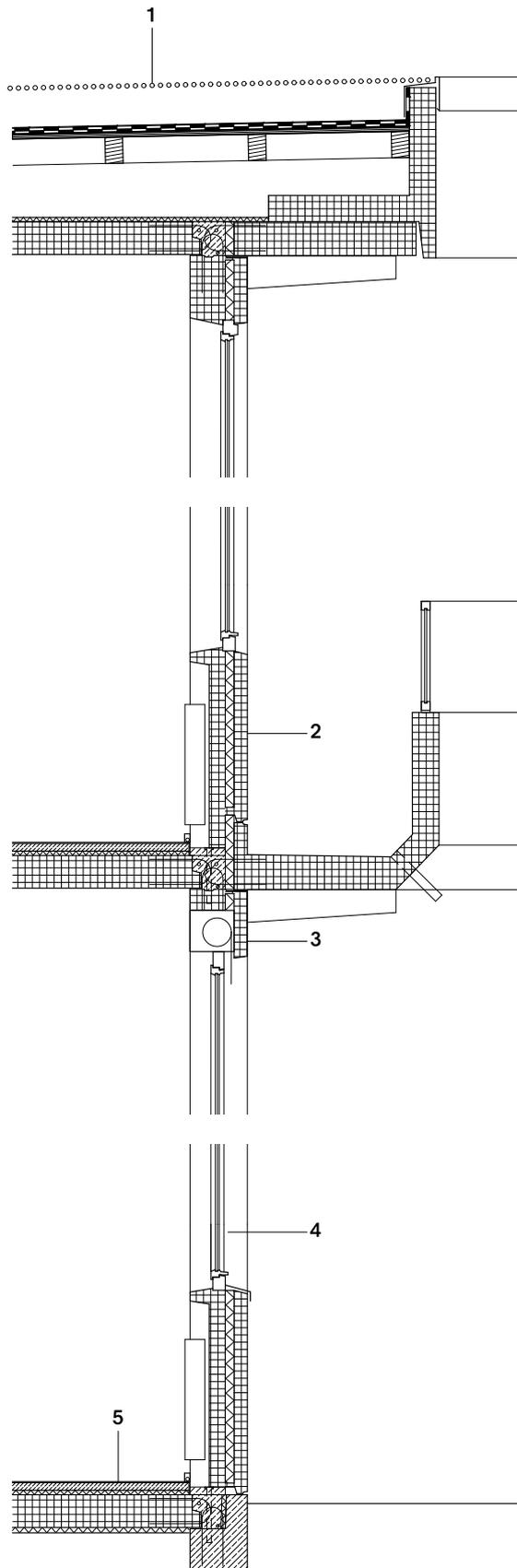


Abbildung 14 Fassadenschnitt mit Balkonen BAK 02, o.M.

BAK 03, Lindenring, Baujahr 1971:

Die Konstruktion wurde in standardisierter Beton-Fertigteilbauweise ausgeführt. Der Entwurf stammt vom Architekturbüro von Werz/Ottow, die Ausführung erfolgte durch die Bayerische Fertigbau Garching. Bei der Bauweise nach dem „System Coignet“ handelt es sich um einen Großtafelbau, bei dem alle Bauteile seriell in der Fabrik hergestellt werden. Die 26 cm starken Außenwände sind dabei zweischalig mit innenliegender Dämmschicht ausgeführt und auch die Fensterelemente sind bereits bei der Herstellung integriert. Auf der Baustelle wurden die raumgroßen kreuzweise bewehrten, allseitig aufgelagerten 15 cm starken Deckenplatten durch Ringanker, Kantenverzahnung und Fugenverguss zu Scheiben zusammengeschlossen. Decken und Wände wurden zusätzlich durch Bewehrungsschlaufen kraftschlüssig verbunden. Die umlaufenden Balkone sind thermisch entkoppelt. Unter den Fenstern befinden sich Heizkörpernischen, wodurch sich die Wandstärke hier auf 8 cm reduziert. Ein Fensterelement pro Wohnung ist als Fenstertür ausgeführt. Die alten Fenster wurden durch Kunststoffenster mit Isolierversglasung ersetzt. Im Erdgeschoss gibt es Rollläden. Das Flachdach ist als Kaltdach ausgeführt.

Bei diesem Repräsentanten lagen weitere Unterlagen wie Baubeschreibung und Statik vor. Weitere Quellen: [Berndt, Montagebauarten des Wohnungsbaus in Beton, Bauverlag Wiesbaden, 1969], [Schienbein, Beton-Bauweisen von Wohnhochhäusern der 1960er Jahre, Fachhochschule Potsdam, 2017]

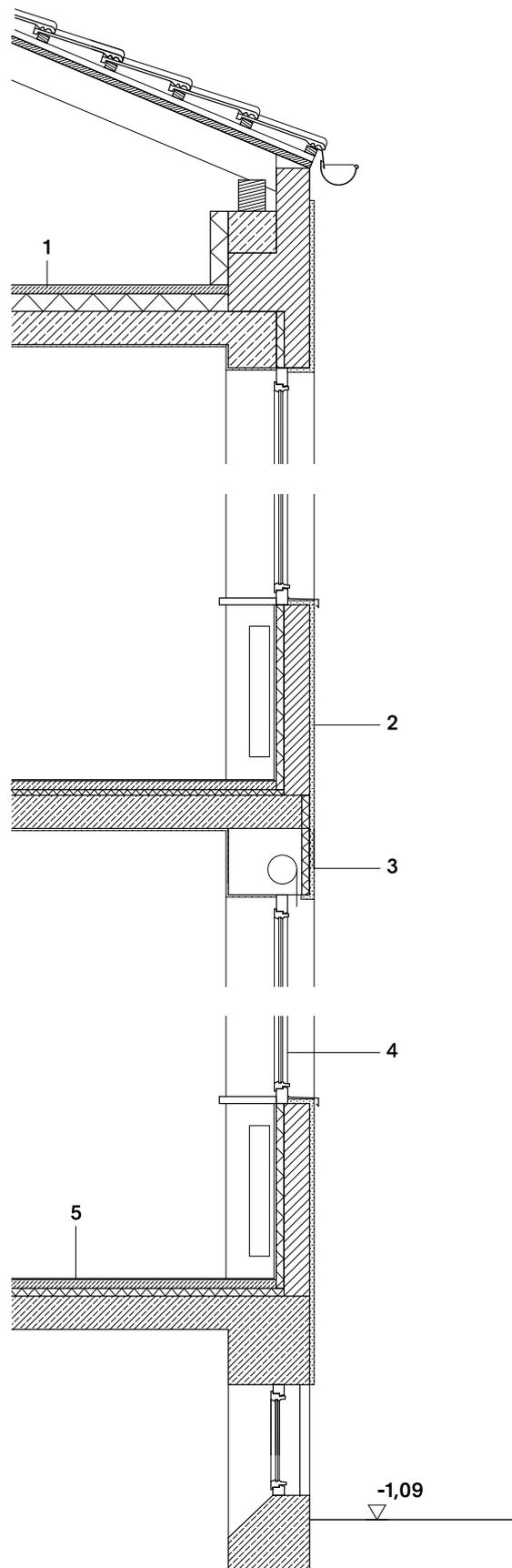


- 1 Kies
Bitumenpappe, mehrschichtig
Tragkonstruktion aus Holz
Luftschicht, 250 mm
Polystyrol-Hartschaumplatte, 20mm
Stahlbeton-Fertigteildecke 150 mm
- 2 Stahlbetonmassivbau, Fertigteilbauweise
zweischalig mit Dämmung 260mm,
System Coignet:
Stahlbeton 60mm
Polystyrol-Hartschaumplatten, doppellagig, 40mm
Stahlbeton 160mm (bzw. 80mm bei Heizkörpernischen)
- 3 Stahlbeton 60mm
Rolladenkasten im EG
- 4 Kunststofffenster, Isolierverglasung
- 5 Korklinoleum 3 mm
Estrich 35 mm
Mineralwolle 15 mm
Stahlbeton-Fertigteildecke 150 mm
Holzwolle-Leichtbauplatten 25mm

Abbildung 15 Fassadenschnitt BAK 03, o.M.

BAK 04, Josepshburgstraße, Baujahr 1982

Die Konstruktion wurde in Massivbauweise mit Außenwänden in verputztem Mauerwerk aus Hochlochziegeln ausgeführt. Die Mauerwerksstärke beträgt 36,5 cm. Unter den Fenstern befinden sich Heizkörpernischen, die mit einer Innendämmung versehen sind. Das statische System ist die Schottenbauweise, bei der die Geschosdecken zwischen den quer zur Außenwand liegenden Innenwänden aufliegen. Die Geschosdecken wurden als Stahlbetondecken ausgeführt. Die Loggien-, bzw. Balkonplatten sind thermisch entkoppelt. Die Fensterstürze bestehen aus Stahlbeton. In Fensterebene befindet sich eine Dämmschicht, außenseitig folgt das Mauerwerk. Im Erdgeschoss gibt es anstelle des Fenstersturzes Rollladenkästen. Die Fenster sind im Originalzustand als Holzfenster mit Zweifachverglasung erhalten. Der Zustand variiert je nach Wetterseite. Alle Fensterelemente zu den Balkonen sind bodentief ausgeführt. Die oberste Geschosdecke ist gedämmt.



- 1 Zementestrich 40 mm
Dämmung 80 mm
Stahlbetondecke 150 mm
Innenputz 10 mm
- 2 Außenputz 20 mm
Hochlochziegel 365 mm
Innenputz 10 mm
bzw. unter Fenstern:
Heizkörpernische, innengedämmt
- 3 Außenputz 20 mm
Putzträgerplatte/Dämmung
Rolladenkasten im EG
Innenputz 10 mm
- 4 Holzfenster, zwei Scheiben
- 5 PVC 5 mm
Estrich 40 mm
Pappe
Dämmung 35 mm
Stahlbetondecke 150 mm

Abbildung 16 Fassadenschnitt BAK 04, o.M.

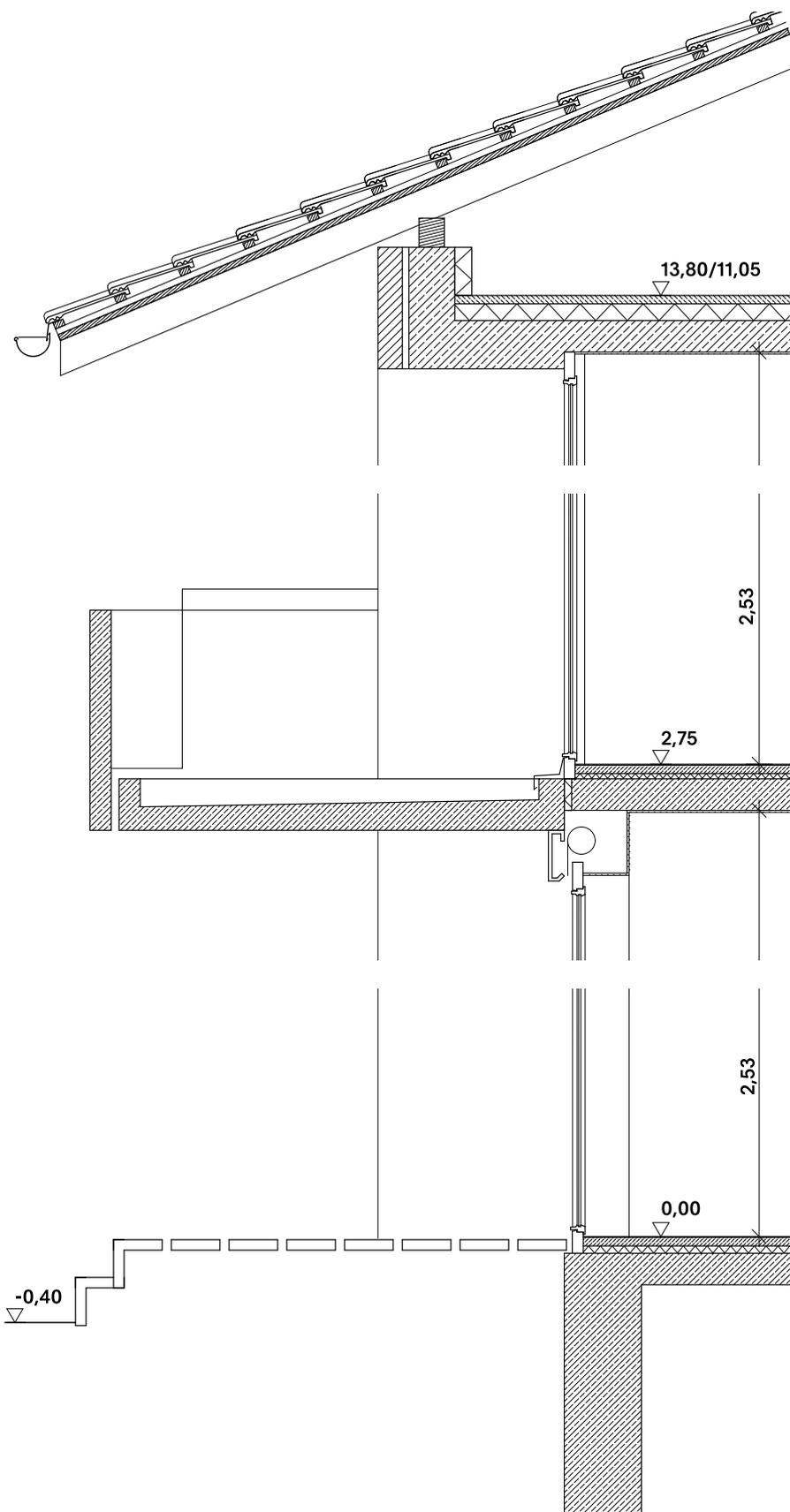


Abbildung 17: Fassadenschnitt mit Balkonen BAK 04, o.M.

2.4.2. Energetischer Standard der Repräsentanten

BAK 01, Claudius-Keller-Straße, Baujahr 1950:

Die Bauweise ist in vielen Punkten mit einem Vorkriegsgebäude vergleichbar, wie das Vollziegelmauerwerk im Reichsformat und der sich in den oberen Geschossen verjüngende Wandquerschnitt. Die Wärmedurchgangskoeffizienten der Hüllfläche sind dementsprechend hoch. Zudem gibt es keine Kompensationsmaßnahmen an Wärmebrücken, die vor allem an den mit bewehrten Mauerwerksbalken ausgebildeten Fensterstürzen und teilweise darunter verbauten Rollladenkästen vorzufinden sind. Die Bauweise kann als repräsentativ für die Nachkriegsjahre und damit dem Beginn der BAK 01 eingeordnet werden. Es wurde sehr materialsparend gebaut und die erste Verordnung zum energiesparenden Bauen (DIN 4108 - Wärmeschutz im Hochbau), 1952 eingeführt, stand noch bevor [Giebeler et al., Atlas Sanierung, Birkhäuser, 2008, S.173].

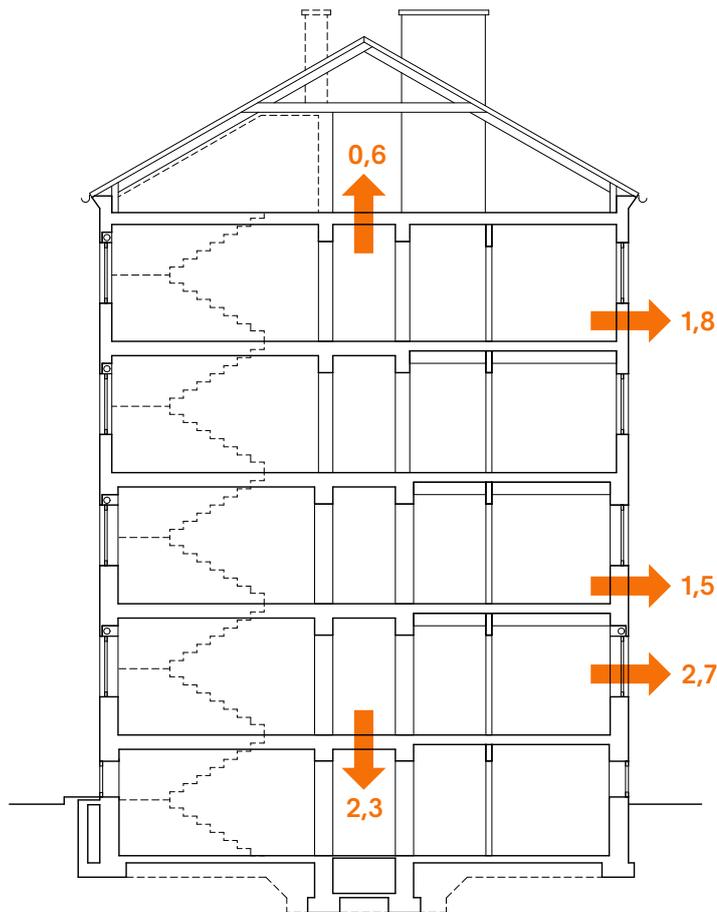


Abbildung 18: Gebäudeschnitt BAK 01 o.M, mit U-Werten (W/m²K) lt. Tabelle [BAnz, 2020]

BAK 02, Isareckstraße, Baujahr 1966:

Die Bauweise zeigt den Einsatz von vielen neuen Baustoffen, wie Hohlblockziegel und verschiedenen Dämmmaterialien. Zudem wurden Wärmebrücken reduziert, da alle Stürze mit einer dünnen Dämmschicht versehen und Fensternischen innengedämmt wurden. Auch die oberste Geschossdecke war schon bauzeitlich gedämmt und die Decke zum Kellergeschoss wie alle Geschossdecken mit Trittschalldämmung versehen. Die Wärmedurchgangskoeffizienten der Hüllfläche sind dementsprechend sehr viel besser als beim Repräsentanten der BAK01. Schwachstellen gibt es allerdings noch an den Balkonplatten, da diese nicht thermisch getrennt sind. Die Bauweise kann als repräsentativ für die BAK 02 eingeordnet werden. Die eingeführten Verordnungen von 1952 (DIN 4108) und 1959 (DIN 4109) führten zu einem energiesparenderen Bauen. Zudem ermöglichte der Bauboom der 1950er und 1960er Jahre die Entwicklung neuer Baustoffe [Giebeler et al., Atlas Sanierung, Birkhäuser, 2008, S.173 ff].

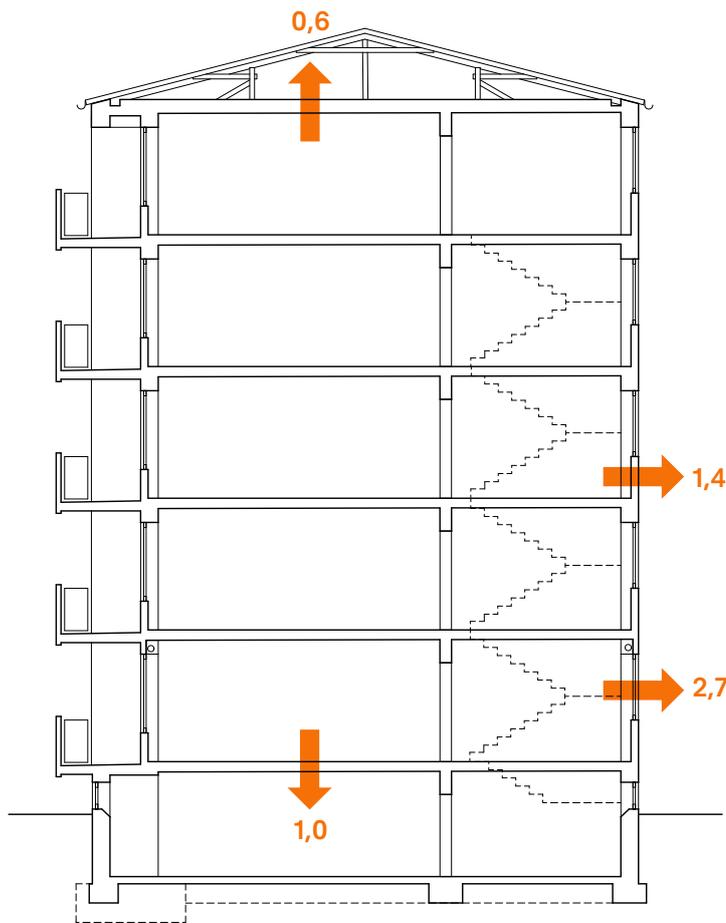


Abbildung 19: Gebäudeschnitt BAK 02 o.M, mit U-Werten (W/m²K) lt. Tabelle [BAnz, 2020]

BAK 03, Lindenring 4, Baujahr 1971:

Durch das enorme Bauvolumen, steigende Löhne und sinkende Materialpreise entstanden neue Bautechniken. Die Beton-Fertigteilebauweise etablierte sich im Laufe der 1960er Jahre im Zuge der Errichtung von großen Stadterweiterungsgebieten und hatte zur Bauzeit des Repräsentanten seine Hochphase. Die Bauweise war solide und der doppelschalige Wandaufbau verbesserte nochmal die Wärmedurchgangskoeffizienten der Hüllfläche. Mit der ersten Ölpreiskrise 1973 und der aufkommenden Kritik an Hochhaussiedlungen kam es zu einer Abkehr der Entwicklung von großen Stadterweiterungen und damit einem Ende der Rentabilität der Fertigteilebauweise [Giebeler et al, 2008].

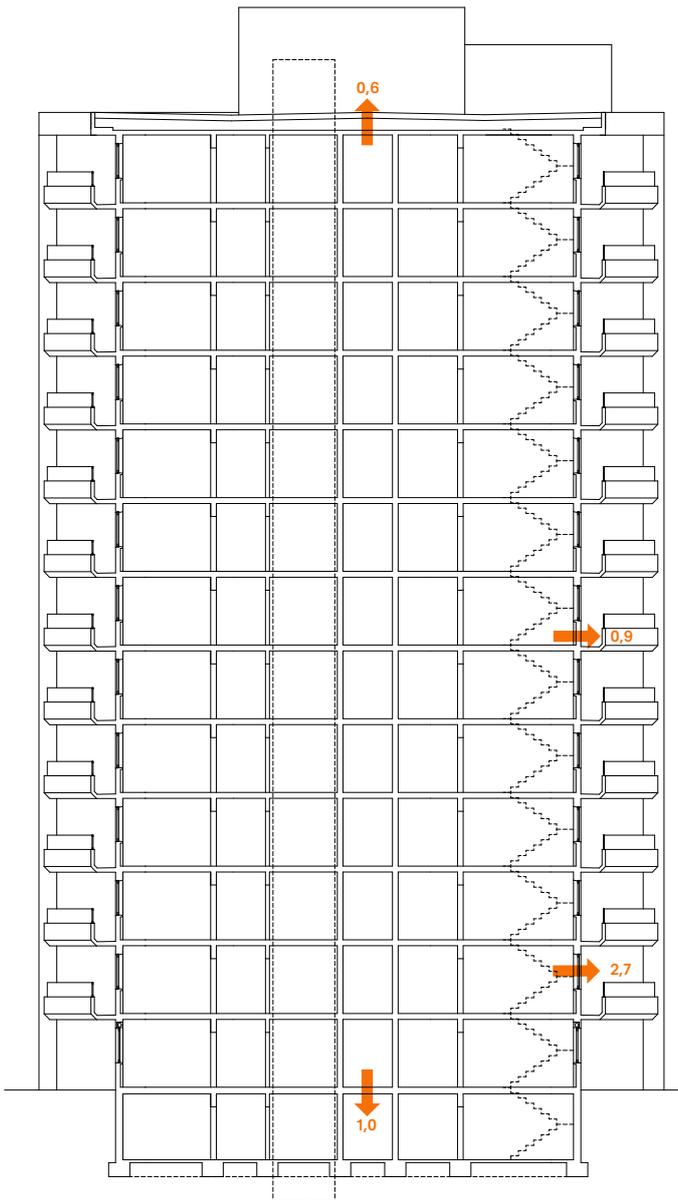


Abbildung 20: Gebäudeschnitt BAK 03 o.M., mit U-Werten (W/m²K) lt. Tabelle [BAnz, 2020]

BAK 04, Josefsburgstraße, Baujahr 1982

Auch wenn die Konstruktion mit Außenwänden in Hohlblockziegeln der BAK02 ähnelt, haben sich die Wärmedurchgangskoeffizienten der Hüllfläche im Vergleich zu dieser um einiges verbessert. Die Balkonplatten sind thermisch entkoppelt und Wärmebrücken sind durchgehend berücksichtigt und kompensiert. Die Baukonstruktion ist aus energetischer Sicht um einiges besser als die Repräsentanten der übrigen Baualtersklassen, was sich auf neue gesetzliche Vorgaben infolge der Ölpreiskrisen der 1970er Jahre, wie das Beiblatt zur DIN 4108 (1974), das

Energieeinsparungsgesetz (EnEG) (1976) und die 1. Wärmeschutzverordnung (1977), zurückführen lässt.

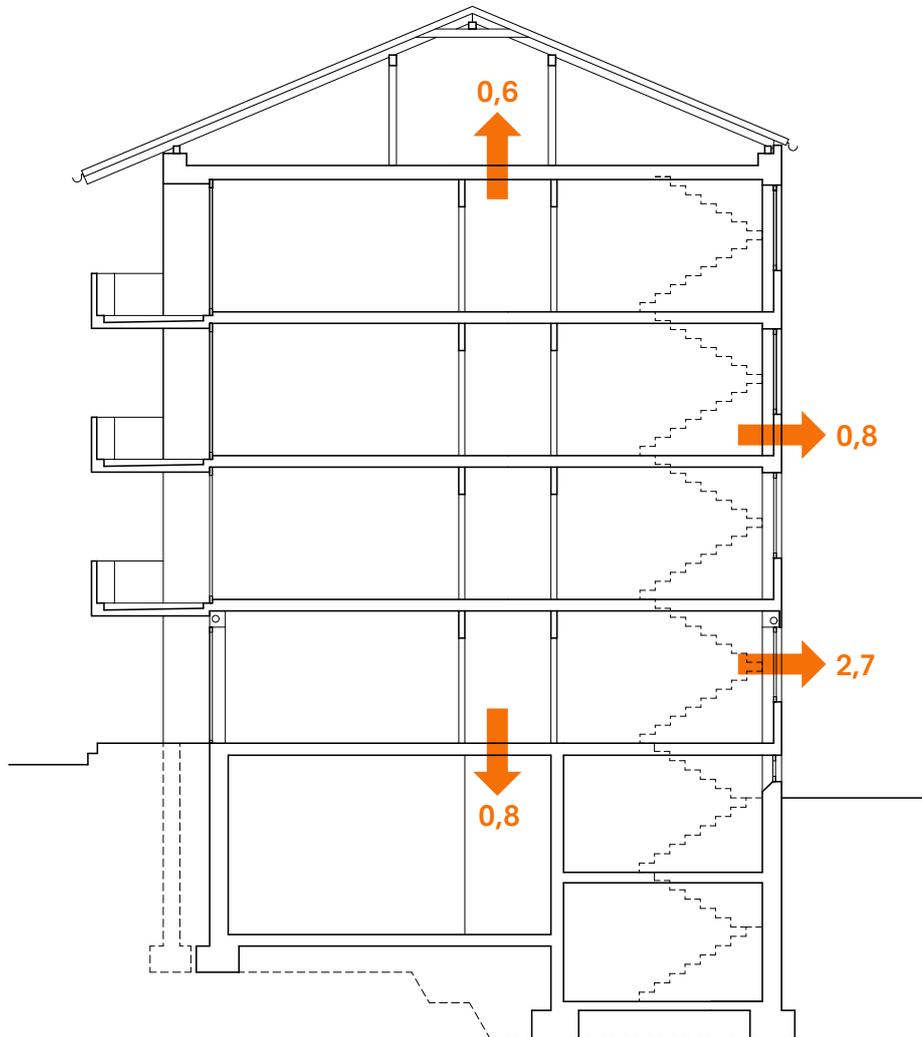


Abbildung 21: Gebäudeschnitt BAK 04 o.M, mit U-Werten (W/m²K) lt. Tabelle [BANz, 2020]

2.4.3. Untersuchte Sanierungs-Varianten

Nach Recherche und Bewertung der Repräsentanten wurden diese mit verschiedenen Sanierungsvarianten verknüpft. Ziel dabei war, eine breite Palette an Sanierungsstrategien zu berücksichtigen - von minimalinvasiven Einzelmaßnahmen bis hin zum Effizienzhaus 55 Standard. Dabei sollten übliche, in der Praxis erprobte und am Markt verfügbare Methoden zum Einsatz kommen.

Die Sanierungsvarianten setzen sich wie folgt zusammen:

- Einzelmaßnahmen, bei denen jeweils nur eine Bauteilart der Gebäudehülle energetisch ertüchtigt wird.
- kombinierte Maßnahmen, bei denen mehrere Bauteilarten der Gebäudehülle energetisch ertüchtigt werden.
- EH55 - Maßnahme, bei der das gesamte Gebäude vollumfänglich im Sinne der Förderung nach Effizienzhaus 55 Standard energetisch ertüchtigt wird.

Hinsichtlich vergleichbarer Ergebnisse wurden dieselben Maßnahmen grundsätzlich bei allen 4 Repräsentanten angewendet werden.

Die Maßnahmen sind wie folgt benannt und wurden in Übersichtsgrafiken dargestellt:

- D: Dämmung der obersten Geschossdecke
- K: Dämmung der Decke zum Kellergeschoss
- G: Glasaustausch
- F: Fenstertausch
- AWI: Dämmung der Außenwand auf der Innenseite (Innendämmung)
- AW: Dämmung der Außenwand auf der Außenseite
- EH55: Dämmung des gesamten Gebäudes nach Effizienzhaus 55 Standard

Die Dämmmaßnahmen richten sich nach der [Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen, 2023]. Dies ist übliche Praxis, um die die Bundesförderung für Einzelmaßnahmen zu erhalten und stellt daher einen sinnvollen Untersuchungsrahmen dar. Für die Komplettisanierung nach EH55-Standard sind die Vorgaben der KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau) maßgebend. Detaillierte Angaben zu verwendeten Materialien, Dämmstärken und Kosten sowie weitere Kennwerte der Repräsentanten sind in der Anlage 2 zu finden.

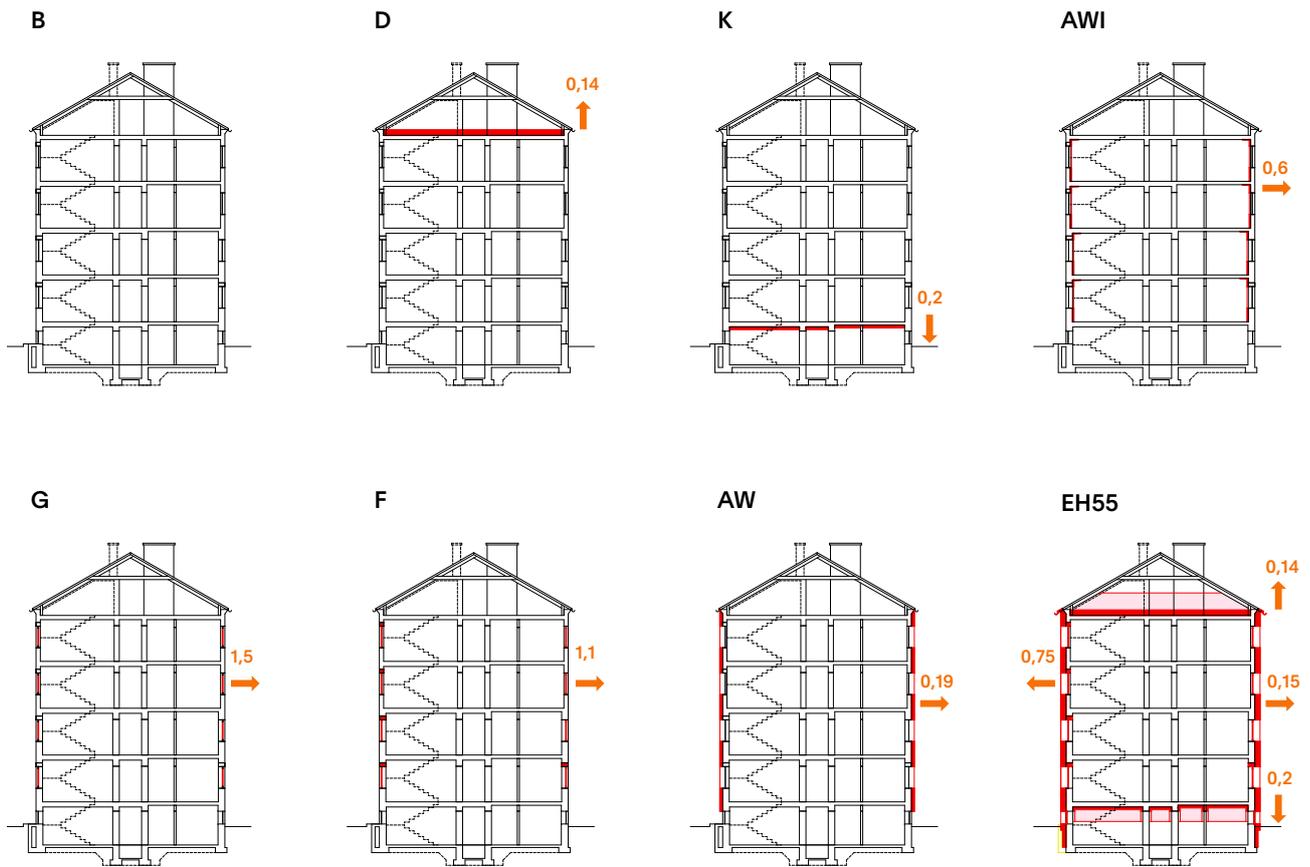


Abbildung 22: Sanierungsvarianten BAK 01 o.M. mit durch die Sanierungsmaßnahmen erreichten U-Werten (W/m²K)

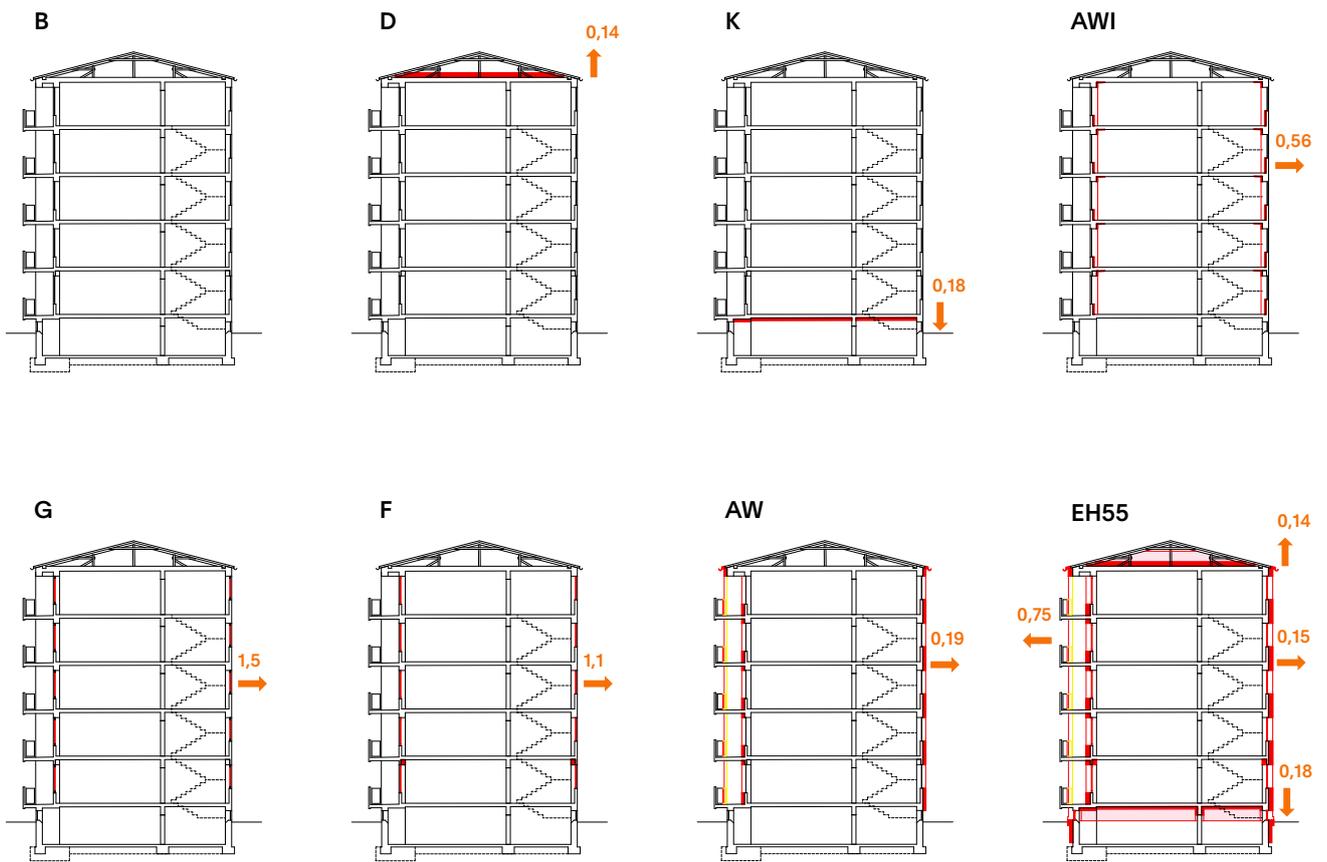


Abbildung 23: Sanierungsvarianten BAK 02 o.M. mit durch die Sanierungsmaßnahmen erreichten U-Werten (W/m²K)

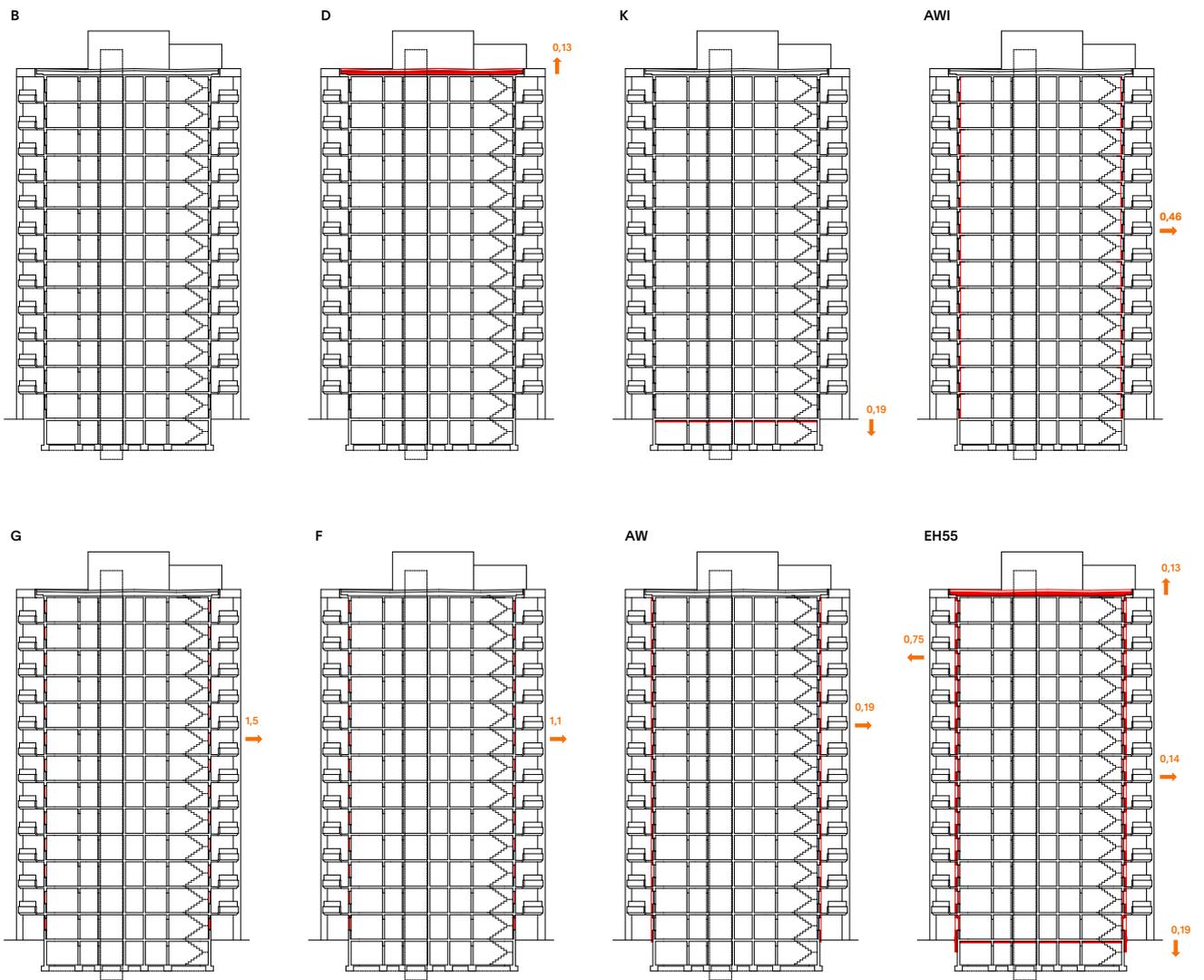


Abbildung 24: Sanierungsvarianten BAK 03 o.M. mit durch die Sanierungsmaßnahmen erreichten U-Werten (W/m²K)

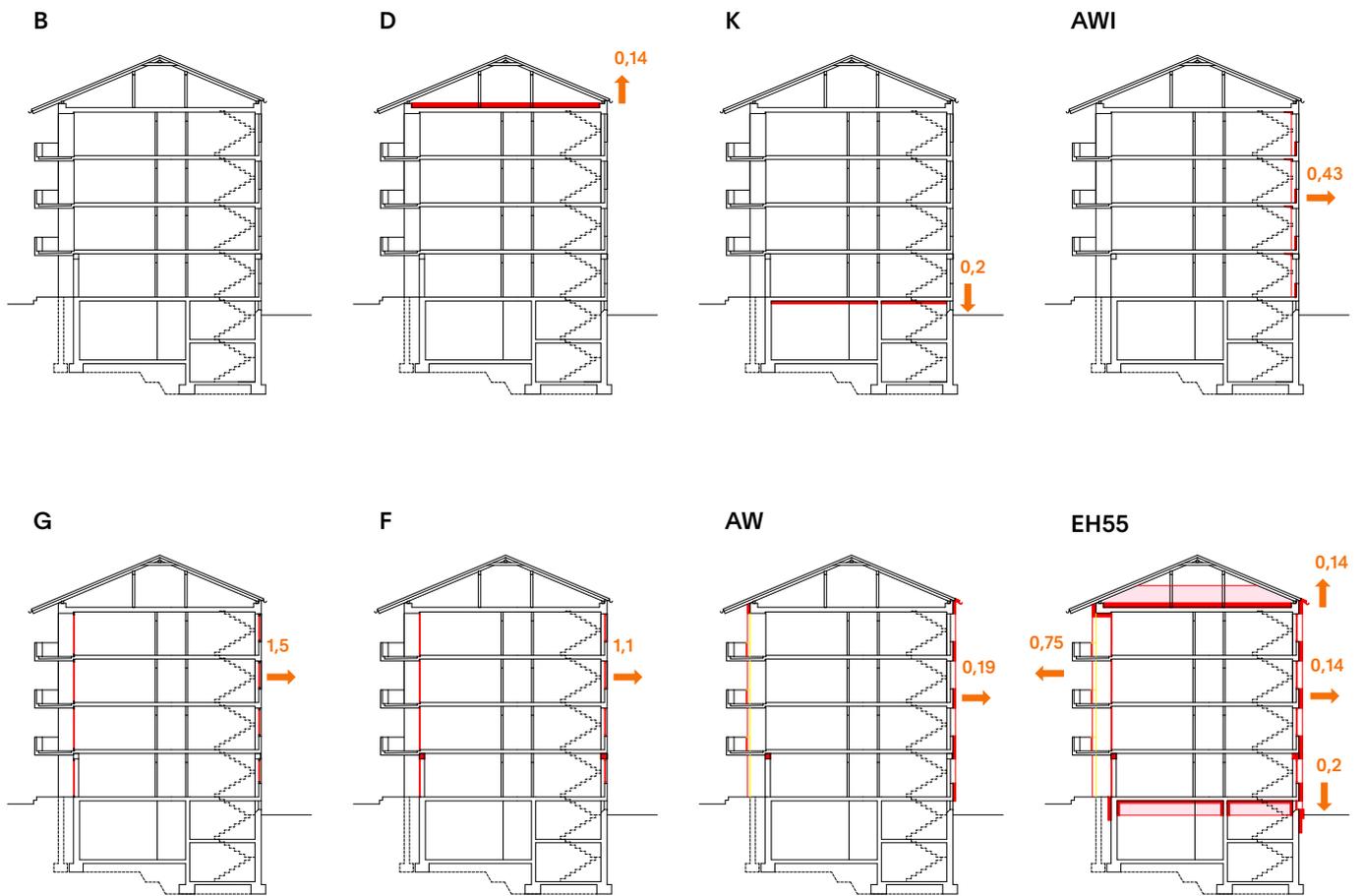


Abbildung 25: Sanierungsvarianten BAK 04 o.M. mit durch die Sanierungsmaßnahmen erreichten U-Werten (W/m²K)

2.5. AP 5 Raumklima und Energie

2.5.1. Datengrundlage

Ergänzend zum Datensatz des Gebäudebestands der *Münchner Wohnen*, welcher Informationen zur Heizungsart, zum eingesetzten Primärenergieträger bzw. Wärmeerzeuger, zum Baujahr des Wärmeerzeugers sowie zur Struktur der Wärmeversorgung (zentral/dezentral) enthält, wurden für die untersuchten Referenzgebäude weitere Unterlagen von der Wohnungsgesellschaft zur Verfügung gestellt. Dazu zählen Energieverbrauchsausweise, teils nur für einzelne Hausnummern der Referenzgebäude, mit Zählerständen für Heizung und Warmwasser über drei aufeinanderfolgende Verbrauchsjahre. Darüber hinaus lagen teilweise versorgungstechnische Planunterlagen vor (vollständig für Baualternsklasse 4, teilweise für Baualternsklasse 1). Im Rahmen einer Vor-Ort-Begehung wurden zudem die Technikräume der Gebäude besichtigt, um die Heizenergieversorgung zu validieren.

Sichtung der Datensätze der Kooperationspartner

Im ersten Schritt der Analyse wurde der Datensatz hinsichtlich der Art der Heizenergieversorgung ausgewertet. Dabei erfolgt bei der *Münchner Wohnen* eine Differenzierung nach den Kategorien Fernwärme, Erdgas, Pellets, Elektrospeicheröfen sowie Wärmepumpe. Durch die zusätzliche Information, ob es sich um ein zentrales oder dezentrales Heizsystem handelt, lässt sich im Fall des Energieträgers Gas weiter differenzieren, ob es sich voraussichtlich um eine zentrale Gaskesselanlage oder um wohnungsweise installierte Gasetagenheizungen bzw. raumweise Gaseinzelöfen handelt. Eine abschließende Prüfung der Richtigkeit der Angaben war im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht möglich, jedoch konnten einzelne Unstimmigkeiten im Datenbestand identifiziert werden. So steht beispielsweise die Angabe „Pellets“ für das repräsentative Gebäude der Baualternsklasse 3 im Widerspruch zur tatsächlichen Wärmeversorgung über Fernwärme. Eine Übersicht der Ergebnisse nach Baualternklassen ist Abbildung 7 zu entnehmen.

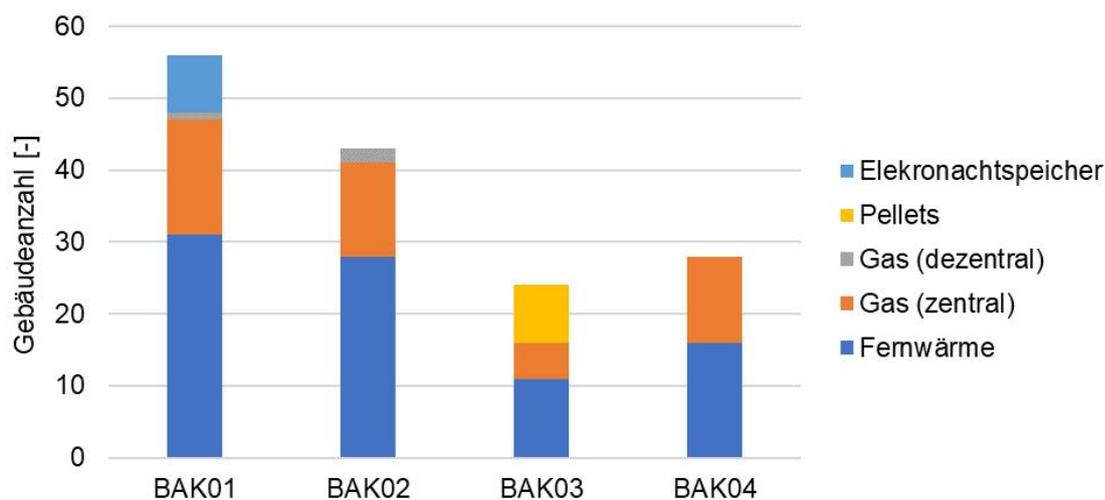


Abbildung 26: Primärenergieträger bzw. Wärmeerzeuger der Baualterklassen nach Anzahl [-]

Etwa die Hälfte der betrachteten Gebäude aller Baualterklassen wird derzeit über Fernwärme versorgt. Für die *Münchner Wohnen* stellt Fernwärme eine strategisch sinnvolle, technisch zuverlässige und langfristig klimafreundliche Lösung dar, die sich insbesondere für großmaßstäbliche und dauerhaft bewirtschaftete Wohnbestände eignet, wie sie typischerweise im Bestand der städtischen Wohnungsbaugesellschaft anzutreffen sind. Im bundesweiten Vergleich liegt der Anteil der Fernwärmeversorgung bei Mehrfamilienhäusern hingegen deutlich niedriger und beträgt lediglich rund 15 % [BDEW, 2024].

Den zweitgrößten Anteil an der Wärmeversorgung der analysierten Gebäude bildet Erdgas. In der Mehrzahl der Fälle handelt es sich hierbei um zentrale Heizsysteme. Nur in Baualterklasse 2 finden sich noch vereinzelte dezentrale Gasversorgungen. Deutschlandweit wird Erdgas nach wie vor bei über 40 % aller Mehrfamilienhäuser als primärer Energieträger eingesetzt [BDEW, 2024]. Zweitgrößter Primärenergieträger bei Mehrfamilienhäusern stellt Erdöl, mit über 20 % dar. Somit wird ein Großteil der MFH in Deutschland immer noch mit fossilen Energien versorgt.

Darüber hinaus befinden sich im Gebäudebestand der Baualterklasse 1 weiterhin einige dezentrale Elektronachtspeicherheizungen. Diese Systeme stellen nach heutiger Bewertung eine wenig energieeffiziente, jedoch im Bestand noch verbreitete Heiztechnik dar. Im deutschen Vergleich werden 9 % des Mehrfamilienhausbestandes über dezentrale Systeme beheizt [BDEW, 2024].

Bei keinem der untersuchten Gebäude stimmt das Baujahr des zentralen Wärmeerzeugers mit dem Baujahr des Gebäudes überein. Dies deutet darauf hin, dass sämtliche Wärmeerzeuger im Verlauf des Gebäudebetriebs bereits mindestens einmal ausgetauscht wurden. Im Rahmen der Begehungen der Referenzgebäude konnte zudem festgestellt werden, dass auch einzelne Heizkörper nicht mehr dem Originalzustand entsprechen (beispielsweise in Baualtersklasse 1).

In den untersuchten Repräsentanten erfolgt die Trinkwassererwärmung über den zentralen Wärmeerzeuger. Für Gebäude mit dezentraler Heiztechnik liegen hingegen keine spezifischen Daten zur Warmwasserbereitung vor, sodass hierzu keine Aussagen getroffen werden können. Basierend auf der üblichen Praxis in vergleichbaren Bestandsgebäuden ist jedoch davon auszugehen, dass die Trinkwassererwärmung in diesen Fällen überwiegend durch elektrische Durchlauferhitzer, elektrische Kleinspeicher (umgangssprachlich als Boiler bezeichnet) oder, im Falle von Gasetagenheizungen, durch sogenannte Kombi-Thermen erfolgt.

Ergänzend wird der aktuelle Zustand der Raumluftechnik in den untersuchten Gebäuden betrachtet. In sämtlichen Wohneinheiten der vier analysierten Referenzgebäude befinden sich innenliegende Bäder, die über Abluftventilatoren entlüftet werden. Der Einbau solcher ventilatorgestützten Abluftsysteme ist für fensterlose Sanitärräume gemäß DIN 18017-3 bauordnungsrechtlich vorgeschrieben, um einen hygienisch ausreichenden Luftwechsel sicherzustellen. Eine zentrale oder kontrollierte Wohnraumlüftung ist in keinem der Referenzgebäude vorhanden; die Belüftung der Aufenthaltsräume erfolgt ausschließlich über manuelle Fensterlüftung. In Bestandsgebäuden wird ein hygienisch ausreichender Mindestluftwechsel häufig durch unkontrollierte Infiltration über Undichtigkeiten in der Gebäudehülle, insbesondere an Fenstern und Fugen, erreicht. Wird im Zuge energetischer Sanierungsmaßnahmen die Luftdichtheit der Gebäudehülle deutlich erhöht, besteht das Risiko, dass bei unzureichendem oder fehlerhaftem Lüftungsverhalten feuchtebedingte Schäden an der Bausubstanz auftreten können.

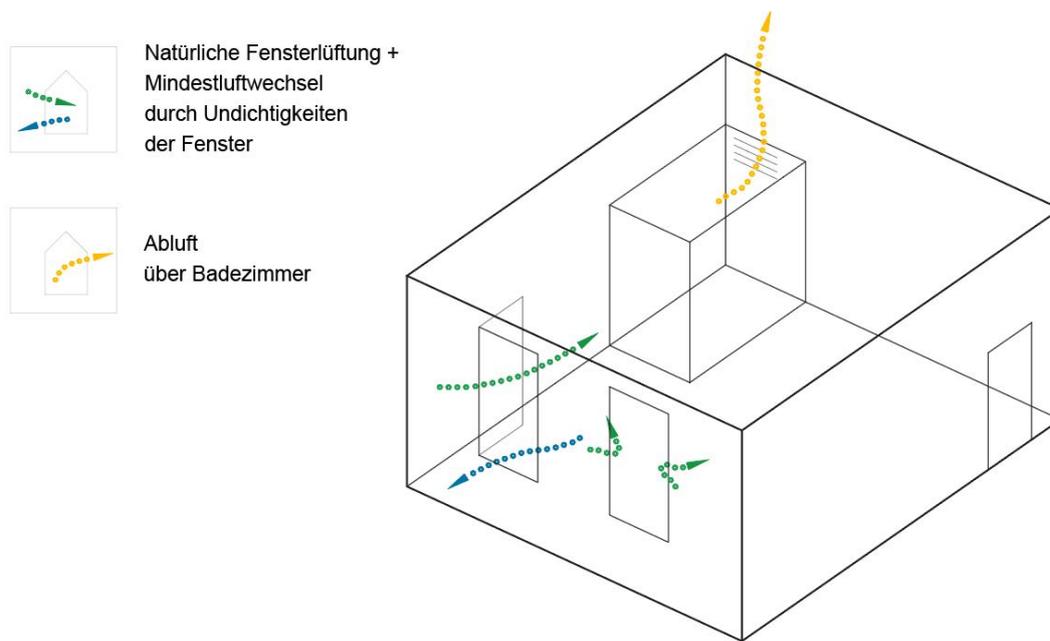


Abbildung 27: natürliches Lüftungskonzept des Bestands (eigene Darstellung)

Zielsetzung für die Lösungsansätze

Aus der vorangegangenen Analyse lassen sich zwei übergeordnete Zielsetzungen für die Entwicklung robuster und zukunftsfähiger gebäudetechnischer Systeme ableiten:

Dekarbonisierung der Wärmeversorgung: Zentrales Ziel ist die schrittweise Reduktion fossiler Energieträger, insbesondere Erdgas und Heizöl, zugunsten klimafreundlicher und möglichst treibhausgasneutraler Versorgungssysteme.

Steigerung der Versorgungseffizienz und Systemrobustheit: Darüber hinaus ist die Minimierung technischer Komplexität sowie des Wartungsaufwands von zentraler Bedeutung, um eine langfristige Betriebssicherheit zu gewährleisten. Vorrangig einzusetzen sind dabei zentrale, wartungsarme Systeme. Dezentrale und wartungsintensive Technologien, etwa Gasetagenheizungen oder Elektrospeicheröfen, sollten langfristig ersetzt werden. Die Lüftung soll sich an der Einfach-Bauen-Strategie orientieren, wobei auf eine maschinelle Wohnraumlüftung verzichtet wird, da die Studienlage aufzeigt, dass diese zu höheren Rebound Effekten führt [Knecht & Sigrist, 2019].

2.5.2. Robuste Gebäudetechniksysteme für die Einfach Um-Bauen Typologien

Auf Grundlage des Bestandes der *Münchner Wohnen* vorgefundenen gebäudetechnischen Strukturen wurden im Arbeitspaket robuste und skalierbare Lösungen für die Transformation von Versorgungssystemen hin zu klimaneutralen Betriebsweisen entwickelt. Ziel war es, bestehende gebäudetechnische Infrastrukturen weitgehend zu erhalten und so wirtschaftliche und baulich einfache Umsetzungen zu ermöglichen. Generell sollte im Zuge der Umrüstung das Bestandsnetz überprüft und bei Bedarf gewartet werden.

Klimaneutrale Wärmeversorgung

Für eine langfristig klimaneutrale Wärmeversorgung im urbanen Mehrfamilienhauskontext erscheinen insbesondere Fernwärme und Wärmepumpen als zentrale Technologien. Der Anschluss an ein Fernwärmenetz stellt insbesondere im Gebäudebestand häufig die wirtschaftlichste und technisch einfachste Lösung dar, da das Temperaturniveau in der Regel dem von konventionellen Gasheizungen entspricht und bestehende Heizkörperanlagen somit weiter genutzt werden können.

In München verfolgen die Stadtwerke bereits seit 2012 eine „Fernwärmevision“, wonach die Wärmeversorgung spätestens bis 2040 vollständig CO₂-neutral bereitgestellt werden soll – vorrangig durch den Ausbau der Tiefengeothermie, ergänzt durch Wärmepumpen und Nahwärmesysteme [SWM, o.D.]. Auch auf Bundesebene wird die Transformation der Wärmeversorgung rechtlich verbindlich vorangetrieben: Laut Wärmeplanungsgesetz müssen bestehende Wärmenetze ab 2030 mindestens 30 % erneuerbare Energien oder unvermeidbare Abwärme einbinden, ab 2040 mindestens 80 % und bis 2045 vollständig klimaneutral betrieben werden [WPG, 2023].

Alternativ bieten Wärmepumpen eine individuelle, erneuerbare Lösung, bei der Umweltwärme aus Luft, Erdreich oder Grundwasser entnommen und über einen strombetriebenen Verdichtungsprozess auf das benötigte Temperaturniveau gehoben wird. Der dafür notwendige Strom kann teilweise am Bestand, etwa durch PV-Anlagen auf dem Gebäudedach, bereitgestellt werden. Perspektivisch soll der Netzstrom in Deutschland laut Zielsetzung der Bundesregierung bis 2035 vollständig treibhausgasneutral erzeugt werden [BMWK, 2022].

Auf Wunsch des *Deutschen Jugendherbergswerks* wurden im Rahmen der Lebenszyklusanalyse zusätzlich Pelletheizungen betrachtet. Da diese Heizungsart jedoch vor allem für Gebäude im außerstädtischen Raum relevant ist, wird sie in diesem Kapitel nicht weiter vertieft. Hinsichtlich des Temperaturniveaus sind Pelletheizungen vergleichbar mit Fernwärmesystemen. Im Gegensatz zur Fernwärme erfordern Pelletheizungen allerdings einen Technikraum zur Unterbringung der Verbrennungseinheit und zur Lagerung der Pellets. Zusätzlich sind bei der Nutzung von Pelletheizungen entsprechende Abgasführungen (Kamine) vorzusehen.

Lösungen für gebäudezentrale Systeme

Alle untersuchten Repräsentanten weisen eine gebäudezentrale Heizungsstruktur auf. Kennzeichnend dafür ist jeweils ein zentraler Wärmeerzeuger für Raumheizung und Trinkwarmwasser, in der Regel in Kombination mit einem Pufferspeicher. Die Anlagen sind zumeist im Technikraum im Kellergeschoss untergebracht. Die Wärmeverteilung erfolgt über ein wassergeführtes Leitungssystem, das Heizkörper als Wärmeübergabeelemente speist. Um die Funktionsweise zu verdeutlichen wurde eine schematische Darstellung in Abbildung 28 angefertigt.

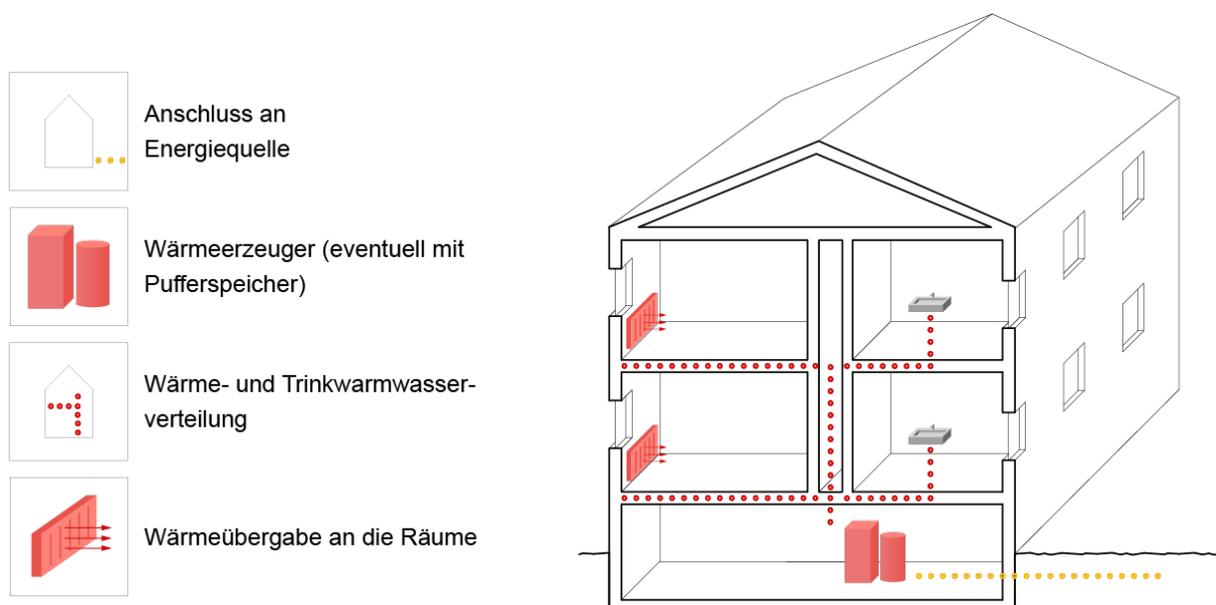


Abbildung 28: Schematische Darstellung eines gebäudezentralen Heizungsnetzes (eigene Darstellung)

Ein wesentlicher Vorteil gebäudezentraler Systeme liegt darin, dass, im Gegensatz zu anderen Wärmeversorgungssystemen, nur eine zentrale Wärmeerzeugungseinheit ersetzt bzw. erneuert werden muss. Dies reduziert den Planungsaufwand, die

Investitionskosten sowie den technischen Aufwand. Im Idealfall kann das bestehende Leitungsnetz und das Wärmeübergabesystem weiterverwendet werden. Dadurch sind nur minimale Eingriffe in den Wohnungen erforderlich, da die infrastrukturellen Voraussetzungen bereits vorhanden sind.

Ein möglicher robuster Lösungsansatz ist in Abbildung 29 dargestellt. Für den Fall, dass kein Anschluss an ein Fernwärmenetz möglich oder nicht gewünscht ist, sollte das bestehende Wärmeverteilnetz auf seine Niedertemperaturfähigkeit geprüft werden. Dies ist eine grundlegende Voraussetzung für den Einsatz einer zentralen Wärmepumpe als Wärmeerzeuger. Ist das System auch nach einer energetischen Sanierung nicht niedertemperaturfähig, können gezielte Maßnahmen ergriffen werden, wie der Austausch unterdimensionierter Heizkörper oder die Nachrüstung zusätzlicher Heizflächen in Bereichen mit erhöhtem thermischem Komfortanspruch (z. B. Badezimmer oder Wohnzimmer). Diese Nachrüstungen können auch in Form elektrischer Heizflächen erfolgen. Sollte trotz dieser Optimierungen keine ausreichende Niedertemperaturfähigkeit erreicht werden, kann die Wärmeversorgung über ein hybrides System sichergestellt werden. In diesem Fall übernimmt die Wärmepumpe den Grundlastbetrieb, während der bestehende Gaskessel für Spitzenlasten zugeschaltet wird. Eine vollständige Abdeckung durch die Wärmepumpe kann dann perspektivisch durch weitere energetische Verbesserungen oder technologische Weiterentwicklungen ermöglicht werden. Bleiben die bestehenden Heizkörper im Zuge der Umrüstung erhalten, ist es sinnvoll, nach Abschluss der Umbaumaßnahmen einen hydraulischen Abgleich des Heizsystems durchzuführen. Im Rahmen des hydraulischen Abgleichs sowie der Einstellung der Heizkurve wird sichergestellt, dass das Heizwasser gleichmäßig und entsprechend dem tatsächlichen Wärmebedarf auf alle Räume verteilt wird. Dies trägt nicht nur zur Verbesserung des thermischen Komforts bei, sondern reduziert gleichzeitig den Energieverbrauch und erhöht die Effizienz der gesamten Anlage.

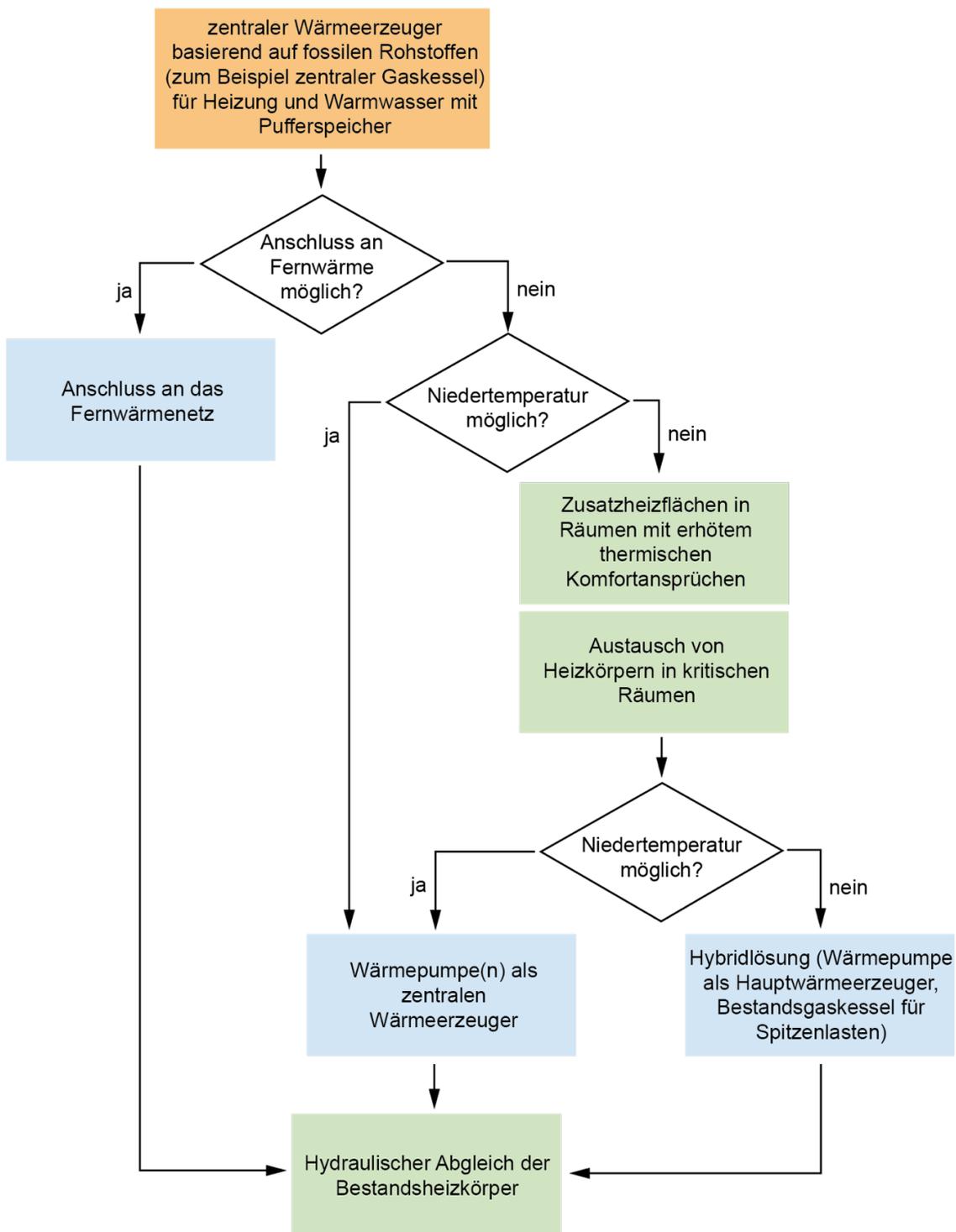


Abbildung 29: Gebäudetechnischer Lösungsansatz für den klimaneutralen Heizbetrieb bei gebäudezentralen Heizungssystemen (eigene Darstellung)

Lösungen für wohnungsweise, dezentrale Systeme

Neben gebäudezentralen Systemen sind im Bestand der *Münchner Wohnen* auch wohnungsweise, dezentrale Heizungsversorgungsstrukturen verbreitet. Ein typisches Beispiel hierfür stellen Gasetagenheizungen dar. Bei dieser Systemvariante erfolgt der Anschluss an eine zentral erschlossene Energiequelle, in der Regel Erdgas, auf Gebäudeebene. Die Energie wird anschließend zu den einzelnen Nutzungseinheiten weitergeleitet. Dort erfolgt die Erzeugung von Raumwärme und Trinkwarmwasser dezentral innerhalb der jeweiligen Wohnung. Die Wärmeverteilung innerhalb der Wohneinheit erfolgt über ein wassergeführtes Leitungssystem, das Heizkörper als Wärmeübergabeelemente versorgt.

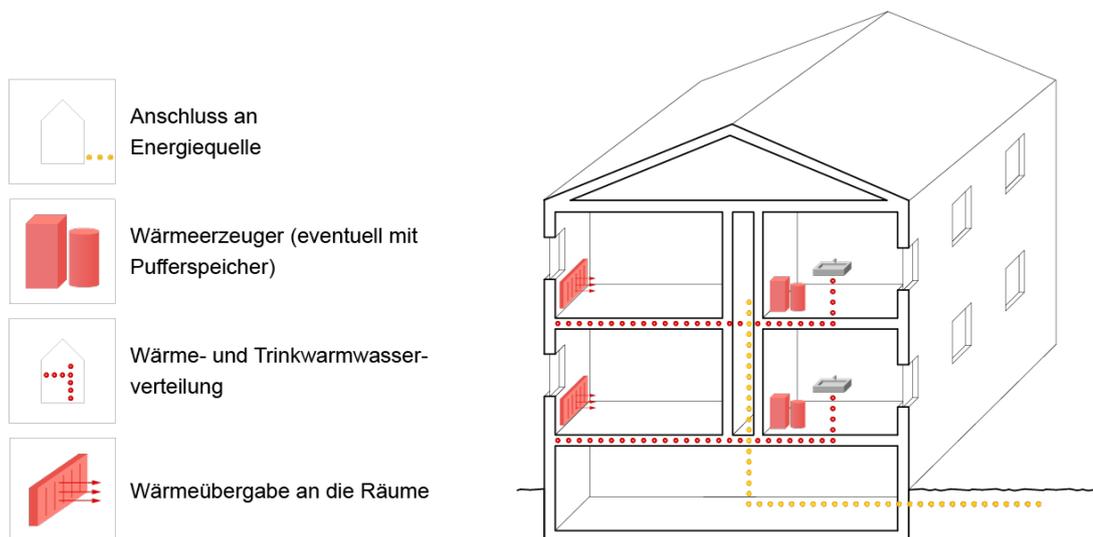


Abbildung 30: Schematische Darstellung eines wohnungsweisen, dezentralen Heizungsnetzes (eigene Darstellung)

In der Regel ist in Bestandsgebäuden mit dezentraler, wohnungsweiser Wärmeversorgung innerhalb der Wohneinheiten bereits ein wassergeführtes Heizsystem mit Heizkörpern vorhanden. Für die Umstellung auf eine zentrale Wärmeversorgung muss jedoch ein zentrales Verteilernetz zu den Wohneinheiten nachgerüstet werden. Ein entscheidender Vorteil aus Sicht der Nutzenden ist der Wegfall der Gasetagenheizung (mitunter inklusive kleinem Speicher) innerhalb der Wohnung, was zusätzlichen Raum schafft. Trotz des Aufwands bei der Zentralisierung trägt diese Maßnahme maßgeblich zur Zukunftsfähigkeit des Gebäudes bei, sowohl energetisch als auch in Bezug auf Emissionsminderung und Wartungsintensität.

Die Nachrüstung des zentralen, wassergeführten Leitungsnetzes kann über stillgelegte Kamine erfolgen, sofern deren Querschnitte ausreichen. Alternativ kann die Leitungsführung, beispielsweise über das Treppenhaus, auch Aufputz erfolgen. Im Zuge dieser Zentralisierung ist es sinnvoll, die Wohneinheiten mit Wohnungsübergabestationen auszustatten. Diese ermöglichen eine verbrauchsgerechte Abrechnung der Wärmemengen pro Wohneinheit und bieten durch die Integration einer elektrischen Nacherhitzung die Option, auf eine zentrale Trinkwarmwasserspeicherung zu verzichten. Dadurch entfallen Zirkulationsleitungen und Speicherverluste, gleichzeitig sinkt das Risiko einer Legionellenbildung.

Ein weiterer zentraler Unterschied zu bestehenden zentralen Heizsystemen liegt darin, dass im dezentral versorgten Bestand kein vorhandener, zentraler Wärmeerzeuger zur Abdeckung von Spitzenlasten genutzt werden kann. Sollte das Gebäude nach der Sanierung nicht vollständig niedertemperaturfähig sein und keine Fernwärme zur Verfügung stehen, muss daher ein objektspezifisches Versorgungskonzept entwickelt werden, das den technischen Rahmenbedingungen vor Ort gerecht wird.

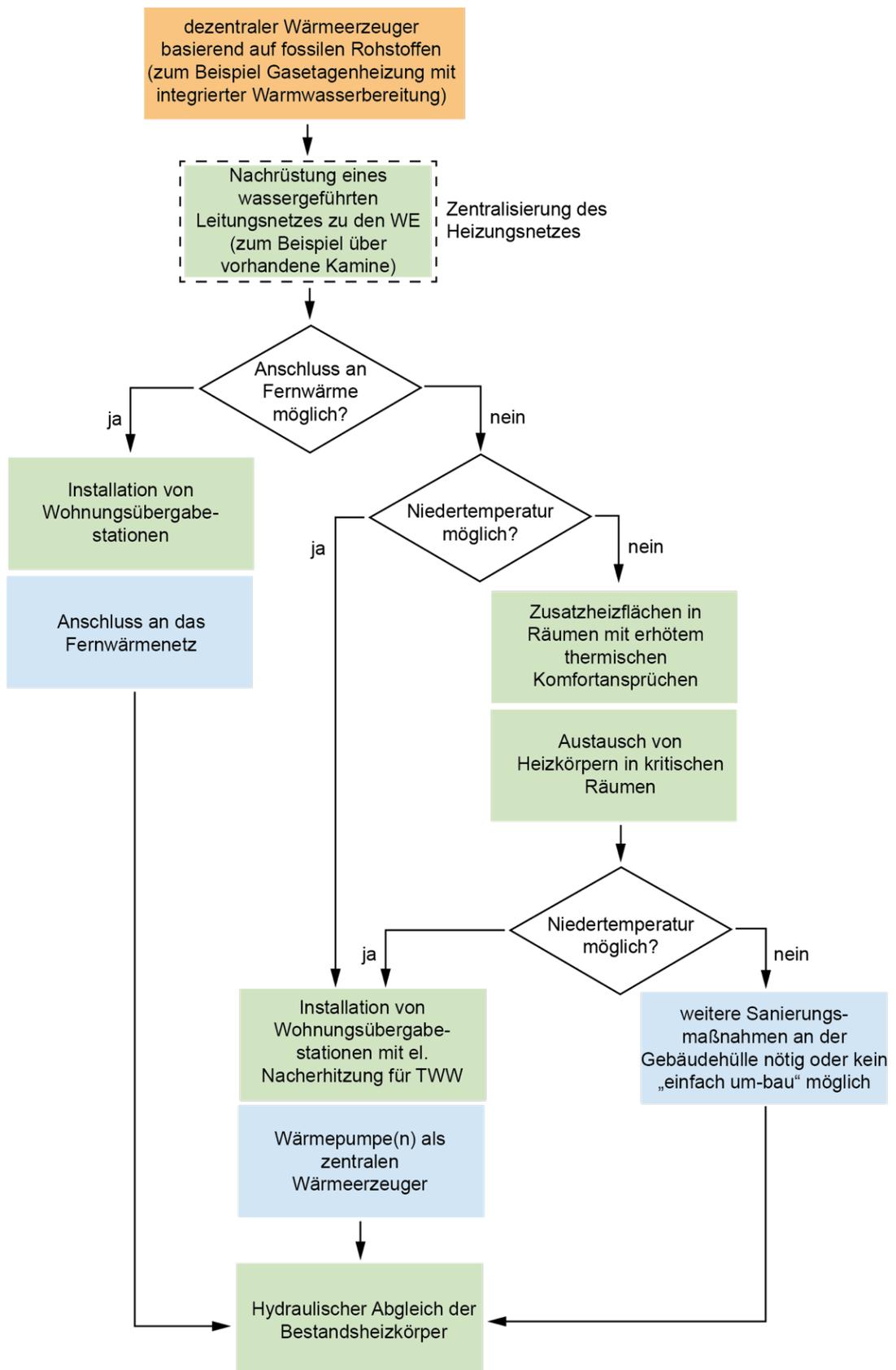


Abbildung 31: Gebäudetechnischer Lösungsansatz für den klimaneutralen Heizbetrieb bei wohnungsweise, dezentrale Heizungssysteme (eigene Darstellung)

Lösungen für raumweise, dezentrale Lösungen

Die für zukunftsfähige Veränderungen ungünstigste Heizungsstruktur stellt eine dezentral organisierte, raumweise Einzelheizung dar. Typische Beispiele hierfür sind Gaseinzelöfen oder elektrische Nachtspeicheröfen. Diese Geräte übernehmen sowohl die Wärmeerzeugung als auch die direkte Wärmeabgabe in den Raum, wodurch keine wassergeführte Infrastruktur vorhanden ist, die bei einer Umrüstung auf ein zentrales Heizsystem genutzt werden kann. Auch die Warmwasserbereitung erfolgt in solchen Systemen separat, meist über elektrische Durchlauferhitzer oder Boiler. Die fehlende zentrale Leitungsstruktur für Heizung und Warmwasser stellt insbesondere bei der energetischen Sanierung eine Herausforderung dar.

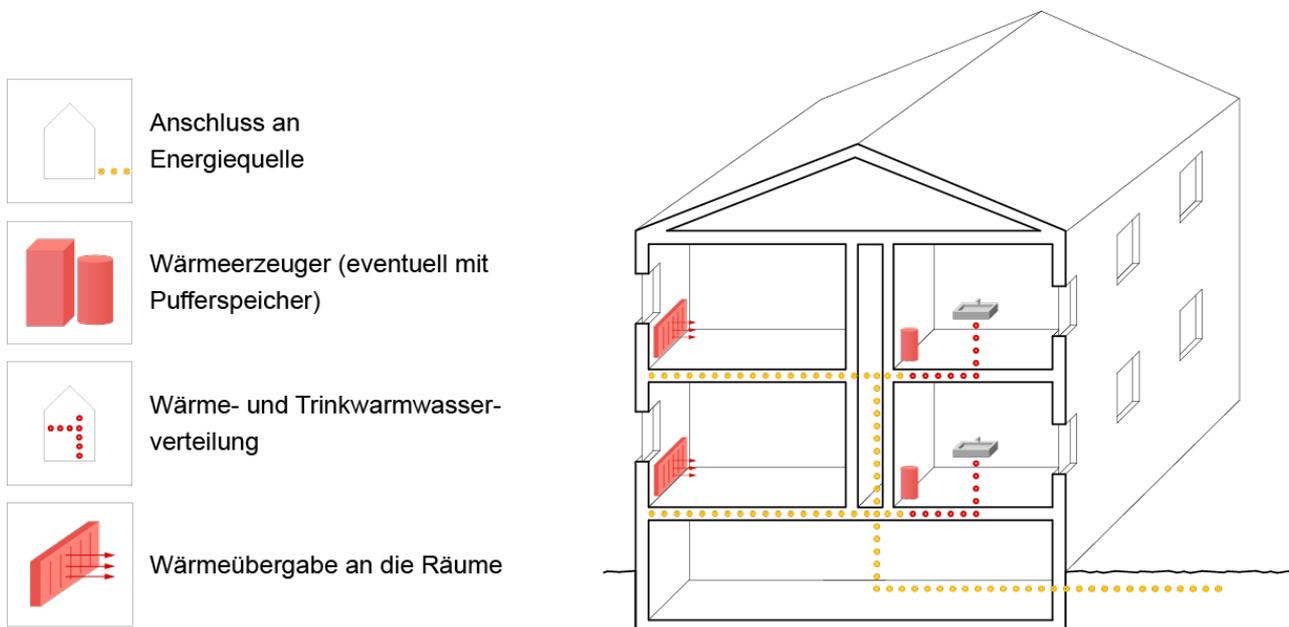


Abbildung 32: Schematische Darstellung eines raumweisen, dezentralen Heizungsnetzes (eigene Darstellung)

Für die Umrüstung ist in einem ersten Schritt die Nachrüstung einer wassergeführten Heizungsinfrastruktur erforderlich. Dabei empfiehlt es sich, Installationsprinzipien des Vorgängerprojekts „einfach Bauen“ zu berücksichtigen, insbesondere die Systemtrennung sowie die Installation von Heizkörpern als einfache und robuste Wärmeübergabesysteme. Sofern ausreichend Platz vorhanden ist, sollten die Heizkörper dimensioniert werden, um den Betrieb des Gebäudes mit einem Niedertemperatursystem zu ermöglichen. Analog zu wohnungsweisen, dezentralen Heizsystemen bietet sich auch hier der Einsatz von Wohnungsübergabestationen an. Wird als Wärmeerzeuger eine Wärmepumpe gewählt, ist es sinnvoll, die

Trinkwarmwasserbereitung elektrisch über die Übergabestation zu realisieren. Auf diese Weise kann die Wärmepumpe im energieeffizienten Niedertemperaturbereich betrieben werden, ohne durch den höheren Temperaturbedarf für die Warmwasserbereitung in ihrer Effizienz beeinträchtigt zu werden. Steht nicht genügend Raum für entsprechend große Heizflächen zur Verfügung, sind ergänzende energetische Maßnahmen erforderlich oder es muss ein individuelles Heizungskonzept entwickelt werden.

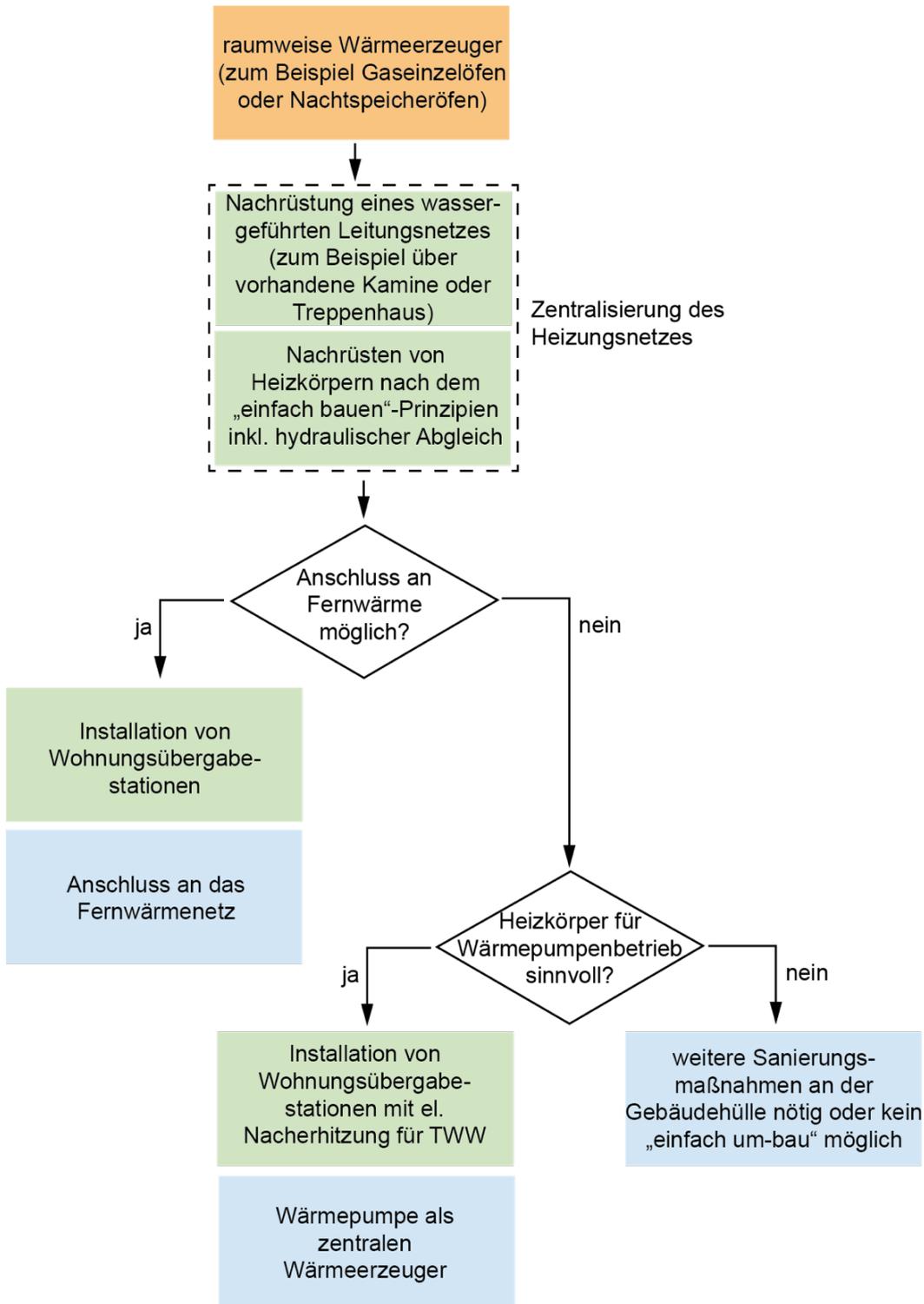


Abbildung 33: Gebäudetechnischer Lösungsansatz für den klimaneutralen Heizbetrieb bei raumweise, dezentrale Heizungssysteme (eigene Darstellung)

Empfehlungen für die Wohnraumlüftung

In allen untersuchten Referenzgebäuden wurden spätestens im Laufe der Nutzungszeit Abluftventilatoren in den innenliegenden Sanitärräumen nachgerüstet. Um Feuchteschäden an der Bausubstanz infolge einer erhöhten Luftdichtheit, etwa durch den Austausch von Fenstern, zu vermeiden, ist es auch im Bestand erforderlich, Maßnahmen zur Sicherstellung eines nutzungsunabhängigen Mindestluftwechsels zu ergreifen. Eine praxiserprobte Lösung stellt dabei der ergänzende Einbau von Fensterfalzlüftern dar, wie sie bereits im Vorgängerprojekt „einfach Bauen“ erfolgreich eingesetzt wurden. In Kombination mit einer bedarfsgeführten Steuerung des Abluftventilators, beispielsweise über einen integrierten Feuchtesensor, kann so auch nach einer Sanierung ein ausreichender Luftwechsel zum Feuchteschutz gewährleistet werden, selbst wenn die natürliche Infiltration durch die erhöhte Dichtheit der Gebäudehülle reduziert ist. Das zugrundeliegende Lüftungskonzept ist schematisch in Abbildung 34 dargestellt.

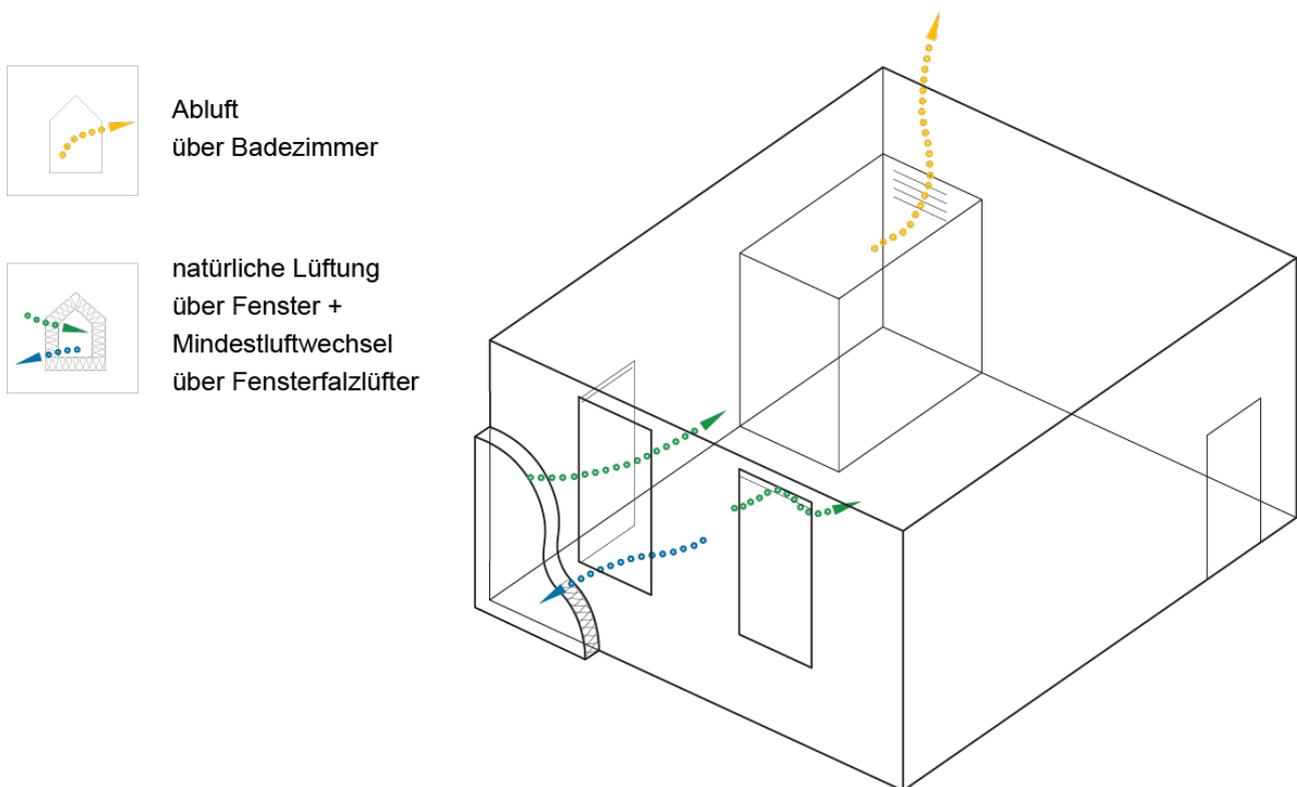


Abbildung 34: Schematische Darstellung des empfohlenen Lüftungskonzepts nach der Sanierung (eigene Darstellung)

2.5.3. Erstellung von Varianten und Berechnungen mittels thermisch dynamischer Gebäudesimulation

In Kapitel 2.4.3. werden Sanierungsvarianten, sowohl als Einzel- oder kombinierte Maßnahmen, vorgestellt. Die Ermittlung der Auswirkungen der Sanierungsmaßnahmen auf den Energiebedarf erfolgt mittels thermisch-dynamischer Simulation. Für die Simulation wird in diesem Fall *TRNSYS* in Kombination mit der Gebäudemodell-Komponente *TRNBuild* eingesetzt. Die Simulation erfolgt als "Ein-Zonen-Modell". Dies impliziert eine Unterteilung des Gebäudes in repräsentative Referenzzonen, deren Energiebedarf auf das gesamte Gebäude hochgerechnet wird. Die Methodik des Simulationsvorgangs wird in folgender Abbildung 35 gezeigt.

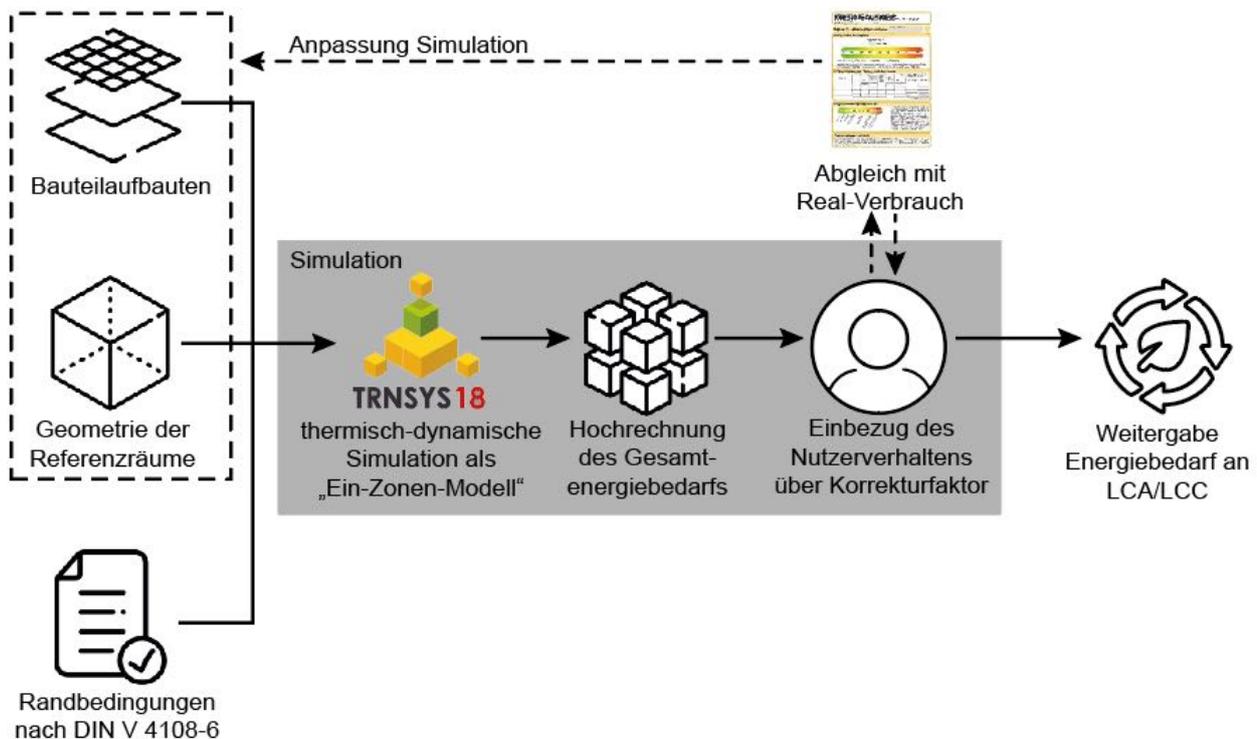


Abbildung 35: Methodik zur Ermittlung einer realistischen Energiebedarfseinsparung durch die Sanierungsvarianten (eigene Darstellung)

Die Bauteilaufbauten, die Wärmeleiteigenschaften dieser sowie die Grundrisspläne wurden den Untersuchungen aus Kapitel 2.4 entsprechend übernommen. Die Randbedingungen der Simulation wurden zum größten Teil der zurückgezogenen DIN 4108-6:2003 entnommen. Dies ist auf die Ermittlung des Korrekturfaktors zur Einbeziehung des Nutzerverhaltens auf der Grundlage dieser Norm zurückzuführen

(siehe Kapitel 2.6.1). Die maßgebenden Randbedingungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Randbedingungen der thermisch-dynamischen Simulation

Parameter	Wert	Quelle
Interne Wärmegewinne	5 W/m ²	DIN V 4108-6:2003; Tabelle D3
Mittlere Norm-Innentemperatur	19 °C	DIN V 4108-6:2003; Tabelle D3
Luftwechselrate	0,7 1/h 0,6 1/h (EH55)	DIN V 4108-6:2003; Tabelle D3 DIN V 4108-6:2003; Tabelle D3
Heizungsunterbrechung (Nachtabstaltung)	7 h	DIN V 4108-6:2003; Tabelle D3
Wärmebrückeneinfluss	0,1 W/m ² K 0,02 W/m ² K (EH55)	DIN V 4108:2003 Beiblatt 2; Nach Berechnung des Ingenieurbüro für Bauphysik <i>vRP</i> <i>von Rekowski und Partner mbB</i>

Für die Simulation werden standortspezifische Wetterdaten des Testreferenzjahres 2015 (*TRY2015*) herangezogen, welche vom *Deutschen Wetterdienst (DWD)* bereitgestellt werden. Dieser Datensatz umfasst stündlich aufgelöste meteorologische Parameter, wie beispielsweise Außentemperatur und solare Einstrahlung, und bildet einen für den jeweiligen Standort und das Bezugsjahr repräsentativen Witterungsverlauf ab.

Im ersten Simulationsschritt wird der ermittelte Heizenergiebedarf unter Anwendung eines Korrekturfaktors zur Berücksichtigung des Nutzerverhaltens (siehe Kapitel 2.6.1) mit den Verbrauchswerten aus den Energieverbrauchsausweisen der Referenzgebäude abgeglichen. Die Bauteilaufbauten werden für die Simulation so realitätsnah wie möglich modelliert. Das bedeutet beispielsweise, dass bauliche Eingriffe wie ausgetauschte (Baualtersklasse 2 und 3) oder teilweise erneuerte Fenster (Baualtersklasse 1) entsprechend berücksichtigt werden. In der Hauptsimulation wird der Heizenergiebedarf auf Basis des ursprünglichen Gebäudezustands ermittelt. Lediglich die gesetzlich vorgeschriebene Dachdeckendämmung (§ 47 GEG) wird berücksichtigt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sowie deren Übertragbarkeit auf weitere Gebäude sicherzustellen. Wichen die simulierten Werte signifikant von den Verbrauchsdaten ab, wurden die Randbedingungen der Simulation angepasst und der Abgleich iterativ wiederholt. Der finale Abgleich ist in Abbildung 36 dargestellt. Der blaue Balken repräsentiert den tatsächlichen Heizenergieverbrauch des jeweiligen Referenzgebäudes, während der orangefarbene Balken den simulierten Heizenergiebedarf abbildet. Die Whisker zeigen die durchschnittliche Spannweite nutzungsbedingter Abweichungen.

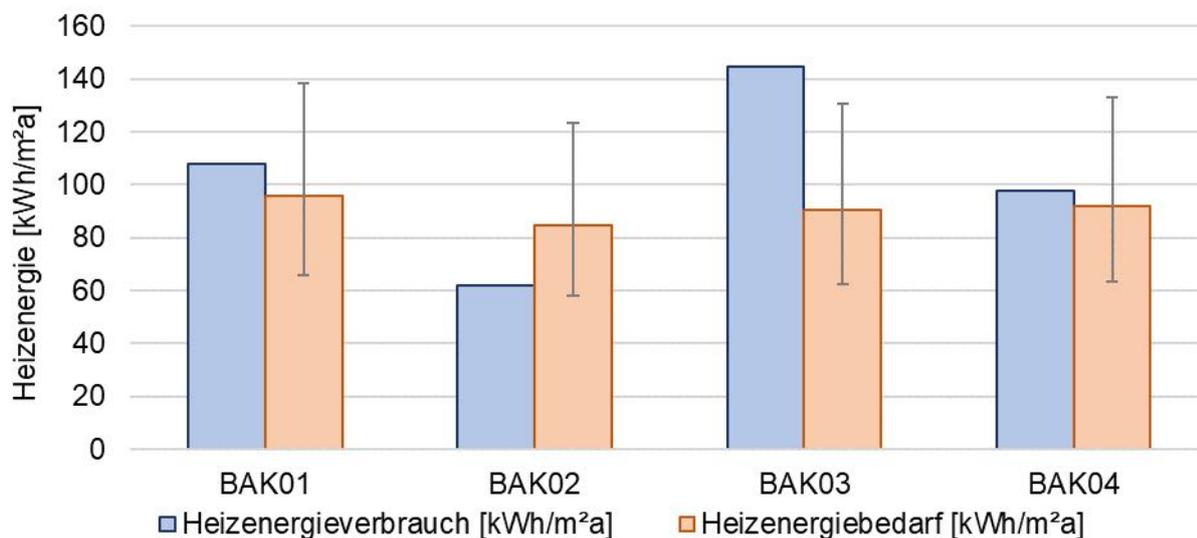


Abbildung 36: Bedarfs-Verbrauchsabgleich der Repräsentanten in kWh/m²a

Mit Ausnahme von Baualtersklasse 3, einem 13-geschossigen Hochhaus, liegen alle betrachteten Referenzgebäude innerhalb der zu erwartenden Bandbreite nutzungsbedingter Einflüsse. Die Abweichung der Baualtersklasse 3 kann durch mehrere gebäudespezifische und nutzungsbezogene Faktoren erklärt werden. So

können beispielsweise erhöhte Windlasten in den oberen Stockwerken zu höheren Infiltrationsraten durch unzureichend abgedichtete Fassaden führen. Zusätzlich kann ein fehlender hydraulischer Abgleich der Heizungsanlage dazu führen, dass die Heizkörper in den oberen Geschossen ineffizient arbeiten. Dies führt wiederum zu einer hohen Laufdauer. Um die Vergleichbarkeit innerhalb der Gebäudekategorie zu wahren, wurde entschieden, die bestehende Abweichung bei Baualtersklasse 3 hinzunehmen und auf weitere Anpassungen des Modells zu verzichten.

Im Anschluss werden die Heizenergieeinsparpotenziale der Sanierungsvarianten im Rahmen einer parametrischen Simulation bestimmt. Dabei werden sämtliche in Kapitel 2.4.3 beschriebenen Einzelmaßnahmen miteinander kombiniert. Die zugrundeliegenden Randbedingungen der Basissimulation bleiben dabei unverändert, mit Ausnahme der EH55-Variante. Für diese wird aufgrund der deutlich verbesserten Gebäudehülle von einer reduzierten Infiltrationsrate sowie einem geringeren Wärmebrückenzuschlag ausgegangen (siehe Tabelle 1). Die in diesem Schritt ermittelten Energieeinsparungen der jeweiligen Sanierungskombinationen dienen als Grundlage für die darauffolgende Lebenszyklusanalyse. In dieser werden die energetischen und ökologischen Auswirkungen der Maßnahmen ganzheitlich bewertet.

„Wärmepumpen-Ready“

Ziel bei der Umstellung der Wärmeversorgung ist es, die vorhandenen Heizkörper weiterhin nutzen zu können. Deren Heizleistung ist unmittelbar von der Systemtemperatur des Heizkreises abhängig. In der Vergangenheit lag diese, bedingt durch die eingesetzte konventionelle Heiztechnik, typischerweise im Bereich von 70 bis 90 °C. Die Effizienz von Wärmepumpensystemen ist von niedrigen Systemtemperaturen abhängig. In der wissenschaftlichen Literatur sowie in den technischen Effizienznachweisen des *BAFA* wird in diesem Zusammenhang eine Vorlauftemperatur von bis zu 55 °C als charakteristisch für den Niedertemperaturbetrieb ausgewiesen [ifeu, 2021; BAFA, 2024]. Um die erforderliche Sanierungstiefe für den effizienten Betrieb einer Wärmepumpe unter Nutzung der Bestandsheizkörper zu bestimmen, ist zu prüfen, ob das Gebäude unter winterlichen Außenbedingungen in der Lage ist, mit einer Vorlauftemperatur von 55 °C ein ausreichendes Raumtemperaturniveau zu gewährleisten. Angestrebt wird hierbei eine Raumtemperatur von 20 °C mit zeitweise maximal 1 K Untertemperatur in der

Nutzungszeit. Das methodische Vorgehen zur Untersuchung dieser Fragestellung ist in Abbildung 37 dargestellt.

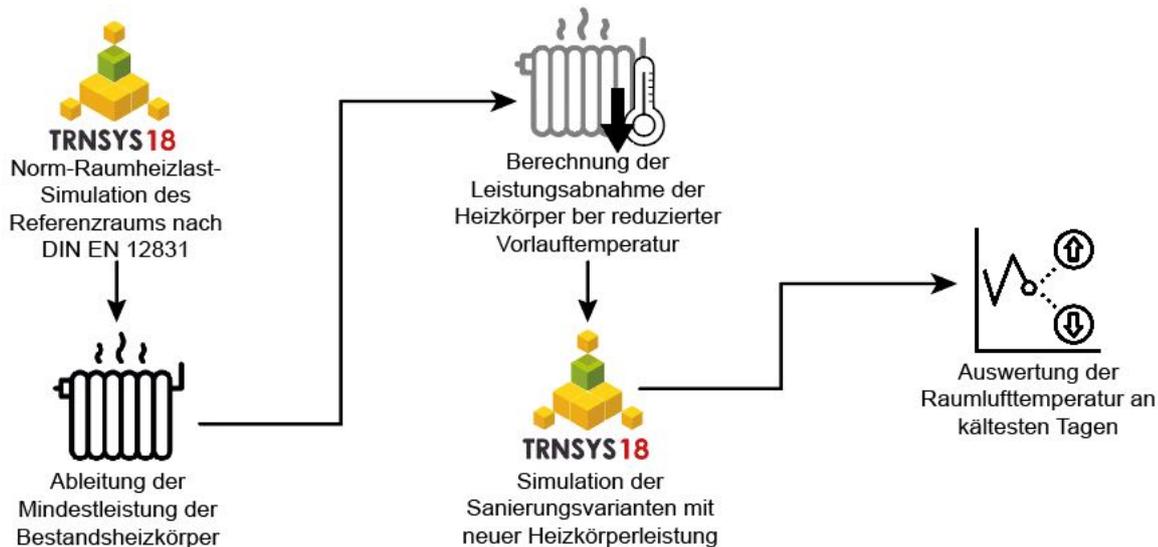


Abbildung 37: Methodik zur Ermittlung der Niedertemperaturfähigkeit (NT-Ready) für den Wärmepumpenbetrieb (eigene Darstellung)

Zur Ableitung möglichst allgemeingültiger Aussagen wird die Simulation exemplarisch an einem standardisierten Referenzraum (Wohnzimmer, Nordausrichtung) mit den Abmessungen 5,9×4,5×2,3 m und einem Fensterflächenanteil von 20 % durchgeführt. Um die vier Baualtersklassen repräsentativ abbilden zu können, sind die Aufbauten von Fassade, oberster Geschosdecke sowie des Fußbodens zum unbeheizten Keller variabel. Die verbaute Mindestleistung der Bestandsheizkörper wird auf Grundlage einer Norm-Raumheizlastberechnung gemäß DIN EN 12831-1:2020 ermittelt. Die zugrunde liegenden Randbedingungen sind Tabelle 2 zu entnehmen. Als klimatischer Referenzstandort wird München gewählt, dessen Witterungsbedingungen in hoher Übereinstimmung mit dem offiziellen deutschen Referenzklima Potsdam stehen und somit eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleisten.

Tabelle 2: Randbedingungen zur Berechnung der Heizlast nach DIN EN 12831

Parameter	Wert	Quelle
Norm-Auslegungstemperatur	-12,5 °C	Klimakarte des [Bundesverband Wärmepumpe e.V., 2025], Standort München
Solare Wärmegewinne	-	DIN EN 12831
Norm-Innentemperatur	20 °C	DIN EN 12831
Mindest-Luftwechselrate	0,5 1/h	DIN EN 12831
Aufheizzuschlag	-	DIN EN 12831
Wärmebrückenzuschlag	0,1 W/m ² K	DIN EN 12831
Angrenzende Wohneinheiten	20 °C	DIN EN 12831

Es wird angenommen, dass der Massenstrom durch die Heizkörper konstant bleibt. Auf dieser Grundlage kann die durch die Absenkung der Vorlauftemperatur bedingte Reduktion der Heizkörperleistung unter Anwendung der zweiten Heizkörpergleichung nach *Der Recknagel* [Schramek, 2013, S. 890] berechnet werden. Dabei wird ein Heizkörperexponent von 1,29 angesetzt. Für die ursprüngliche Auslegung des Heizungsnetzes wird bei den Gebäuden Baualtersklasse 1 und 2 von einer Vor- und Rücklauftemperatur von 80/60 °C ausgegangen, bei Baualtersklasse 3 und 4 hingegen von 70/50 °C. Im Rahmen der Untersuchung wurden für die sanierten Zustände Netztemperaturen von 55/40 °C bzw. 55/45 °C betrachtet, wobei die größere Spreizung aufgrund der höheren Effizienz von Wärmepumpensystemen als bevorzugt gilt. Um

auch minimalinvasiven Sanierungsstrategien Rechnung zu tragen, wurde zusätzlich der Einsatz eines elektrischen „Booster“-Heizstabs untersucht, der in besonders kalten Stunden eine temporäre Anhebung der Vorlauftemperatur auf bis zu 60 °C ermöglicht.

Das thermische Verhalten des Referenzraums wird unter Verwendung der neu berechneten Heizkörperleistung simuliert. Dabei wird eine nächtliche Absenkung der Raumtemperatur um 4 K sowie ein winterfokussierter extremer Wetterdatensatz (*TRY2015x*) für den Standort München zugrunde gelegt. Gelingt es unter diesen Bedingungen, die Raumtemperatur nach der Nachtabsenkung zuverlässig auf das angestrebte Temperaturniveau von 19 °C anzuheben und zu halten, wird die jeweilige Sanierungsvariante als „Wärmepumpen-Ready“ eingestuft.

2.5.4. Ergebnisse der thermisch dynamischen Simulationen

In diesem Kapitel werden die energetischen Auswirkungen exemplarisch ausgewählter Sanierungsvarianten dargestellt. Eine vollständige Übersicht sämtlicher Simulationsergebnisse ist dem Anhang zu entnehmen. Die Ergebnisse sind inklusive Prebound- und Rebound-Effekten angegeben und beziehen sich auf den eingesparten Heizenergiebedarf in kWh/m²a. Aufgrund des dominierenden Einflusses des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der Gebäudehülle wurde bei der Auswertung der Simulationen eine differenzierte Betrachtung ausschließlich auf die grundlegenden Maßnahmenpakete „Fassadendämmung“, „Fenstertausch“, „Dach- und Kellerdeckendämmung“ beschränkt.

Abbildung 38 veranschaulicht die Entwicklung des spezifischen Heizenergiebedarfs (in kWh/m²a) in Abhängigkeit verschiedener Sanierungsmaßnahmen für die vier Repräsentanten der Baualtersklassen (BAK01 - BAK04). Deutlich erkennbar ist, wie sich sowohl Einzelmaßnahmen als auch kombinierte Maßnahmenpakete auf den Energiebedarf auswirken. Die betrachteten Gebäudetypen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Bauform, Geschossanzahl sowie konstruktiver Merkmale (z. B.

Vorhandensein von Balkonen oder Loggien) und dem Nutzerverhalten, was sich entsprechend in der energetischen Wirksamkeit der Maßnahmen niederschlägt.

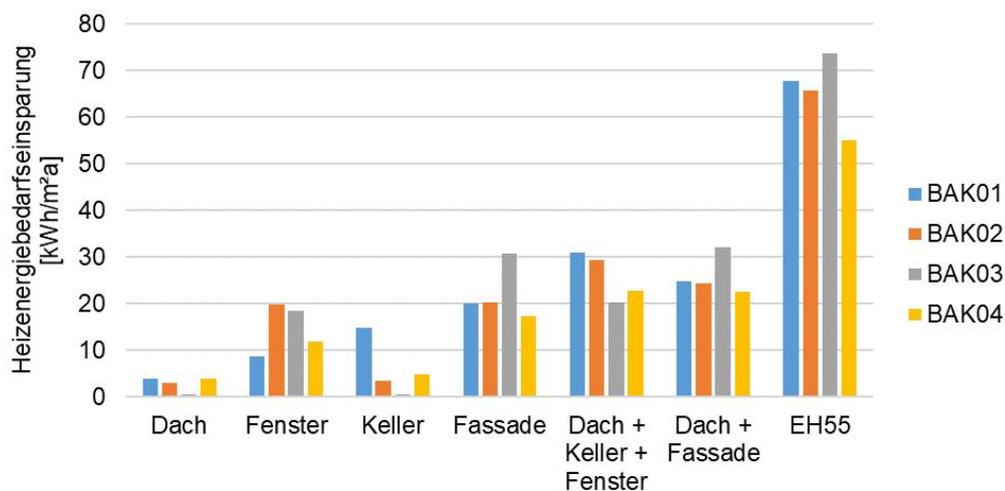


Abbildung 38: Energetische Einsparung ausgewählter Einzelmaßnahmen und Sanierungsvarianten in kWh/m²a der Baualtersklassen-Repräsentanten

Die Auswertung der Heizenergiebedarfseinsparung zeigt, dass unter den Einzelmaßnahmen die Dämmung der Fassade den größten Effekt erzielt. Ihre Wirksamkeit steigt mit dem Anteil der Fassade an der gesamten Gebäudehüllfläche, was sich insbesondere in der Baualtersklasse 3 mit einer höheren Anzahl an Geschossen widerspiegelt. Im Gegensatz dazu zeigt sich bei der Keller- und Dachdämmung ein umgekehrter Zusammenhang: Hier sind die Einsparpotenziale in Gebäuden mit geringer Geschossanzahl (Baualtersklasse 1, 2 und 4) am höchsten.

Im Rahmen des Projekts wurde angenommen, dass in allen Gebäuden bereits eine Nachbesserung der obersten Geschossdecke zum unbeheizten Dachraum erfolgt ist, da dies durch gesetzliche Vorgaben (§ 47 GEG) verpflichtend ist. Sollte stattdessen noch die ursprüngliche ungedämmte Konstruktion vorhanden sein, würde das Einsparpotenzial dieser Maßnahme deutlich höher ausfallen.

Mit zunehmender Kombination von Maßnahmen (z. B. Dach + Keller + Fenster oder Dach + Fassade) bis hin zu einer Sanierung nach Effizienzhaus 55 Standard (EH55) steigt die Einsparung des Heizenergiebedarfs zunächst deutlich an. Allerdings zeigt sich, dass bei den jüngeren Baualtersklassen (z. B. BAK02 und BAK04) die Einsparung im Vergleich zu älteren Klassen geringer ausfällt. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass diese Gebäude bereits einen besseren Ausgangszustand hinsichtlich der U-Werte der Hüllfläche aufweisen, wodurch der relative Nutzen zusätzlicher Maßnahmen abnimmt.

2.5.5. Ergebnisse der „Wärmepumpen-Ready“ Untersuchung

Abbildung 39 zeigt eine Übersicht, wie sich verschiedene Einzelmaßnahmen und Sanierungskombinationen auf die Sicherstellung des thermischen Komforts eines Referenzraums bei Reduzierung der Vorlauftemperatur der Bestandsheizkörper auswirkt. Die Sanierungskomplexität und damit der mittlere U-Wert nehmen nach unten hin zu. Die Auswertung differenziert nach Geschossen (Dach-, Erd- und Mittelgeschoss), da die Lage des Raumes im Gebäude einen großen Einfluss auf dessen Heizlast hat, und somit auf die Größe der verbauten Heizkörper.

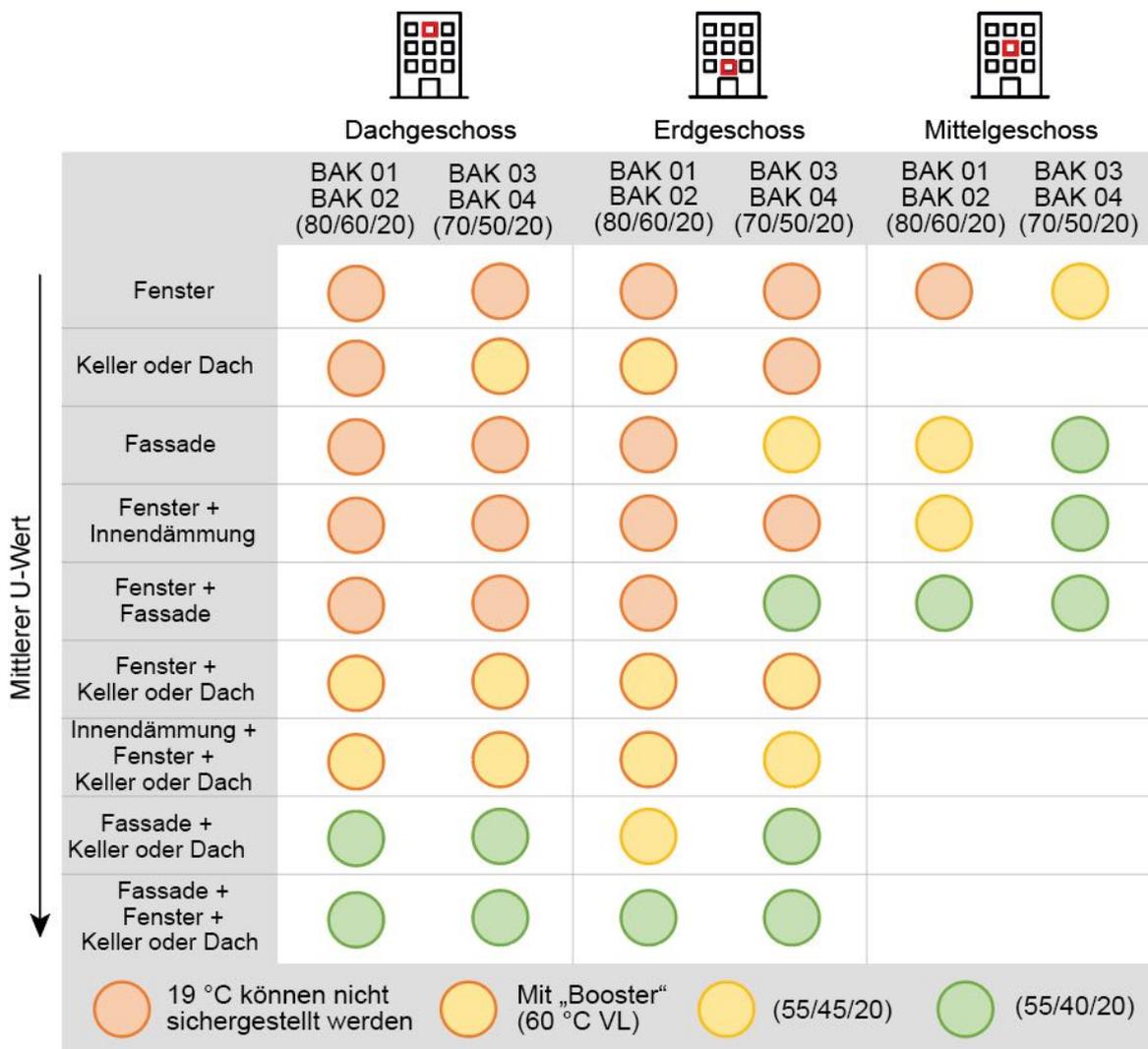


Abbildung 39: Ergebnisse der "Wärmepumpen Ready" Untersuchung nach Heizkörperauslegungstemperaturen (Vorlauf/Rücklauf/Raumtemperatur)

Einfluss des Geschosses auf die Heizkörperauslegung und Sanierungswirkung:

Je größer die Transmissionswärmeverluste eines Raums, desto höher ist die erforderliche Heizleistung und damit tendenziell auch die Dimensionierung der Heizkörper. Dies betrifft vor allem Räume unterhalb unbeheizter Dachräume, in geringerem Maße Kellerräume und am wenigsten die Mittelgeschosse, die von beheizten Räumen umgeben sind. Wird nun das am stärksten wärmeverlustbehaftete Bauteil energetisch ertüchtigt, besteht eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass die vorhandenen Heizkörper im sanierten Zustand überdimensioniert sind. Dies ermöglicht es, die notwendige Heizleistung für die gewünschte Raumtemperatur künftig mit einer geringeren Vorlauftemperatur bereitzustellen.

Einfluss der Baualtersklassen auf die Systemtemperaturen und

Wärmepumpeneignung: Durch die unterschiedlichen Auslegungstemperaturen lassen sich signifikante Unterschiede in den Baualtersklassen feststellen. In späteren Baualtersklassen 3 und 4 wurden Heizsysteme durch besseren Wärmeschutz häufiger bereits mit reduzierten Vorlauftemperaturen ausgelegt, was zur Folge hat, dass diese Gebäude eine Wärmepumpeneignung bereits mit einem geringeren Sanierungsaufwand erreichen. Ein Grund hierfür liegt im reduzierten Leistungsabfall der Heizkörper bei geringerer Differenz von alter zu neuer Vorlauftemperatur. Zudem weisen diese jüngeren Gebäude geringere Transmissionswärmeverluste infolge besserer U-Werte in der Gebäudehülle auf, wodurch der Heizwärmebedarf insgesamt reduziert ist.

Anforderungen an eine wärmepumpenkompatible Sanierung: Für Gebäude älterer Baualtersklassen, in denen die ursprünglichen Heizkörper für hohe Vorlauftemperaturen ausgelegt wurden, sind Einzelmaßnahmen in der Regel nicht ausreichend, um eine zuverlässige Versorgung über Wärmepumpen sicherzustellen. Insbesondere die Mittelgeschosse stellen hierbei eine Herausforderung dar, da in diesen Bereichen die Heizkörper im Bestand meist kleiner sind. Als ausreichend effektiv hat sich unter den minimalinvasiven Maßnahmen dabei das Paket „Fenstertausch + Innendämmung“ erwiesen. Dieses erlaubt es, mit „Booster“ auch in den älteren Baualtersklassen die notwendige Heizleistung bei reduzierter Vorlauftemperatur zu gewährleisten und somit die Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen und funktionalen Wärmepumpenbetrieb zu schaffen.

Einordnung der Ergebnisse und Hinweise zur Übertragbarkeit: Die in Abbildung 33 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass unter den im Projekt angenommenen Randbedingungen (Tabelle 2) in einem standardisierten Referenzraum während der kältesten Woche des Jahres eine Raumtemperatur von 19 °C mit Bestandsheizkörpern, die auf die ursprüngliche Mindestheizlast ausgelegt wurden, nicht zuverlässig erreicht werden kann. Daraus lässt sich jedoch keinesfalls pauschal schließen, dass der Betrieb eines teilmodernisierten Bestandsgebäudes mit einer Wärmepumpe grundsätzlich nicht möglich ist. Wärmepumpen sind durchaus in der Lage, auch höhere Vorlauftemperaturen zu liefern – allerdings geht dies in der Regel mit einem Effizienzverlust einher. Es ist zudem zu berücksichtigen, dass aufgrund des Klimawandels künftig mit insgesamt milderem Wintern zu rechnen ist und sich gleichzeitig die Effizienz moderner Wärmepumpensysteme stetig verbessert.

Ob ein konkretes Bestandsgebäude mit einer Wärmepumpe wirtschaftlich und technisch sinnvoll beheizt werden kann, hängt von einer Vielzahl gebäudespezifischer Faktoren ab. Die in dieser Untersuchung präsentierten Ergebnisse bieten daher lediglich eine grobe Orientierung und können eine detaillierte wärmetechnische Bewertung durch Fachplanende oder die Haustechnik Betreibende nicht ersetzen.

Empfehlungen für bauliche und technische Einzelmaßnahmen im Bestand

Abgesehen von energetischen Maßnahmen der Gebäudehülle gibt es technische Maßnahmen, die die Eignung von Bestandsgebäuden für den Wärmepumpenbetrieb verbessern.

1. **Heizkörpertausch in kritischen Räumen:** In Räumen, in denen die vorhandenen Heizkörper in Bezug auf Größe oder Leistung nicht ausreichen, kann ein teilweiser Austausch sinnvoll sein [Lämmle et. al. 2019]. Moderne Niedertemperaturheizkörper (eventuell mit Gebläseunterstützung) ermöglichen trotz niedriger Vorlauftemperaturen eine ausreichende Wärmebereitstellung.
2. **Hydraulischer Abgleich:** Die Durchführung eines hydraulischen Abgleichs ist essenziell, um sicherzustellen, dass alle Heizkörper mit der jeweils erforderlichen Wassermenge versorgt werden. Nur so kann die maximale Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems gewährleistet werden.

3. **Zusatzheizflächen:** Räume mit erhöhtem thermischem Komfortanspruch, wie Badezimmer, können bei Bedarf gezielt beispielsweise mit elektrischen Wand- oder Deckenpaneelen ergänzt werden. Diese Maßnahmen erfordern keinen Eingriff in das zentrale Heizsystem und sind deshalb einfach nachzurüsten.
4. **Hybridlösungen als Übergangsstrategie:** Bis das Gebäude vollständig auf ein Wärmepumpensystem umgestellt werden kann oder die Wärmepumpentechnologie weiter optimiert ist, können temporäre Hybridlösungen eingesetzt werden. Dazu zählen beispielsweise elektrische „Booster“-Heizelemente im Pufferspeicher oder eine partielle Beibehaltung der Gasversorgung für Spitzenlasten. Diese Lösungen ermöglichen einen flexiblen und sicheren Betrieb während der Sanierungsphase und leisten zugleich einen Beitrag zur Emissionsminderung.

2.5.6. Fazit Raumklima und Energie

Die Analyse des *Münchner Wohnen*-Bestands belegt ein heterogenes, aber prinzipiell sanierungsfähiges technisches Ausgangsniveau. Rund die Hälfte der Gebäude ist bereits an ein Fernwärmenetz angeschlossen, während Erdgas, überwiegend in zentralen Kesselanlagen, die wichtigste fossile Energiequelle bleibt. Dezentrale Gas- oder Elektroeinzelheizungen sind auf wenige Altbauten begrenzt. Sämtliche zentralen Wärmeerzeuger wurden im Lebenszyklus mindestens einmal erneuert, sodass die verbleibende Lebensdauer überwiegend von der künftigen Strategie der Dekarbonisierung abhängt.

Aus raumklimatischer Sicht bleibt ein einfaches Lüftungskonzept auf Basis manueller Fensterlüftung, Fensterfalzlüftern in Kombination mit Abluftventilatoren in den Nasszellen die robusteste Lösung. Maschinelle Wohnraumlüftungen würden angesichts des nachgewiesenen Rebound-Risikos den Leitprinzipien von *einfach um-bauen* widersprechen.

Für die Transformation der Wärmeversorgung lassen sich drei robuste Pfade ableiten:

- Zentralisierung dezentraler Wärmeversorgungsstrukturen (Gasetagen- oder Einzelöfen) durch Wohnungsübergabestationen und nachgerüsteten Heizkörpern

- Fernwärmeanschluss als einfache Primärstrategie für städtische Mehrfamilienhäuser, da Bestandsheizkörper weiter genutzt werden können und die Fernwärme bis 2040 netzseitig dekarbonisiert werden soll
- Gebäudezentrale Wärmepumpe(n) bei Niedertemperaturfähigkeit; ggf. zunächst als Hybridlösung mit Bestandskessel zur Spitzenlastdeckung

Die thermisch-dynamischen Simulationen zeigt, dass Fassadendämmung bei allen Baualtersklassen den größten Einzelhebel zur Reduktion des Heizenergiebedarfs darstellt. Kombinationspakete, insbesondere die Sanierung auf EH55-Niveau, ermöglichen je nach Typ, Einsparungen von 40 - 70 kWh /m²a, ihr relativer Mehrwert sinkt jedoch bei jüngeren Baualtersklassen mit bereits geringeren Ausgangs-U-Werten. Für den Wärmepumpenbetrieb zeigt sich: Gebäude Baualtersklassen 3 und 4 erreichen garantierte Niedertemperaturfähigkeit vielfach schon nach moderaten Maßnahmen (Fenster + Keller), während die Baualtersklassen 1 und 2 ein Mindestpaket aus Fenster- oder Glasaustausch, Innen- bzw. Fassadendämmung und Dach/Keller benötigen.

2.6. AP 6 Ökologische und ökonomische Bewertung

2.6.1. Nutzerprofil

Die Grundlage des vorliegenden Arbeitspakets bildet die Studie „Energiebedarf und tatsächlicher Energieverbrauch bei Wohngebäuden“ von [Walberg & Gniechwitz, 2021]. In dieser Untersuchung wurde für 927 Mehrfamilienhäuser die Abweichung zwischen dem gemessenen Energieverbrauch und dem berechneten normativen Energiebedarf gemäß DIN V 4108-6 analysiert. Auf Basis dieser Auswertung wurden Verbrauchsbenchmarks für die mittlere Abweichung, im Folgenden als Korrekturfaktor bezeichnet, sowie für die typische Streuung ermittelt, um das zu erwartende „Performance Gap“ nach einer Sanierung realistisch abbilden zu können. Die Abhängigkeit der Abweichung vom berechneten Energiebedarf ist in Abbildung 40 grafisch dargestellt.

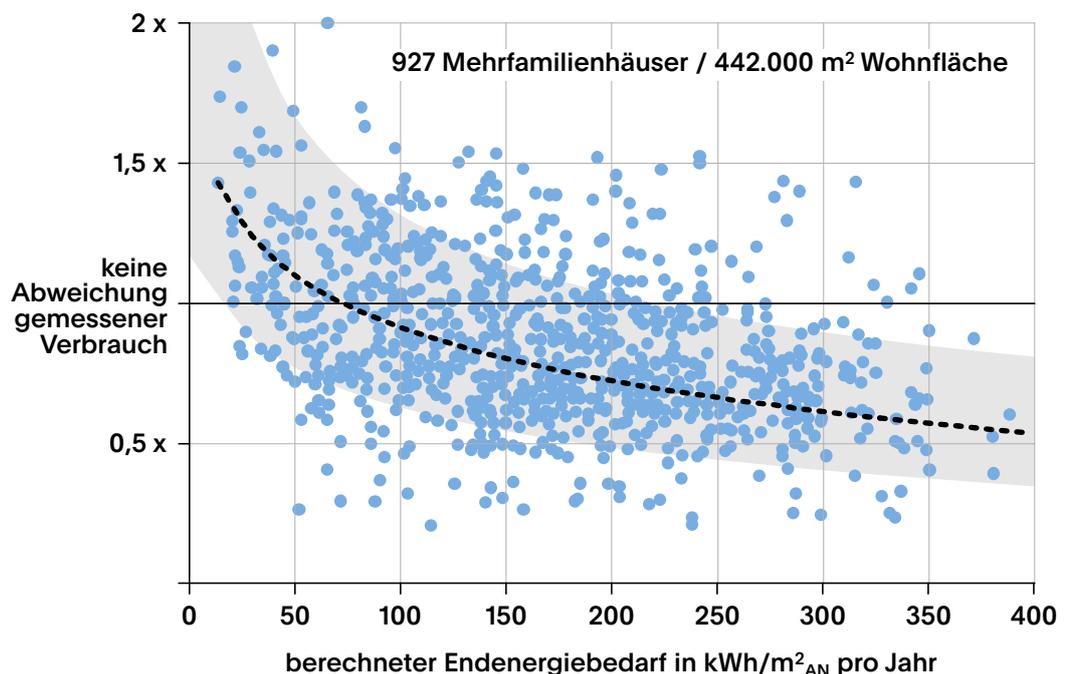


Abbildung 40: Mittlere Abweichung des gemessenen Energieverbrauchs vom berechneten Endenergiebedarf nach Norm DIN V 4108-6

Die Auswertung zeigt einen sogenannten Prebound-Effekt, also einen geringeren tatsächlichen Verbrauch im Vergleich zum berechneten Bedarf, bei Gebäuden mit einem Energiebedarf von über 75 kWh/m²a. Umgekehrt lässt sich ein Rebound-Effekt, ein höherer Verbrauch als rechnerisch erwartet, bei Gebäuden mit einem Bedarf unterhalb dieses Schwellenwerts feststellen. Die resultierende Abweichungskurve zwischen berechnetem Bedarf und gemessenem Verbrauch folgt dabei einem logarithmischen Verlauf. Diese Effekte lassen sich im Wesentlichen auf nutzungsbedingte Unterschiede in Abhängigkeit vom energetischen Standard des Gebäudes sowie auf eine potenzielle Minderleistung technischer Systeme zurückführen. Zu den nutzungsbezogenen Parametern mit dem größten Einfluss auf den Heizenergieverbrauch zählen insbesondere die eingestellte Raumtemperatur, das Lüftungsverhalten der Bewohnerinnen und Bewohner, sowie der Anteil der tatsächlich beheizten Wohnfläche.

Die Ergebnisse der thermisch-dynamischen Simulation der Sanierungsvarianten wurden unter Berücksichtigung der Abweichungskurve nach [Walberg & Gniechwitz, 2021] angepasst, um das erwartbare Performance Gap realitätsnah zu berücksichtigen. So wird beispielsweise ein berechneter Bedarf von 30 kWh/m²a auf einen tatsächlichen Verbrauch von 36 kWh/m²a „nach oben“ korrigiert, während ein rechnerischer Bedarf von 100 kWh/m²a auf 91 kWh/m²a „nach unten“ angepasst wird. Um die Gebäudesimulation an die spezifischen Gegebenheiten der betrachteten Repräsentanten, einschließlich des nutzungsbedingten Einflusses, anzunähern, wurde in mehreren Simulationsdurchläufen ein Abgleich zwischen den korrigierten Bedarfswerten und den realen Verbrauchsdaten aus den Energieverbrauchsdiagrammen vorgenommen. Um jedoch die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebäude sicherzustellen und gebäude- oder nutzerspezifische Sondereffekte nicht zu stark zu gewichten, wurden verbleibende Abweichungen in Teilen bewusst in Kauf genommen.

2.6.2. Lebenszyklusbetrachtung

Die Lebenszyklusbetrachtung ermöglicht es, auf Projektebene eine ganzheitliche Bilanzierung von Ökologie und Ökonomie durchzuführen. In der gewählten Methodik wird von einem Umbau im Jahr 2025 ausgegangen. Als Nutzungsphase werden die folgenden 25 Jahre, von 2026 bis 2050, betrachtet.

2.6.3. Investitionskosten

Für die Baumaßnahme werden die jeweiligen Baukosten der energetischen Sanierung für Gebäude und Technik mit MwSt. und ohne Lokalfaktor angesetzt. Dabei wurden auch Nebenmaßnahmen wie Gerüste oder notwendige zusätzliche Arbeiten, an angrenzenden Bauteilen wie zum Beispiel das Umbauen der Dachentwässerung beim Dämmen der Außenwand berücksichtigt.

Die Baunebenkosten sowie staatliche und kommunale Förderungen wurden aus der Betrachtung herausgenommen. Baunebenkosten und Förderungen können von Projekt zu Projekt stark variieren. Wenn sie in den Vergleich einbezogen werden, könnte dies zu einer Verzerrung der tatsächlichen Wirtschaftlichkeit der einzelnen Varianten führen. Ziel eines Variantenvergleichs ist es, die grundsätzlichen wirtschaftlichen und technischen Unterschiede der Bauvarianten objektiv zu bewerten. Daraus werden Empfehlung zu Förderrichtlinien abgeleitet (Kapitel 4).

2.6.4. Graue Emissionen

Wenn Gebäude energetisch saniert werden, entstehen Treibhausgase, auch als ‚Graue Emissionen‘ bezeichnet. Die Emissionen für die Herstellung der zur energetischen Ertüchtigung eingebauten Bauteile und Baustoffe werden erfasst. Der Ermittlung erfolgte in Anlehnung an die Bilanzregeln nach QNG [BBSR 2024-1] [BBSR 2024-2].

Bei Bauteilen, die über einen Zeitraum von 25 Jahren einmal oder mehrmals ausgetauscht werden müssen – wie beispielsweise ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) –, werden auch der Austausch und die Entsorgung berücksichtigt [BBSR 2017].

2.6.5. Energieeffizienz

Die jährliche Einsparung wird aus den simulierten Verbrauchswerten hergeleitet. Der ökonomische und ökologische Effekt, der dadurch entsteht, ist abhängig von der Art der Wärmeerzeugung. Dabei wird auch die Entwicklung des Arbeitspreises inklusive Mehrwertsteuer (MwSt.) berücksichtigt. Ausgehend von den aktuellen Preisen am

Standort München wird für Fernwärme, Erdgas und Strom eine Steigerung von jährlich 3 % angesetzt.

Zudem wird die Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen einbezogen. Als Grundlage für die Betrachtung werden die Werte der Norm DIN V 18599-1:2018-09, Tabelle A.1 verwendet. Den Empfehlungen der Norm folgend, wurde für die Fernwärme die von den Stadtwerken München publizierten Werte als unverändert angenommen [SWM 2025].

Bei Strom wird in Anlehnung an [Fritsche & Greß, 2020] eine Reduktion von jährlich 4 % angenommen. Die Treibhausgasemissionen von Erdgas als Energiequelle werden als unverändert angesetzt [Fritsche & Greß, 2021] (Siehe Abbildung 41).

Entwicklung Energieträger 2026–2050

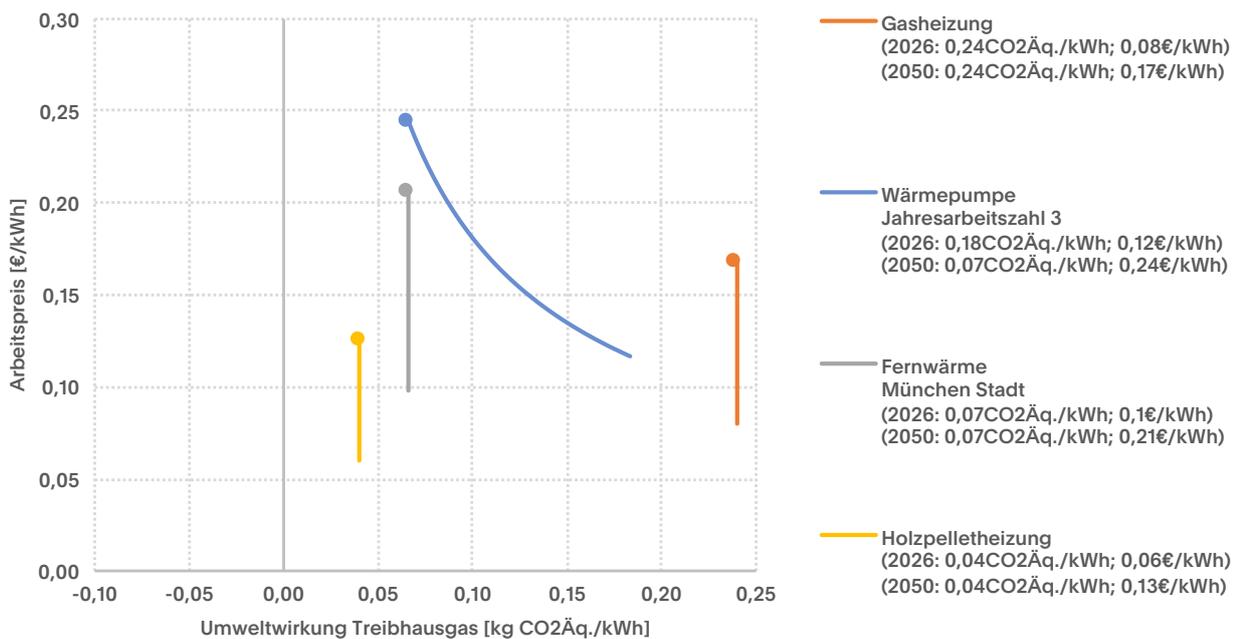


Abbildung 41: Für die Untersuchung angenommene Entwicklung der Energieträger für Gasheizung, Wärmepumpe und Fernwärme von 2026 – 2050.

3. Ergebnisse

Anhand der vier repräsentativen Gebäude des Bestandes der Münchner Wohnen (ehemals GEWOFAG) wurden Kombinationen typischer Dämmmaßnahmen systematisch untersucht. Die durch die Dämmmaßnahmen entstehenden Treibhausgasemissionen und Kosten wurden für jede Kombination ermittelt. Die durch die Dämmmaßnahmen erreichte Reduktion des Raumwärmeverbrauchs wurde durch thermisch dynamische Simulationen hergeleitet.

Um das Performance Gap abzubilden, wurden die Simulationsergebnisse mit der Abweichungskurve nach [Walberg & Gniechwitz, 2021] umgerechnet. Dadurch soll eine realistischere Abschätzung der tatsächlichen Effekte der Dämmmaßnahmen ermöglicht werden. Als Wärmeerzeuger wurden Gasheizung sowie die Umstellung von Gasheizung auf Pelletheizung, Wärmepumpe oder Fernwärme untersucht.

3.1. Baualterklasse 1 (BAK 01), 1950 – 1956

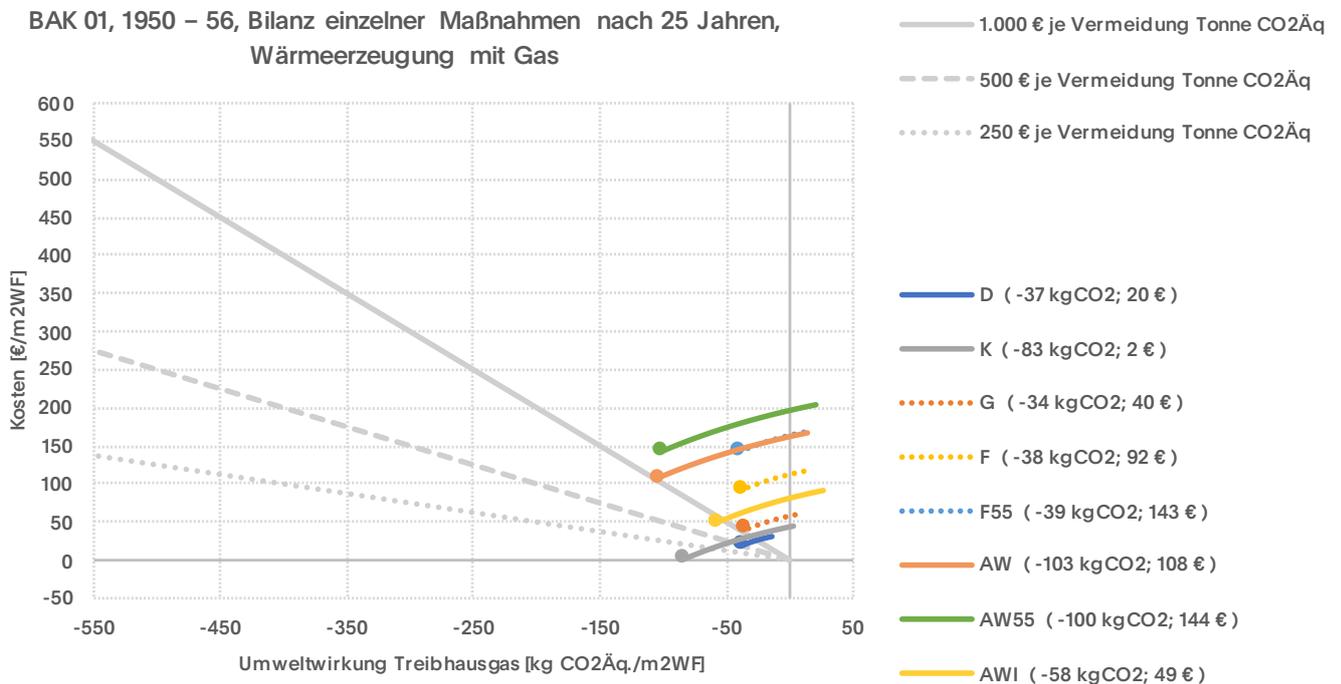


Abbildung 42: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualterklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz einzelner Maßnahmen nach 25 Jahren, Wärmeerzeugung mit Gas.

Abbildung 42 zeigt die Bilanz der Lebenszyklusbetrachtung für den Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1856). In der Abbildung sind die Ergebnisse der einzelnen Maßnahmen dargestellt.

- **D** steht für die Dämmung der Decke zum Dachraum,
- **K** für die Dämmung der Decke zum Keller,
- **F** für den Fenstertausch.
- **G** bedeutet, dass nur das Glas in den bestehenden Fenstern getauscht wurde.
- **AW** steht für eine Dämmung der Außenwand von außen,
- **AWI** für eine Dämmung der Außenwand mit Innendämmung.
- **F55** bezeichnet Fenster mit erhöhtem Dämmwert,
- **AW55** eine Außenwanddämmung mit erhöhtem Dämmwert. F55 und AW55 sind notwendig, um den geförderten Dämmstandard EH55 zu erreichen.

Die Maßnahmen sind detailliert in Kapitel 2.4 beschrieben.

Bei den Maßnahmen G, F und F55 – also der Verbesserung der Fenster – wird der „Schweif“ der Sternschnuppen im Diagramm durch eine gepunktete Linie dargestellt. Dies soll verdeutlichen, dass diese Maßnahmen für sich allein genommen kritisch zu bewerten sind.

In Altbauten beschlagen die Innenseiten der Fensterscheiben häufig. Dieser Effekt entzieht der Raumluft Feuchtigkeit, bevor sie an anderen kalten Bauteiloberflächen – etwa an Fensterlaibungen oder Außenecken von Wänden – kondensiert und dort potenziell zu Feuchteschäden führt. Wird dieser Puffer durch den Austausch der Fenster entfernt, erhöht sich das Risiko, dass sich Kondensat an anderen, ungünstigeren Stellen bildet.

Zudem steigert die in der Regel höhere Luftdichtheit neuer Fenster die Luftfeuchtigkeit im Innenraum zusätzlich, sofern keine begleitenden Lüftungskonzepte umgesetzt werden. Ein reiner Fenstertausch ohne begleitende Maßnahmen ist daher aus bauphysikalischer Sicht nicht zu empfehlen.

Dennoch wird der isolierte Effekt der Fenstermaßnahmen in der Darstellung gezeigt, um die Wirkung von Maßnahmenkombinationen im weiteren Verlauf besser einordnen zu können.

Die Punkte in Abbildung 42 – gewissermaßen der „Kopf“ der Sternschnuppen – stellen die Bilanz der Lebenszyklusbetrachtung nach 25 Jahren dar, also im Jahr 2050. Der „Schweif“ der Sternschnuppen zeigt die Entwicklung der Bilanz über die Jahre hinweg, ausgehend vom angenommenen Umbauzeitpunkt im Jahr 2025.

Die X-Achse bildet die Treibhausgasbilanz in kg CO₂-Äquivalent pro m² NRF ab. Das CO₂-Äquivalent fasst sämtliche emittierten Treibhausgase in einer gemeinsamen Maßeinheit zusammen: So wird beispielsweise emittiertes Methan innerhalb des Bilanzrahmens in das, bezogen auf den Beitrag zur Klimaerwärmung, äquivalente Gewicht an Kohlendioxid umgerechnet – um alle Treibhausgase in einer einzigen Zahl darstellen zu können.

Die Y-Achse zeigt die Kostenbilanz in €/m² NRF einschließlich Mehrwertsteuer.

Die grauen Punktlinien im Diagramm zeigen an, wie viel Geld investiert werden muss, um eine Tonne CO₂-Äquivalent einzusparen. Sie helfen dabei, die Maßnahmen hinsichtlich ihrer Kosteneffizienz bei der Treibhausgasvermeidung einzuordnen.

Das Diagramm ist in drei Zonen unterteilt: Eine untere Zone mit niedrigen Vermeidungskosten von unter 250 €/Tonne CO₂-Äquivalent, zwei mittlere Zonen mit Kosten zwischen 250 € und 1.000 € sowie eine Zone mit hohen Vermeidungskosten von über 1.000 €/Tonne CO₂-Äquivalent.

Je weiter links und weiter unten sich eine Maßnahme im Diagramm befindet, desto günstiger ist sie – sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht.

Von allen dargestellten Maßnahmen erzielt die Dämmung der Kellerdecke das beste ökonomische Ergebnis. Bis zum Jahr 2050 würde sich diese Maßnahme sogar fast vollständig amortisieren. Die damit erreichte Treibhausgasreduktion wird lediglich von den Außenwanddämmungen AW und AW55 übertroffen. Diese beiden Maßnahmen sind jedoch mit deutlich höheren Kosten verbunden.

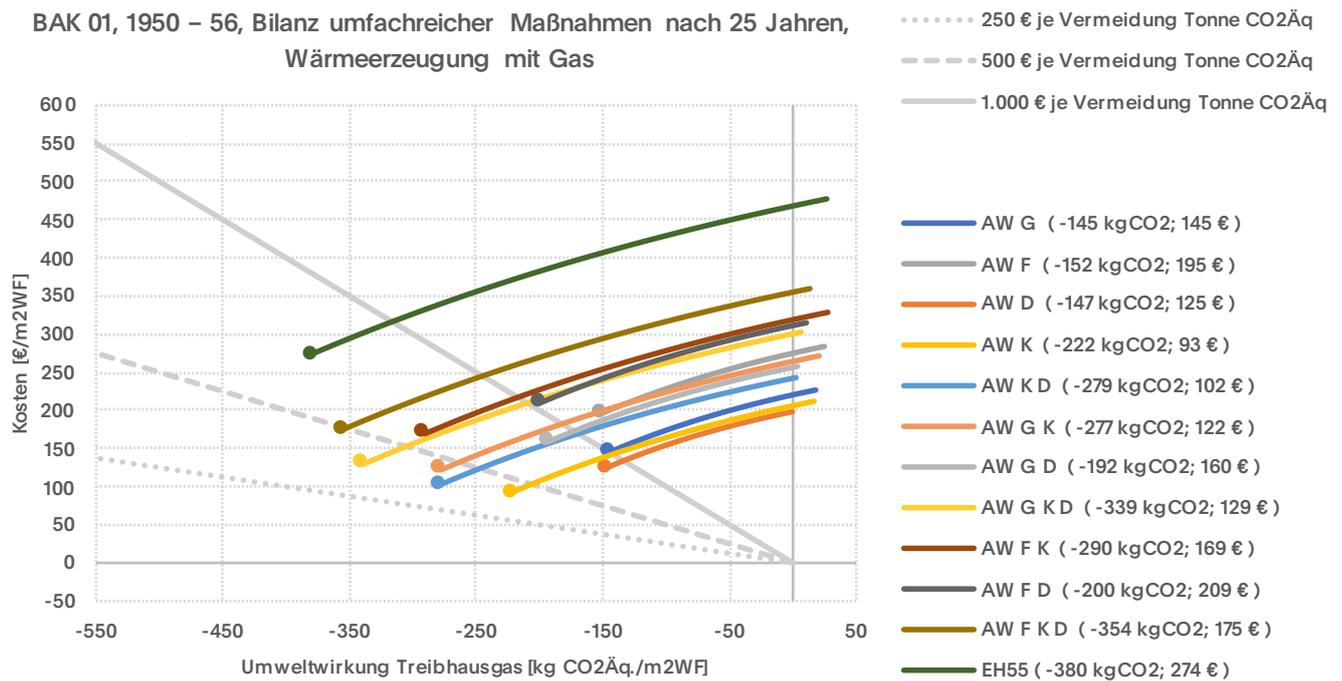


Abbildung 43: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualterklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz umfangreicher Maßnahmen nach 25 Jahren, Wärmeezeugung mit Gas.

Bei der Kombination mehrerer Maßnahmen, die in jedem Fall auch eine Außenwanddämmung einschließen, schneiden insbesondere die Varianten „AW K“, „AW K D“ und „AW G K D“ vergleichsweise gut ab. Die Vermeidungskosten liegen hier im Bereich von 250 bis 500 €/Tonne CO₂-Äquivalent.

Die größte Reduktion der Treibhausgasemissionen wird durch das EH55-Referenzgebäude erreicht. Allerdings liegen die Vermeidungskosten hier bereits im Bereich von 500 bis 1.000 €/Tonne CO₂-Äquivalent.

Die höchsten Vermeidungskosten weisen die Kombinationen „AW F“, „AW F D“, und „AW G“ auf – mit über 1.000 €/Tonne CO₂-Äquivalent. (Abbildung 43)

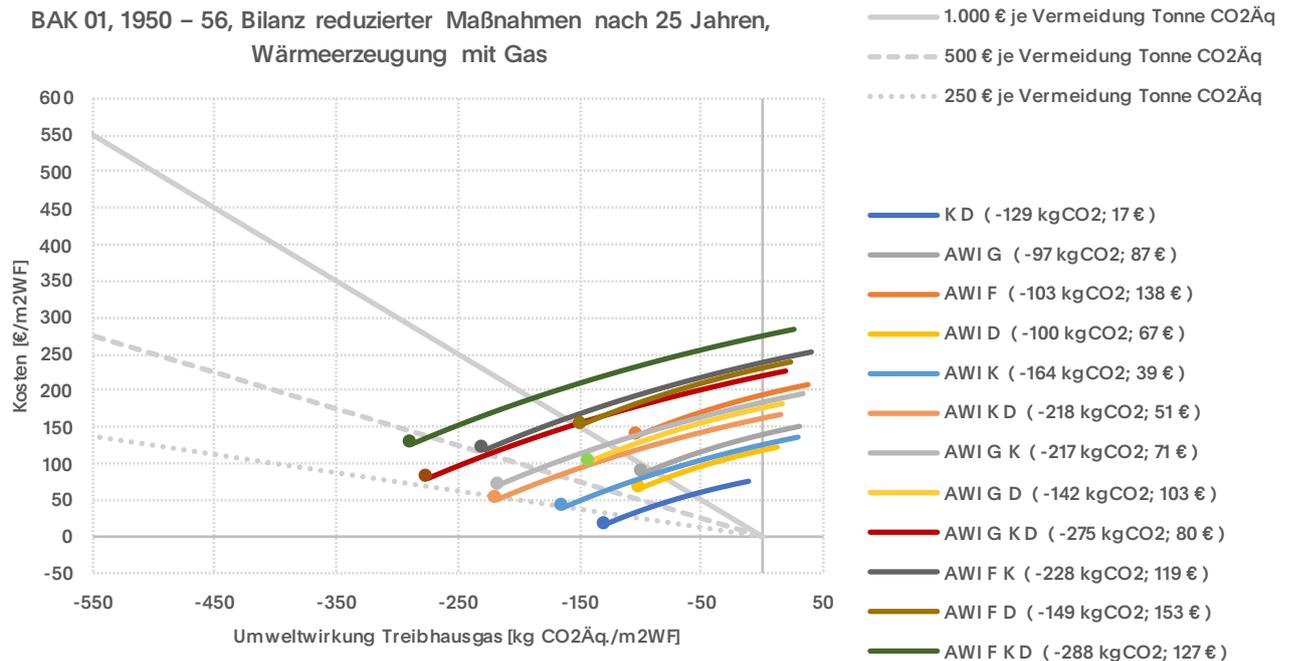


Abbildung 44: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz reduzierter Maßnahmen nach 25 Jahren, Wärmeezeugung mit Gas.

Bei reduzierteren Eingriffen, bei denen die Außenwand höchstens mit Innendämmung (AWI) verbessert wird, schneiden die Kombinationen „K D“, „AWI G K“, „AWI K D“ und „AWI K“ besonders gut ab. Ihre Vermeidungskosten liegen um 250 €/Tonne CO₂-Äquivalent.

Die höchsten Vermeidungskosten innerhalb dieser Gruppe weist die Kombination „AWI F“ auf. (Abbildung 44)

Insgesamt zeigt sich an den Ergebnissen des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (1950 – 1956), dass einzelne, gezielt gewählte Maßnahmen oder moderate Kombinationen mit Innendämmung ein hohes Einsparpotenzial bei vertretbaren Kosten bieten, während ambitionierte Standards wie EH55 ökologisch am effektivsten, aber ökonomisch anspruchsvoller sind.

Im weiteren Verlauf wurde analysiert, in welchem Maß sich der energetische Betrieb des betrachteten Repräsentanten durch den Austausch des gasbasierten Wärmeezeugungssystems gegen Fernwärme im Gebiet München Stadt verbessern lässt und wie sich Dämmmaßnahmen im Kontext dieser Systemumstellung auf die ökologische und ökonomische Bilanz auswirken.

BAK 01, 1950 – 56, Bilanz einzelner Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Fernwärme

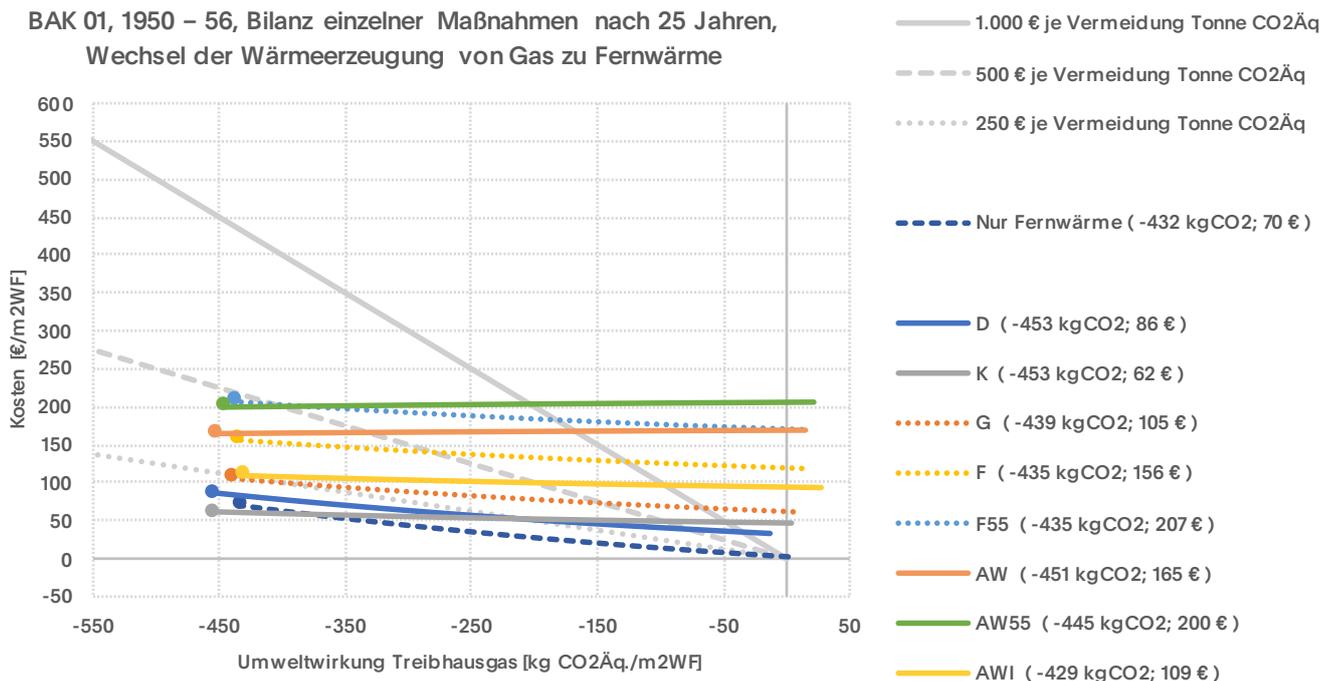


Abbildung 45: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz einzelner Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Fernwärme.

Abbildung 45 zeigt den Wechsel von Gas auf Fernwärme. Diese reduziert die Treibhausgasemissionen pro bezogener Energieeinheit im Vergleich zur Gasheizung, führt jedoch gleichzeitig zu höheren Betriebskosten (vgl. Abbildung 9 in Kapitel 2.6). Zwar bewirkt diese Maßnahme eine klimarelevante Emissionsreduktion, doch ist sie mit jährlichen Mehrkosten verbunden.

Durch die Kombination mit einer Kellerdeckendämmung („K“) lassen sich diese Mehrkosten zumindest teilweise kompensieren.

Aufwändigere Einzelmaßnahmen wie die Fassadendämmung nach erhöhtem Standard („AW55“) senken die Treibhausgasemissionen zwar weiter, verursachen jedoch Vermeidungskosten von ca. 500 € pro Tonne CO₂-Äquivalent – aus ökonomischer Sicht sind sie damit weniger effizient.

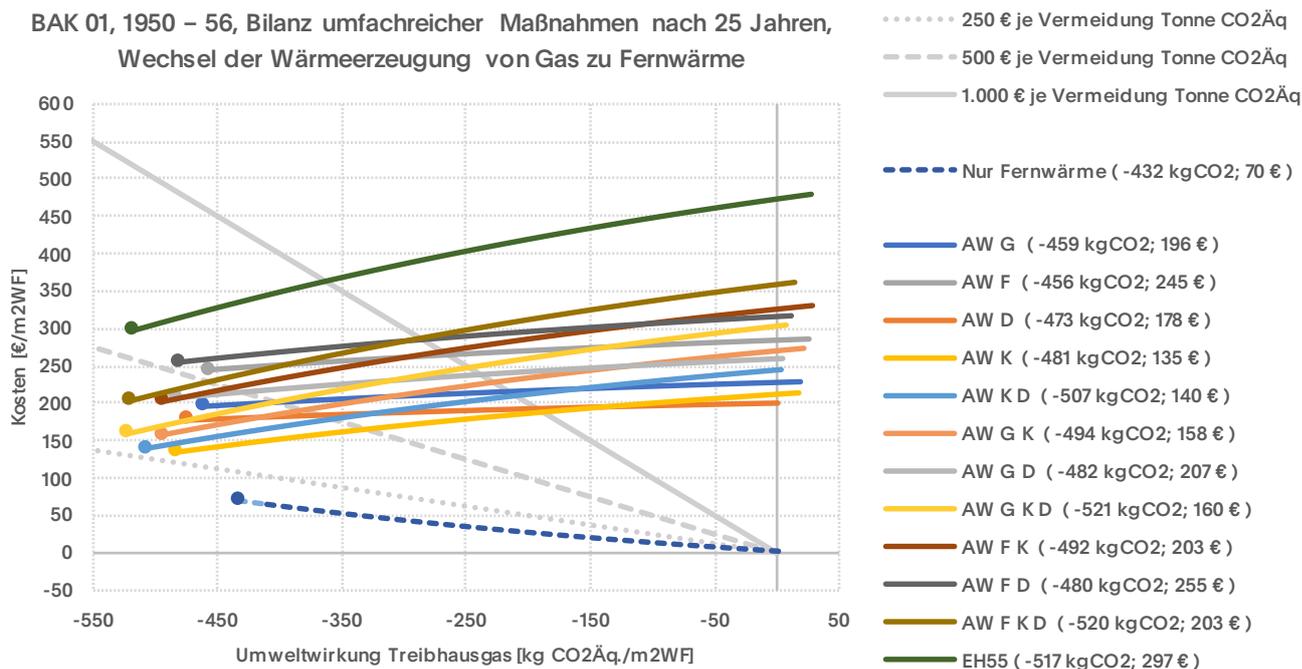


Abbildung 46: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz umfangreicher Maßnahmen 2050, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Fernwärme.

Bei der Kombination mehrerer Maßnahmen – die in jedem Fall eine Außenwanddämmung einschließen – schneiden insbesondere die Varianten „AW K“ und „AW K D“ vergleichsweise gut ab. Ihre Vermeidungskosten liegen im Bereich von knapp über 250 € pro Tonne CO₂-Äquivalent.

Eine ähnliche Reduktion der Treibhausgasemissionen erreicht das EH55-Referenzgebäude. Allerdings verursacht diese Maßnahme die höchsten Vermeidungskosten (500 bis 1.000 € pro Tonne CO₂-Äquivalent) und ist damit aus ökonomischer Sicht weniger effizient. (Abbildung 46)

Im Vergleich zur Wärmeerzeugung mit Gas (siehe Abbildung 11) zeigt sich, dass die Umstellung auf Fernwärme als Einzelmaßnahme die größte Treibhausgasreduktion bei gleichzeitig geringstem Aufwand bewirkt. Der zusätzliche Effekt weiterer Dämmmaßnahmen fällt vergleichsweise gering aus, da durch die Umstellung auf Fernwärme die Umweltwirkung des Energieverbrauchs bereits stark reduziert wird. Dadurch verringert sich der ökologische Hebel von Dämmmaßnahmen.

BAK 01, 1950 – 56, Bilanz reduzierter Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Fernwärme

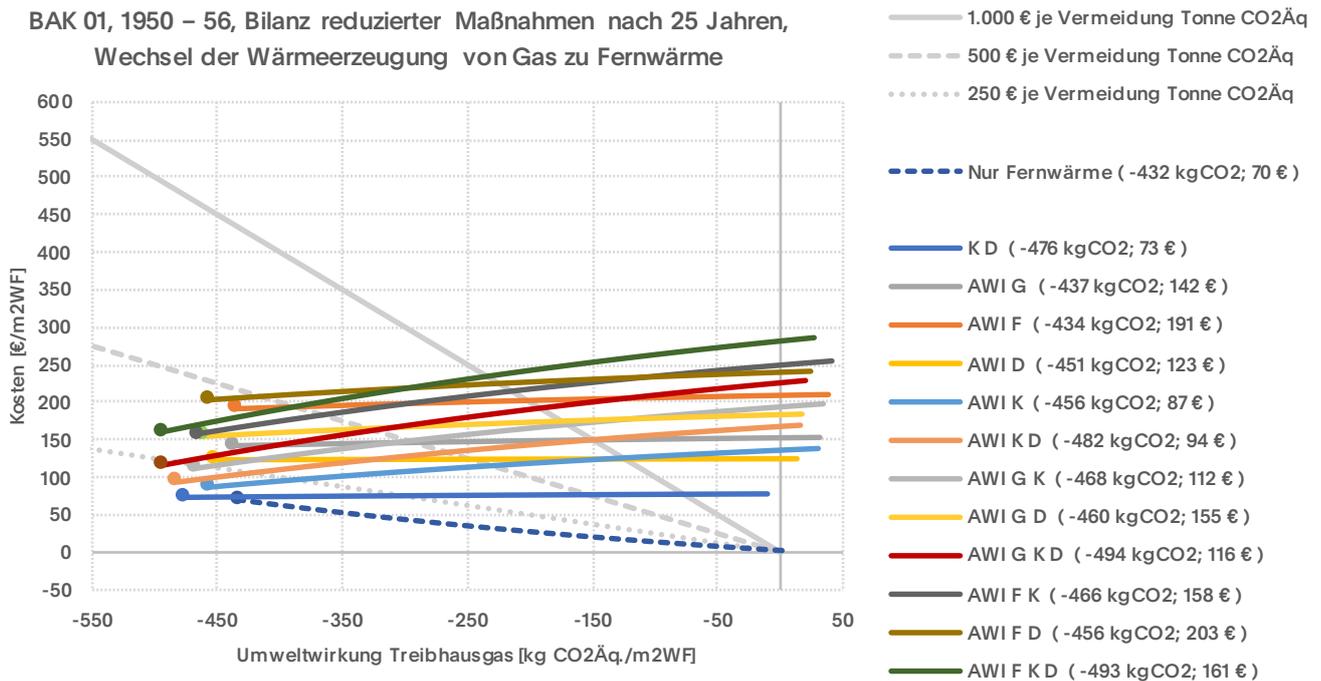


Abbildung 47: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz einzelner Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Fernwärme.

Bei reduzierteren Eingriffen, bei denen die Außenwand höchstens mit Innendämmung (AWI) verbessert wird, schneiden die Kombinationen „AWI G K D“, „K D“, „AWI D“ und „AWI K“ besonders gut ab. Ihre Vermeidungskosten liegen unter 250 €/Tonne CO₂-Äquivalent.

Die höchsten Vermeidungskosten innerhalb dieser Gruppe weist die Kombination „AWI F D“ auf. (Abbildung 47)

Auch bei diesen Szenarien, die eine Umstellung der Wärmeerzeugung von Gas auf Fernwärme betrachtet, zeigt sich, dass einzelne, gezielt gewählte Maßnahmen oder moderate Kombinationen mit Innendämmung ein hohes Einsparpotenzial bei vertretbaren Kosten bieten, während ambitionierte Standards wie EH55 ökologisch ähnlich performen, aber ökonomisch anspruchsvoller sind.

Ein Anschluss an eine Fernwärme ist nur für Gebäude möglich, die sich im Versorgungsgebiet einer entsprechenden Infrastruktur befinden. An Standorten mit ausreichend dimensionierter Stromversorgung stellt der Wechsel zu einer Wärmepumpe eine alternative Lösung dar, die im Folgenden ebenfalls untersucht wird.

Für die Umstellung der Wärmeerzeugung wurde die Strategie verfolgt, ausschließlich Maßnahmenkombinationen zu untersuchen, die Eingriffe auf den Wärmeerzeuger beschränken. Dabei sollten die vorhandenen Heizkörper und das Rohrnetz weiterhin genutzt werden können.

Da Wärmepumpen nur im Niedertemperaturbetrieb effizient arbeiten, wurden ausschließlich Kombinationen betrachtet, bei denen durch verbesserte Gebäudedämmung die Wärmeverluste im Winter so weit reduziert werden, dass die bestehenden Heizkörper auch mit niedrigeren Vorlauftemperaturen ausreichend Wärme in die Räume abgeben können.

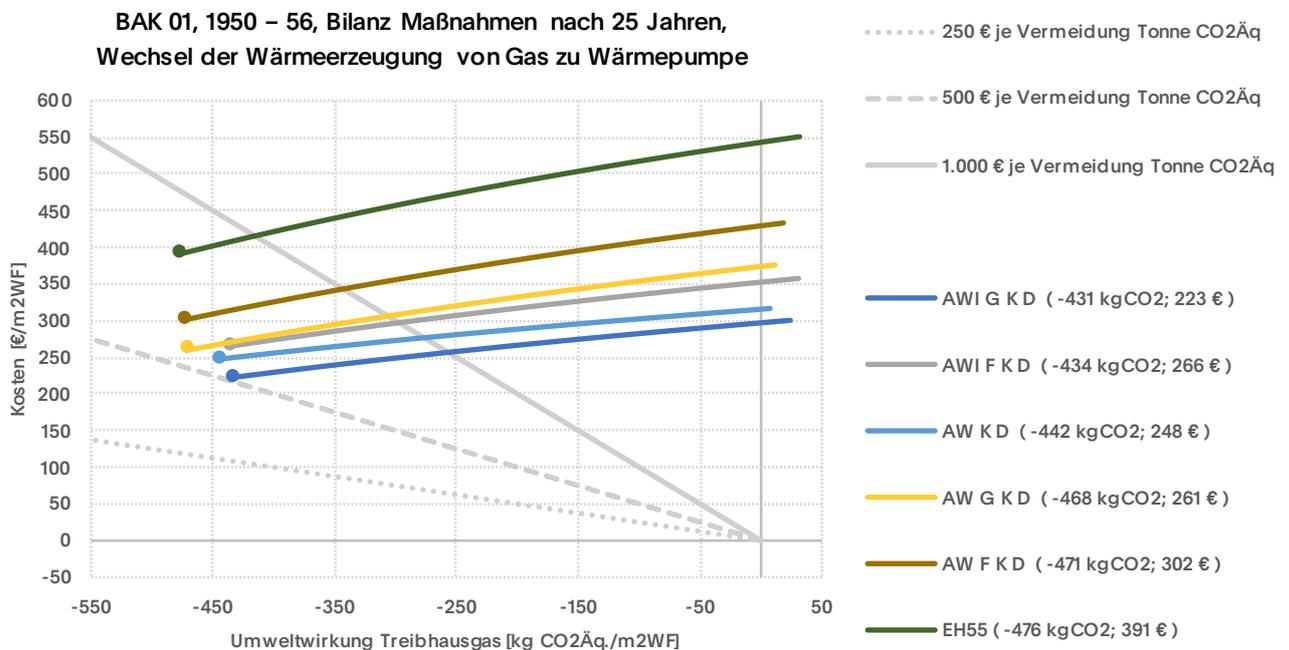


Abbildung 48: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualterklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Wärmepumpe.

Abbildung 48 zeigt die untersuchten Maßnahmenkombinationen. Um den Wärmebedarf aller Räume ausreichend zu reduzieren, müssen - mit Ausnahme der Fenster - sämtliche Gebäudehüllenbauteile zusätzlich gedämmt werden. Die detaillierte Herleitung dieser Maßnahmenauswahl findet sich in Kapitel 2.5.5.

Die ökonomisch effizienteste Lösung stellt die Variante "AWI G K D" dar: Zwar erreicht die Referenzvariante EH55 eine etwas stärkere Reduktion der Treibhausgasemissionen, verursacht jedoch etwa doppelt so hohe Kosten und ist damit wirtschaftlich deutlich weniger attraktiv.

Die Eignung eines Gebäudes für den Betrieb mit Wärmepumpe hängt von der lokalen Infrastruktur ab. Die Umstellung auf eine Wärmepumpe erhöht den elektrischen Anschlusswert des Gebäudes. Je nach Standort kann diese Leistungserhöhung im bestehenden Stromnetz nicht ohne Weiteres realisiert werden.

Als Alternative - insbesondere im suburbanen und ländlichen Raum - bietet sich eine Holzpellettheizung an. Der Umstieg von einer Gasbrennwerttherme auf eine Pellettheizung ist technisch anspruchsvoll, da hierfür zusätzlich ein geeigneter Lagerraum für die Pellets geschaffen werden muss und ggf. bauliche Anpassungen erforderlich sind

Die Umstellungskosten liegen dabei in einer ähnlichen Größenordnung wie bei der Installation einer Wärmepumpe.

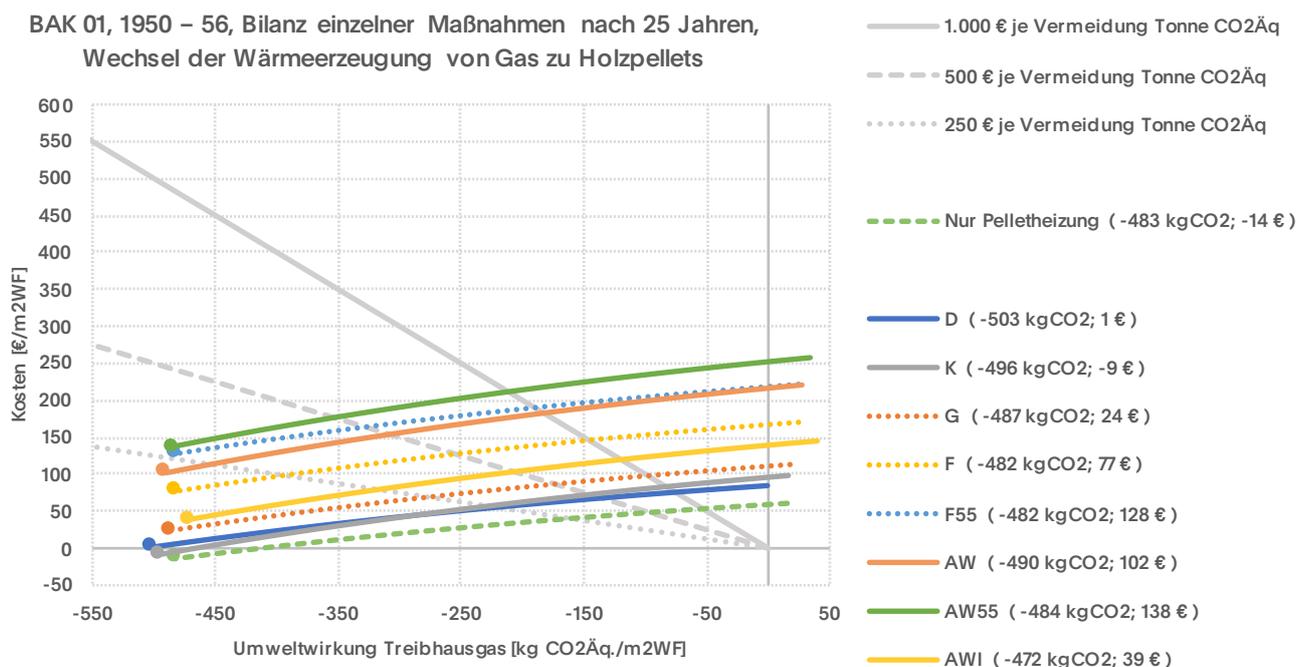


Abbildung 49: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz einzelner Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Holzpellets.

Die Umstellung auf eine Wärmeerzeugung mit Holzpellets bewirkt eine Reduktion sowohl der jährlichen Betriebskosten als auch der energiebedingten Treibhausgasemissionen. Die Investition würde sich sogar wirtschaftlich innerhalb eines Zeitraums von 25 Jahren amortisieren.

Durch diese Effekte verringert sich jedoch der ökologische und ökonomische Nutzen begleitender Dämmmaßnahmen. (Abbildung 49)

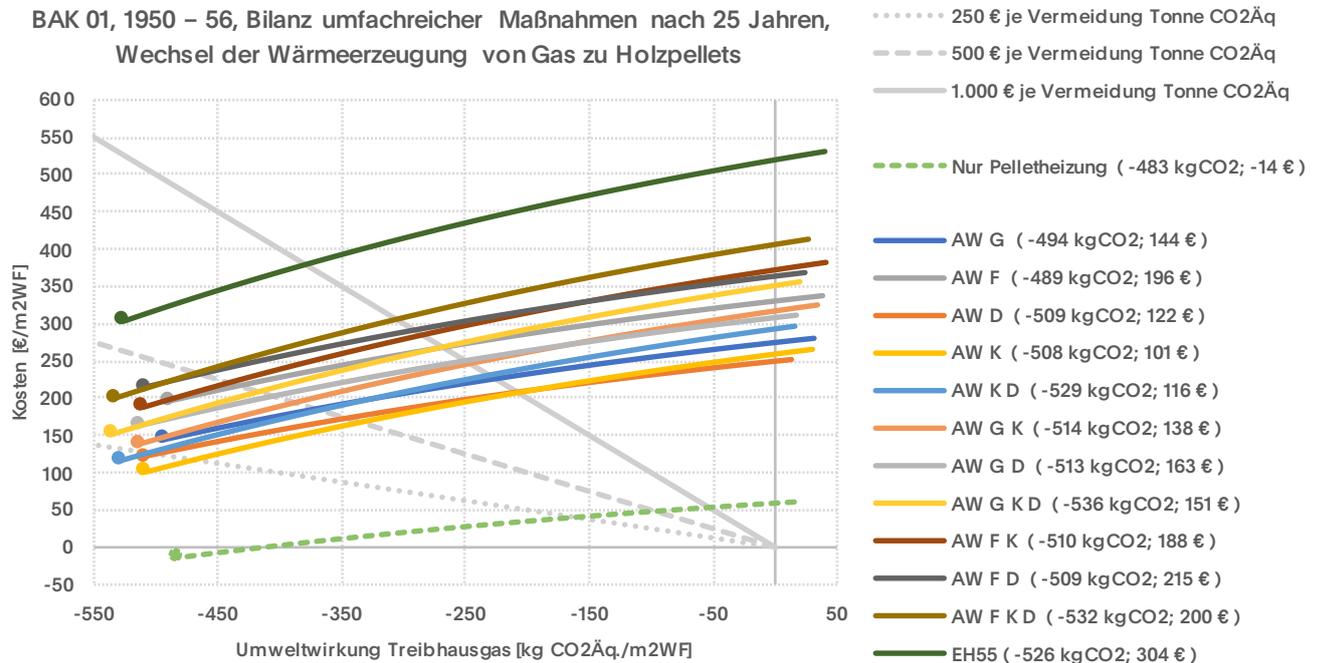


Abbildung 50: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz umfangreicher Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Holzpellets.

Abbildung 50 zeigt die Ergebnisse umfangreicher Dämmmaßnahmen in Kombination mit einer Holzpellettheizung. Zwar ermöglichen diese Maßnahmen eine zusätzliche Reduktion der Treibhausgasemissionen, jedoch sind sie mit deutlich erhöhten Vermeidungskosten zwischen 250 und 1.000 € pro Tonne CO₂-Äquivalent verbunden.

Besonders ineffizient erweist sich dabei das EH55-Gebäudekonzept, das die höchsten Kosten pro vermiedener Emissionseinheit verursacht.

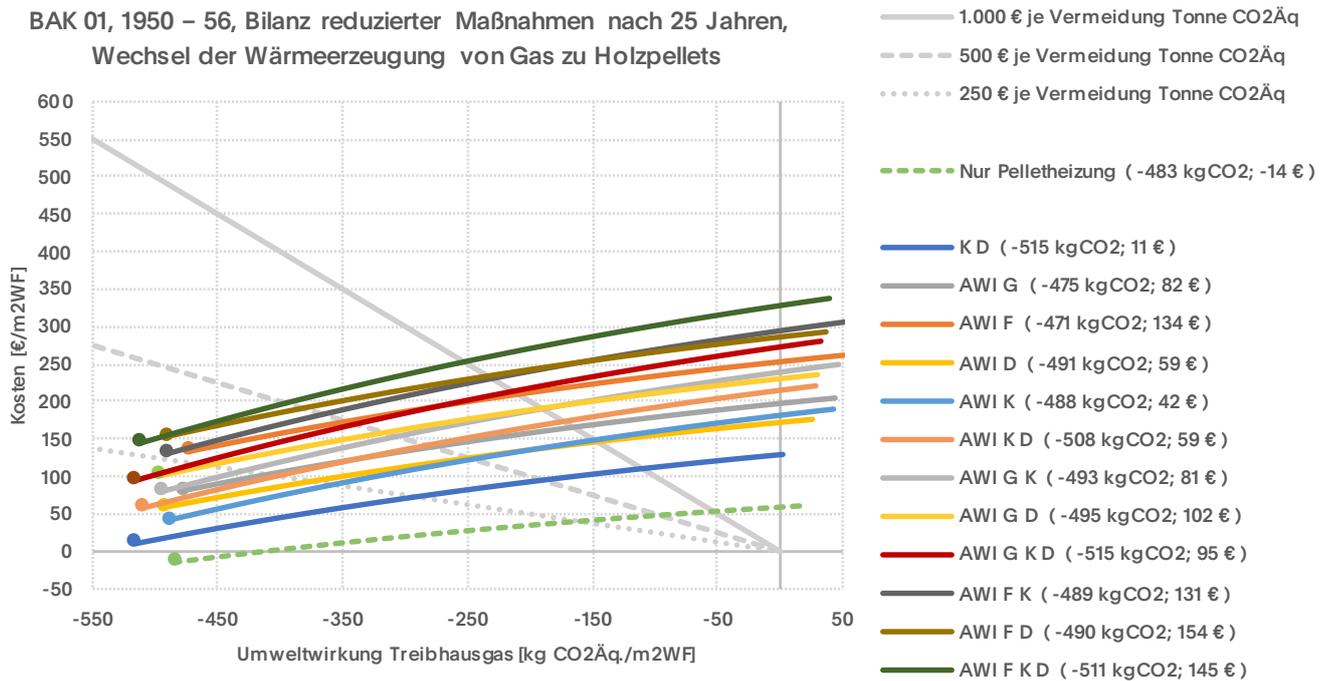


Abbildung 51: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz reduzierter Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Holzpellets.

Die in Abbildung 51 dargestellten reduzierten Maßnahmen sind vergleichsweise effizient mit Vermeidungskosten von meist unter 250 € pro Tonne CO₂-Äquivalent.

Die Ergebnisse der Holzpellet-Varianten zeigen deutlich, dass die ökologische und ökonomische Optimierung der Wärmeerzeugung selbst besonders effizient ist. In der Konsequenz verlieren begleitende Dämmmaßnahmen an Wirtschaftlichkeit und ökologischer Wirkung, da:

1. Die Pelletheizung bereits hohe Einsparungen bei Emissionen und Kosten ermöglicht
2. Der relative Mehrnutzen zusätzlicher Dämmung deutlich abnimmt
3. Die Amortisationszeiten für Dämmmaßnahmen sich entsprechend verlängern

BAK01, 1950 – 56, Bilanz nach 25 Jahren, n=285

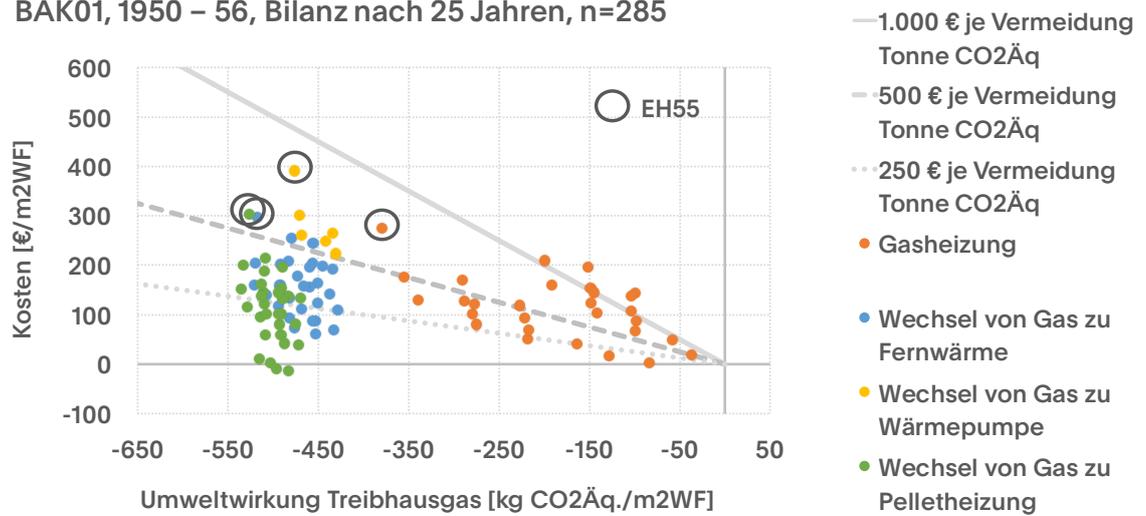


Abbildung 52: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualterklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz für alle untersuchten Maßnahmen nach 25 Jahren.

Abbildung 52 stellt alle 285 untersuchten Varianten systematisch nach Wärmeversorgungssystemen gefärbt dar. Die Analyse zeigt deutlich:

1. **Primäre Einflussgröße:**

Die Art der Wärmeversorgung beeinflusst die Umweltwirkung des Gebäudes am stärksten und bestimmt maßgeblich dessen Nachhaltigkeitsperformance.

2. **Abnehmende Bedeutung von Dämmmaßnahmen:**

Der relative Einfluss begleitender Dämmmaßnahmen geht entsprechend zurück, insbesondere bei optimierter Wärmeerzeugung.

3.2. Weitere Baualtersklassen

Im Rahmen des Projekts wurden auch die weiteren Baualtersklassen 02, 03 und 04 untersucht. Die hier vorgenommene Eingrenzung orientiert sich an einschlägigen gesetzlichen Vorgaben, technischen Verordnungen sowie den baulichen Entwicklungen im Gebäudebestand der Münchner Wohnen. Detaillierte Erläuterungen dazu sind im Kapitel 2.2 und 2.4 zu finden. Die detaillierten Ergebnisdiagramme aller untersuchten Varianten analog zur Baualtersklasse 1 finden sich im Anhang 1.

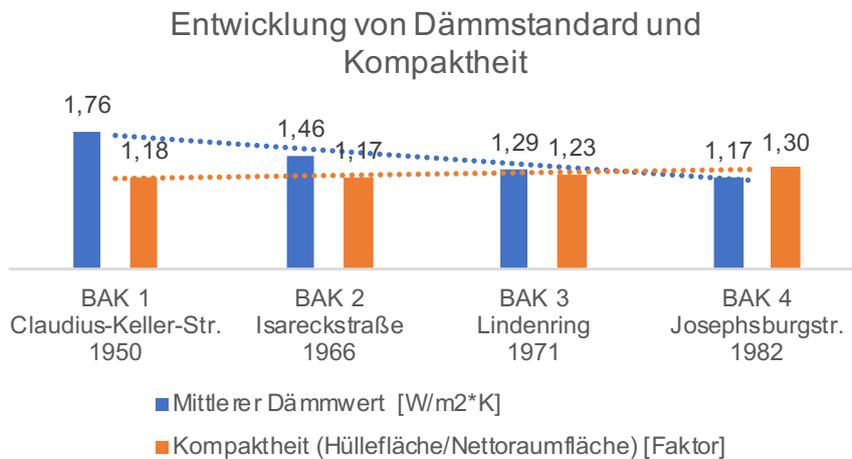


Abbildung 53: Entwicklung von Dämmstandards und Kompaktheit

Abbildung 53 dokumentiert die Entwicklung von Dämmstandard und Gebäudekomplexität im Untersuchungszeitraum 1950-1984. Entsprechend den verschärften gesetzlichen Vorgaben und technischen Verordnungen zeigt sich ein kontinuierlich steigender Dämmstandard, der sich in der Reduktion der mittleren spezifischen Wärmetransmission von ursprünglich 1,76 W/(m²K) auf 1,17 W/(m²K) manifestiert. Parallel entwickelt sich jedoch eine zunehmend komplexere Gebäudegeometrie mit zahlreichen Vor- und Rücksprüngen, die zu einer signifikanten Abnahme der Kompaktheit führt - gemessen als Verhältnis von Hüllfläche zu beheiztem Volumen.

Diese gegenläufigen Entwicklungstrends haben wesentliche Konsequenzen: Die verbesserte Dämmwirkung der Bauteile wird durch die geometriebedingte Vergrößerung der Hüllfläche teilweise kompensiert, was zu steigenden Wärmeverlusten pro beheizte Fläche führt. Zudem erfordert die größere Gebäudehülle einen erhöhten Material- und Kostenaufwand für die Dämmmaßnahmen. Es zeigt sich

somit ein charakteristischer Zielkonflikt zwischen den erreichten Dämmstandards und den sich verschlechternden geometrischen Voraussetzungen für die Energieeffizienz.

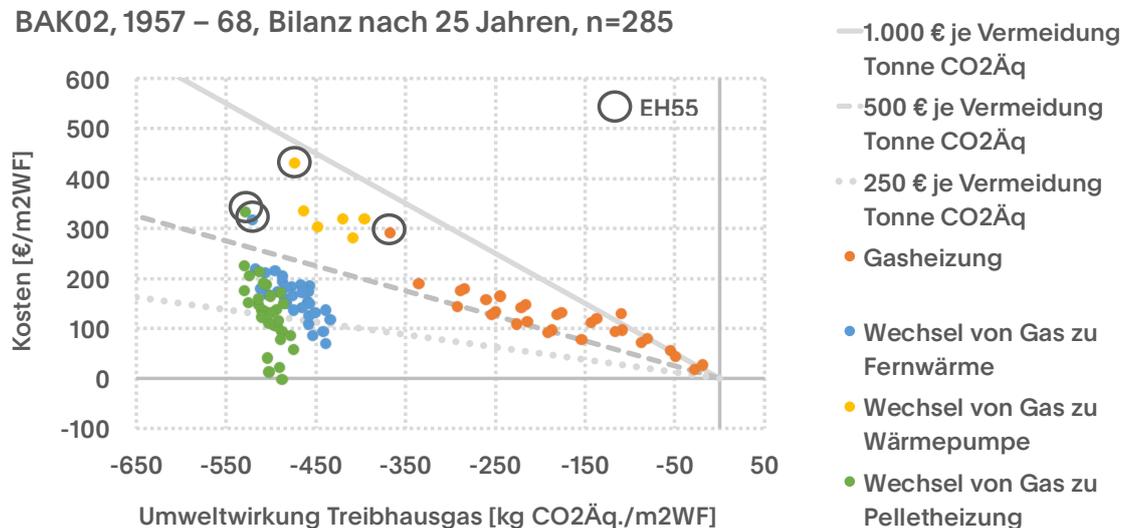


Abbildung 54: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 2 (BAK 02; 1957 – 1968), Bilanz für alle untersuchten Maßnahmen nach 25 Jahren.

Die in Abbildung 54 dargestellten 285 Varianten der Baualtersklasse 2 zeigen im Vergleich zur Baualtersklasse 1 (Abb. 52) eine schlechtere ökonomische Effizienz. Dieser Unterschied lassen sich auf zwei wesentliche Faktoren zurückführen:

1. **Höherer Ausgangsdämmstandard:**

Der bereits verbesserte energetische Zustand des Gebäudebestands in Baualtersklasse 2 führt dazu, dass der relative Nutzen weiterer Dämmmaßnahmen reduziert ist.

2. **Geringere Gebäudekompaktheit:**

Wie bereits analysiert weist Baualtersklasse 2 eine komplexere Geometrie mit größeren Hüllflächen auf. Dies führt zu erhöhtem Materialbedarf für die Dämmung und somit höhere spezifische Investitionskosten pro Quadratmeter Wohnfläche

Die Kombination dieser Faktoren erklärt die im Vergleich zu Baualtersklasse 1 geringere Effektivität energetischer Sanierungsmaßnahmen. Die Analyse verdeutlicht, dass bei Gebäuden mit besserem Ausgangszustand und komplexerer Geometrie die Wirtschaftlichkeit von Dämmmaßnahmen kritisch zu prüfen ist.

BAK03, 1969 – 77, Bilanz nach 25 Jahren, n=285

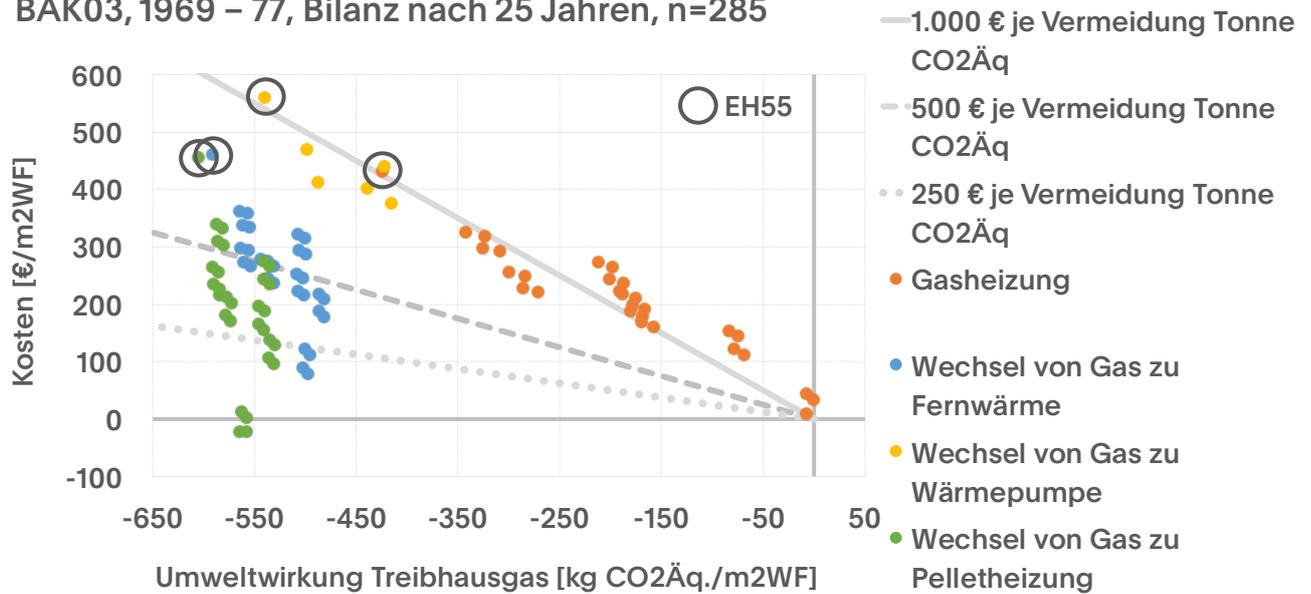


Abbildung 55: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 3 (BAK 03; 1969 – 1977), Bilanz für alle untersuchten Maßnahmen nach 25 Jahren.

Abbildung 55 zeigt die Ergebnisse für die Baualtersklasse 3 (1969-1977), die den bisherigen Trend fortsetzen. Die ökonomische Effizienz umfassender Dämmmaßnahmen sinkt dabei weiter gegenüber den Baualtersklassen 1 und 2. Bei dem untersuchten Repräsentanten handelt es sich um ein 13-geschossiges Gebäude, bei dem Dämmmaßnahmen im Dach- oder Kellerbereich nur geringe Auswirkungen auf die Gesamtperformance zeigen. Die verschiedenen Optionen für Außenwand und Fenster haben hingegen einen deutlichen Einfluss, was sich in der klar erkennbaren Clusterbildung um diese Schwerpunktvariablen widerspiegelt.

Die Analyse bestätigt damit die bereits in den vorherigen Baualtersklassen beobachtete Tendenz: Mit zunehmendem Baujahr und veränderter Gebäudestruktur verringert sich die Wirtschaftlichkeit zusätzlicher Dämmmaßnahmen, wodurch die Wahl der Wärmeversorgung an Bedeutung gewinnt.

BAK04, 1978 – 84, Bilanz nach 25 Jahren, n=285

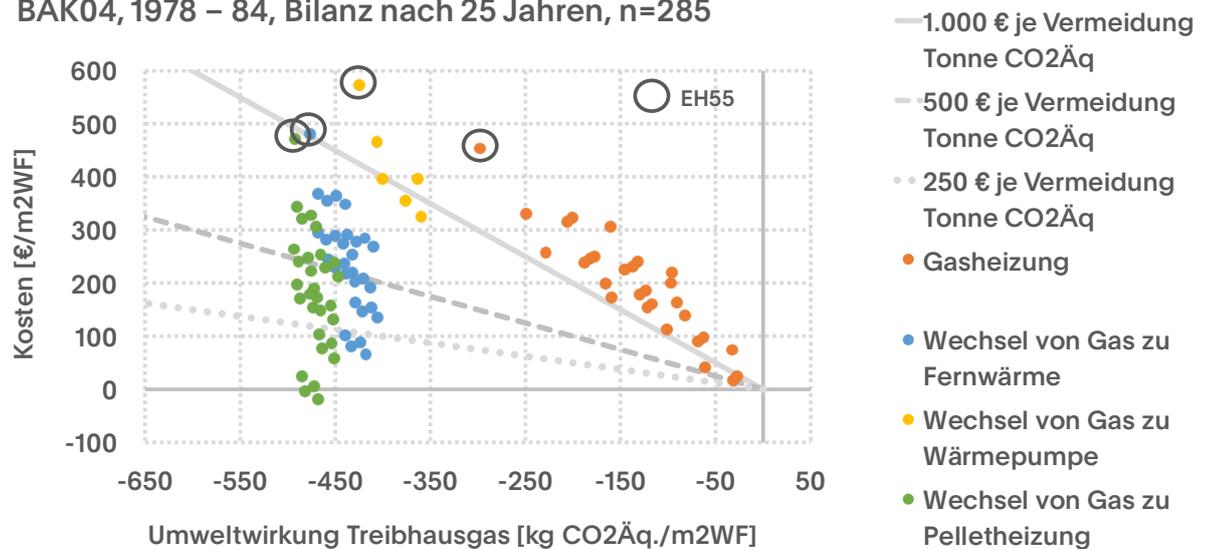


Abbildung 56: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 4 (BAK 04; 1978 – 1984), Bilanz für alle untersuchten Maßnahmen nach 25 Jahren.

Die in Abbildung 56 dargestellten Ergebnisse der Baualtersklasse 4 (1978-1984) setzen den erkennbaren Trend konsequent fort. Bei den Varianten mit Gasheizung liegen die Vermeidungskosten für zusätzliche Dämmmaßnahmen überwiegend oberhalb von 1000 € pro Tonne CO₂-Äquivalent. Deutlich wirtschaftlicher zeigt sich die Optimierung der Wärmeversorgung in Kombination mit reduzierten Dämmmaßnahmen: Ein Wechsel auf Fernwärme lässt sich mit Kosten unter 250 € pro Tonne CO₂-Äquivalent realisieren, während der Umstieg auf eine Pelletheizung sogar zu einer Amortisation führen kann. Die Varianten mit Dämmung auf EH55-Standard erweisen sich - mit Ausnahme der Kombination mit Gasheizung - durchweg als die ineffizientesten Lösungen.

Diese Ergebnisse unterstreichen die wachsende Bedeutung der Wärmeerzeugung gegenüber umfassenden Dämmmaßnahmen bei Gebäuden dieser Baualtersklasse. Die untersuchte Innendämmvariante aus 7 cm Kalziumsilikatplatten erreicht je nach Außenwandart in Kombination mit dieser Dämmwerte von 0,60 bis 0,43 W/m²*K. Im Vergleich zu einer GEG-konformen Außendämmung mit einem Dämmwert von 0,24 W/m²*K zeigt sich die Innendämmung jedoch deutlich effizienter. Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Frage, welche Dämmstärken an welchem Bauteil den besten Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweist. Wie die Studie verdeutlicht, besteht hier zusätzlich auch ein starker Zusammenhang mit der eingesetzten Wärmeerzeugungstechnologie.

4. Fazit

4.1. Nutzbarkeit der Ergebnisse

Im Arbeitspaket 2 „Typologie und Weiterbau“ wurden vier Modellgebäude aus dem Bestand der Münchner Wohnen ausgewählt, die stellvertretend für verschiedene Baualtersklassen der Nachkriegszeit (1950–1984) stehen. Die Auswahl erfolgte anhand energetischer, baulicher und erhaltungsbezogener Kriterien. Ziel war es, eine solide Grundlage zur Übertragung und Hochrechnung von Sanierungsstrategien auf den Gesamtbestand zu schaffen.

Durch eine systematische Typologisierung konnten energetische Schwächen und technische Potenziale identifiziert werden. Die Modellgebäude dienen als Basis für simulationsgestützte Bewertungen verschiedener Sanierungsszenarien unter Berücksichtigung energetischer, wirtschaftlicher und klimarelevanter Rahmenbedingungen.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind auf den Bestand der Münchener Wohnen anwendbar und zur Entwicklung eines zukunftsfähigen Transformationspfads für den Nachkriegs-Geschosswohnungsbau geeignet. Ein Abgleich mit der Deutschen Wohngebäudetypologie zeigt große Übereinstimmungen, was die Übertragbarkeit der Strategien auf weitere westdeutsche Bestände stützt.

4.2. Bewertung der Ergebnisse

Die systematische Analyse verschiedener Baualtersklassen (1950-1984) zeigt klare Trends bei der energetischen Gebäudesanierung:

1. **Priorität der Wärmeversorgung:**

- Der Wechsel des Wärmeerzeugungssystems von Gas auf Fernwärme, Wärmepumpe oder Pelletheizungen erweist sich als die wirtschaftlichste und ökologisch effektivste Maßnahme
- Bei moderneren Gebäuden (BAK 03 und 04) werden die Vorteile dieser Systemwechsel besonders deutlich, denn...

2. **Abnehmende Effizienz von Dämmmaßnahmen:**

- Der verbesserte Ausgangsdämmstandard reduziert das Einsparpotenzial zusätzlicher Maßnahmen
- Die abnehmende Kompaktheit jüngerer Gebäudegenerationen führt zu höheren spezifischen Sanierungskosten

3. **Kosteneffizienz:**

- Umfassende Dämmungen auf EH55-Standard erweisen sich in nahezu allen untersuchten Fällen als unwirtschaftlich
- Gezielte, auf den Gebäudetyp abgestimmte Maßnahmenkombinationen bieten das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis

4.3. Abgleich mit vergleichbaren Studien

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen teilweise Abweichungen zu anderen Untersuchungen zu ähnlichen Themen. Diese Abweichungen lassen sich auf einen oder mehrere der folgenden systematischen Unterschiede zurückführen:

1. **Realitätsnähere Bewertung der Einsparpotenziale:**

- Präzisere Erfassung der real erzielbaren Einsparungen durch thermisch dynamische Simulationen
- Berücksichtigung des Performance Gap zwischen theoretischer Berechnung und tatsächlichem Verbrauch

2. **Umfassende Kostenbetrachtung:**

- Realistischere Erfassung des erforderlichen Maßnahmenumfangs
- Einbeziehung aller im Rahmen der Dämmmaßnahmen anfallenden Kostenpositionen am Bau

3. **Ganzheitliche Ökobilanzierung:**

- Einbeziehung der Umweltwirkungen der Dämmmaßnahmen selbst (Graue Emissionen)
- Es wurden nicht nur unterschiedliche Arte der Vollsanierung untersucht, sondern auch reduziertere Maßnahmen.

4.4. Perspektive Warmmiete

Die Warmmiete bezeichnet die monatliche Gesamtmiete, die ein Mieter an den Vermieter zahlt. Sie setzt sich aus der Kaltmiete (auch Nettomiete genannt) und den Betriebskosten (auch Nebenkosten) zusammen [Langenberg, 2022]. In vielen Fällen sind die Heizkosten in der Warmmiete bereits enthalten – dies ist jedoch nicht zwingend und sollte im Mietvertrag explizit geregelt sein [Deutscher Mieterbund, 2024].

Vermieter dürfen unter bestimmten Voraussetzungen die Kosten für eine energetische Sanierung im Rahmen einer Modernisierungsmieterhöhung ganz oder teilweise auf die Mieter umlegen. Die gesetzliche Grundlage dafür ist § 559 BGB.

Nach § 559 Absatz 1 BGB kann der Vermieter 8 % der auf die Wohnung entfallenden Modernisierungskosten jährlich auf die Miete aufschlagen [Bürgerliches Gesetzbuch, 2023]. Dies gilt nicht für reine Instandhaltungs- oder Reparaturmaßnahmen, sondern nur für Maßnahmen, die den Gebrauchswert erhöhen oder nachhaltig Energie einsparen.

Es gilt eine Kappungsgrenze: Die monatliche Miete darf sich durch Modernisierung innerhalb von 6 Jahren um höchstens 3 €/m² erhöhen, bei Mieten unter 7 €/m² um maximal 2 €/m² (§ 559 Abs. 3a BGB).

Steigt die Kaltmiete um 2 €/m² im Monat, zahlt der Mieter über 25 Jahre insgesamt 600 €/m² mehr. Wenn gleichzeitig die Nebenkosten um 2 €/m² im Monat sinken – zum Beispiel wegen niedrigerer Heizkosten –, bleibt die Warmmiete unterm Strich gleich.

Die Studie hat dazu die Kosten der Varianten mit den möglichen Kosteneinsparungen verglichen. Umfassende Dämmmaßnahmen auf EH55-Niveau verursachen hohe Kosten, die sich nicht amortisieren und die Mieten unter Druck setzen würden. Die Studie zeigt, dass vergleichbare CO₂-Einsparungen auch mit deutlich geringeren Investitionen erzielt werden können.

Aus der vorliegenden Untersuchung geht hervor: Die Dekarbonisierung des Wohnungsbestands kann ohne Steigerung der Warmmiete gelingen – wenn statt kostenintensiver Vollsanierungen gezielte, gebäudespezifisch angepasste Maßnahmen in Kombination mit einem Wechsel des Wärmeerzeugungssystems eingesetzt werden. Für Härtefälle wären zusätzliche Unterstützungsmaßnahmen notwendig.

4.5. Empfehlung für Förderrichtlinien

Stand der bundesweiten Förderungen für energetische Sanierungen

Zentrales Förderprogramm für energetische Sanierungen der Bundesregierung ist die *Bundesförderung für effiziente Gebäude* (BEG). Gefördert werden Einzelmaßnahmen an Hülle, Technik und erneuerbaren Heizsystemen als nicht rückzahlbare BAFA-Zuschüsse (bis 70 %) kombiniert mit zinsgünstigen KfW-Ergänzungskrediten und die Vollsanierungen zum Effizienzhaus über Kredite [BAFA, 2025a]. In Abbildung 57 werden die geförderten Maßnahmen und das Institut über welches die Abwicklung läuft einmal grafisch aufgezeigt.



Abbildung 57: Überblick der aktuellen Förderlandschaft des Bundes [Das moderne Haus, o.D.]

Ergänzend zu diesem grundlegenden Fördersystem bestehen Sonderprogramme mit spezifischen Zielsetzungen. So wird etwa der *Klimafreundliche Neubau - Wohngebäude* (KfW 297/298) durch Kredite mit erhöhtem Fördervolumen je Wohneinheit unterstützt, sofern das Vorhaben den Anforderungen des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude (QNG) entspricht [KfW, 2025].

Bis Ende 2023 wurde durch die Bundesförderung *Serielle Sanierung* der Einsatz von industriell vorgefertigten Fassaden- oder Dachelementen gefördert. In welchem Umfang die Förderrichtlinie fortgesetzt wird steht noch nicht fest. [BAFA, 2025b] Aufgrund der regelmäßig stattfindenden Anpassungen und Neuausrichtungen dieser Sonderprogramme konzentriert sich die Untersuchung im vorliegenden Projekt in erster Linie auf Empfehlungen der zentralen Förderstrukturen im Rahmen des BEG.

Empfehlung:

Die Ergebnisse zeigen, dass es ein großes Potenzial gibt, die Umweltwirkung der Beheizung von Mehrfamilienhäusern aus der Nachkriegszeit zu senken. Eine Umstellung auf umweltfreundlichere Heizsysteme in Kombination mit gezielten Verbesserungen an der Gebäudehülle kann bereits mit vergleichsweise geringem Aufwand deutliche Einsparungen erzielen. Auf diese Weise kann die vorhandene Kapazität der Bauwirtschaft auf viele kleinere, aber ökologisch und wirtschaftlich sinnvolle Maßnahmen verteilt werden. Das ermöglicht größere Fortschritte bei der CO₂-Einsparung. Mit passenden politischen Anreizen und einer konsequenten Umstellung der Energieversorgung könnten die angestrebten Klimaziele besser erreicht werden.

Aus Sicht der Autor*innen lassen sich daraus folgende Empfehlungen für die zukünftige Förderung energetischer Sanierungen ableiten:

- **Fokus auf effektive Einzelmaßnahmen legen:** Die Umstellung der Wärmeversorgung sollte hierbei Priorität haben, da diese im Rahmen der Studie den größten Hebel zeigt. Im Zuge notwendiger Instandsetzungen sollten energetische Ertüchtigungen an der Gebäudehülle gefördert werden.
- **Rebound-Effekte bei der Berechnung des Energiebedarfs berücksichtigen:** Entscheidungen zur Optimierung des Gebäudebetrieb sind nur so gut, wie die zugrunde gelegten Verbrauchs-Prognosen. Das zu erwartende Performance Gap darf nicht – wie bisher praktiziert – ausgeblendet werden. Studien haben hierzu bereits nutzbare Methoden entwickelt, die auch bei der vorliegenden Untersuchung Anwendung gefunden haben [Loga & Behem 2021] [Walberg & Gniechwitz 2021].

4.6. Nutzen für die Praxis des Deutschen Jugendherbergswerk

Das Forschungsprojekt wurde von drei DJH-Landesverbänden (Unterweser-Ems, Westfalen-Lippe und Bayern) unterstützt, die bundesweit rund 100 Jugendherbergen betreiben. Die Nutzung dieser Häuser ähnelt einem Geschosswohnungsbau, da in beiden gewohnt, übernachtet und gegessen wird. Allerdings gibt es entscheidende Unterschiede: Die Auslastung hängt stark von Lage und Saison ab – Skigebiete sind im Winter gefragt, Küstenorte im Sommer. Bei hoher Belegung reduzieren dichtere Zimmerbelegungen den Energiebedarf für Raumwärme, doch gleichzeitig gewinnen Feuchteschutz und hygienischer Luftwechsel an Bedeutung. Zudem umfasst das Raumprogramm oft Speisesäle, Küchen, Seminarräume oder Sporthallen, die andere klimatische Anforderungen stellen als reiner Wohnbau.

Die Fördermittellandschaft für Jugendherbergen unterscheidet sich von der Wohnungswirtschaft. Neben nationalen Programmen kommen spezielle Landes- und EU-Mittel für strukturschwache Regionen infrage. Trotz dieser Besonderheiten sind die Studienergebnisse auf die strategische Gebäudeinstandhaltung übertragbar. Sie bestätigen den DJH-Fokus auf Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung und zeigen, dass gezielte Einzellösungen oft sinnvoller sind als Vollsanierungen. Dies ermöglicht eine bessere Kosten-Umwelt-Effizienz und mehr Flexibilität bei der Anpassung von Freizeit- und Bildungsangeboten.

Literaturverzeichnis

BAFA. (2025a). *Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) – Förderprogramm im Überblick.*

https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente_Gebaeude/Foerderprogramm_im_Ueberblick/foerderprogramm_im_ueberblick_node.html

BAFA. (2025b). *Bundesförderung Serielles Sanieren.*

https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Seriell_Sanieren/serielles_sanieren_node.html

BAnz AT 04.12.2020 B1 (2020).

<https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/qzQUGd8A3unSCCbVMcf/content/qzQUGd8A3unSCCbVMcf/BAnz%20AT%2004.12.2020%20B1.pdf>

BBSR (2016) Datenbasis zum Gebäudebestand. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. 20216

<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2016/ak-09-2016.html>

BBSR (2017) Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. 19.3.2025.

https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf

BBSR (2019) Beitrag der Digitalisierung zur Produktivität in der Baubranche. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) [Hrsg.]: BBSR-Online-Publikation Nr. 19/2019.

<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2019/bbsr-online-19-2019-dl.pdf>

BBSR (2022) Projekt IPEAD – Informationspotenziale von Energieausweisdaten. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2022.

<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2022/bbsr-online-13-2022.html>

BBSR (2024-1) Anhang 3.1.1 zur ANLAGE 3, Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude (Aktualisiert: 19.07.2024). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. 19.3.2025.

https://www.qng.info/app/uploads/2024/07/QNG_Handbuch_Anlage-3_Anhang-311_LCA_Bilanzregeln-WNG_v1-4.pdf

BBSR (2024-2) Ökobilanzierung Rechenwerte 2023 Version 1.3 (Aktualisiert: 27.03.2024). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. 19.3.2025.

<https://www.qng.info/app/uploads/2024/04/Oekobilanzierung-Rechenwerte-2023-Version-1.3.xlsx>

Beck, M.-L.; Marty, S; Mohn, C.; Schrader, C.; Stangl, M. (2024) Grazer Charta der Klimakommunikation [Kongressbeitrag] K3-Kongress zu Klimakommunikation in Graz 26. September 2024.

<https://k3-klimakongress.org/wp-content/uploads/2024/09/Grazer-Charta-der-Klimakommunikation-2024.pdf>

Behem, Guillaume / Großklos, Marc / Loga, Tobias / Müller, André / Swiderek, Stefan / Institut für Wohnen und Umwelt (Hrsg.): Realbilanzierung für den Verbrauch-Bedarf-Vergleich (MOBASY-Teilbericht). Realistische Bilanzierung und Quantifizierung von Unsicherheiten als Grundlage für den Soll-Ist-Vergleich beim Energieverbrauchscontrolling. Darmstadt 2021.

https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/mobasy/2021_IWU_LogaEtAl_MOBASY-Realbilanzierung-Verbrauch-Bedarf-Vergleich.pdf

BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2022). Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2023).

https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/04_EEG_2023.pdf

Born, Rolf / Diefenbach, Nikolaus / Loga, Tobias / Stein, Britta / Institut für Wohnen und Umwelt (Hrsg.): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Darmstadt 2015.

https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/episcopo/2015_IWU_LogaEtAl_Deutsche-Wohngeb%C3%A4udetypologie.pdf

Bundesarchitektenkammer [Hrsg.]: BIM für Architekten. Digitalisierung und Bauen im Bestand, 2021

https://bak.de/wp-content/uploads/2025/05/BAK_DigitalisierungUndBauenImBestand.pdf

Bürgerliches Gesetzbuch. (2023). § 559 BGB – Mieterhöhung nach Modernisierungsmaßnahmen.

https://www.gesetze-im-internet.de/bgb/_559.html

BuVEG (2025, 18. Februar) Sanierungsquote.

<https://buveg.de/sanierungsquote/>

Cramer, J., & Breitling, S. (2012). Architektur im Bestand: Planung, Entwurf, Ausführung. Walter de Gruyter.

<https://www.iese.fraunhofer.de/content/dam/iese/publikation/digitalisierung-baubranche-fraunhofer-iese.pdf>

DiCoMa [Hrsg.]: Digitalisierung der Baubranche, 2023

<https://www.iese.fraunhofer.de/content/dam/iese/publikation/digitalisierung-baubranche-fraunhofer-iese.pdf>

Das moderne Haus (o.D.) *Aktuelle Fördermittel für die energetische Sanierung.*
<https://das-moderne-haus.info/gebaeude-modernisieren/planung/aktuelle-foerdermittel/>

dena (2021). dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität.
<https://www.dena.de/PUBLIKATION507>

Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle (2023). Synthesebericht zum Sechsten IPCC-Sachstandsbericht (AR6) Hauptaussagen aus der Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung (SPM). Version vom, 19.4. 2004.
https://www.de-ipcc.de/media/content/Hauptaussagen_AR6-SYR.pdf

Deutscher Mieterbund. (2024). *Mietrecht von A bis Z: Warmmiete.*
<https://www.mieterbund.de/mietrecht/mietrecht-abc/detailansicht/abc/warmmiete.html>

Engelmann, P., Köhler, B., Meyer, R., Dengler, J., Herkel, S., Kießling, L., ... & Steinbrenner, J. (2021). Systemische Herausforderung der Wärmewende. Abschlussbericht. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-04-26_cc_18-2021_waermewende.pdf

Fritsche, U. R.; Greß, H. W. (2020) Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG- Emissionen des deutschen Strom-Mix im Jahr 2019 sowie Ausblicke auf 2020 bis 2050. Darmstadt: IINAS GmbH.
https://iinas.org/app/downloads_from_old_page/GEMIS/2020_KEV_THG_Strom-2019_2020-2050.pdf

Fritsche, U. R.; Greß, H. W. (2021) THG-Emissionen und nichterneuerbarer Primärenergieverbrauch des deutschen Erdgasmix im Jahr 2019 und 2020 sowie Ausblick auf 2030. Darmstadt: IINAS GmbH.
<https://iinas.org/app/uploads/2021/12/IINAS-2021-KEV-THG-Gas-ASEW-final.pdf>

Gann, D., & Faltin, B. (2023). *Eine Vergleichsstudie von Deep Learning Architekturen für die automatische Symboldetektion in Bauwerksplänen.* Ruhr-Universität Bochum.
<https://d-nb.info/1301846171/34#page=342>

GEWOFAG (2015) Forschung für energiesparende Bauen der Zukunft – Forschungsprojekt Riem [online]. München: GEWOFAG Holding GmbH.
<https://risi.muenchen.de/risi/dokument/v/4001844>

Giebeler, G., Fisch, R. Krause, H., Musso, F., Petzinka K., Rudolphi, A., Atlas Sanierung, Birkhäuser, 2008, S.190 ff

https://www.detail.de/de_de/atlas-sanierung-124?srsId=AfmBOoopytVlv2VsxARre7LSrhaqK454uEMIkOdanhwvl_xjzkfmMiD

Hauschild, M., & Karzel, R. (2010). Digitale Prozesse: Planung, Gestaltung, Fertigung. De Gruyter. Institut für Bauforschung e. V. (Hrsg.): Atlas Bauen im Bestand. Katalog für nachhaltige Modernisierungslösungen im Wohnungsbaubestand. Köln 2008.

<https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.11129/detail.9783955530228/html>

Hovestadt, L. (2008). Die technische Rekonstruktion der Architektur im Informationszeitalter. Detail: Zeitschrift für Architektur+ Baudetail, 47(12), 1434-1438.

<https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/10216>

Hovestadt, L., Hirschberg, U., & Fritz, O. (Eds.). (2020). Atlas of digital architecture: Terminology, concepts, methods, tools, examples, phenomena. Birkhäuser.

<https://www.birkhauser.com/9783039104444/9783039104444.html>

KfW. (2025). *Klimafreundlicher Neubau – Wohngebäude (Kredit Nr. 297, 298)*.

[https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Neubau/Foerderprodukte/Klimafreundlicher-Neubau-Wohngebäude-\(297-298\)/Original-Klimafreundlicher-Neubau-Wohngebäude-\(297-298\).html](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Neubau/Foerderprodukte/Klimafreundlicher-Neubau-Wohngebäude-(297-298)/Original-Klimafreundlicher-Neubau-Wohngebäude-(297-298).html)

Knecht, K.; Sigrist, D. (2019) Vergleich der beiden Lüftungskonzepte der Siedlung Klee bezüglich Ökologie und Ökonomie [online]. Dübendorf: s3 GmbH.

https://s3-engineering.ch/s3/file%20upload/191210_Schlussbericht%20Studie%20Lu%CC%88ftungskonzepte%20Siedlung%20Klee_17.019-5.pdf

KSG (2019).

<https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html>

Lämmle, M., Wapler, J., Kropp, M., Hess, S., Hahn, D., David, G., & Herkel, S. (2019). Gezielter Heizkörper-Austausch in Wärmepumpenheizungsanlagen. *DKV-Tagung. Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e. V. DKV. Ulm.*

<https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/a38ca890-afa0-49d7-96cd-80e8cbd9df5b/content>

Langenberg, C. (2022). *Mietrecht in der Praxis: Grundlagen, Verträge, Nebenkostenabrechnung* (6. Aufl.). München: C.H. Beck.

Loga, T., & Behem, G. (2021). Target/actual comparison and benchmarking used to safeguard low energy consumption in refurbished housing stocks. Proceedings of the eceee Summer Study 2021, 461-471.

https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/mobasv/2021_eceee_LogaEtBehem_Target-actual-comparison-and-benchmarking-in-refurbished-housing-stocks.pdf

Mahler, B., Idler, S., Nusser, T., & Gantner, J. (2019). Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus. UBA Texte, 132, 2019.
<https://www.re-source.com/wp-content/uploads/2019/11/UBA-2019-Energieaufwand-Gebaeudekonzepte.pdf>

Marble, S. (2010). Designing Design, Designing Assembly, Designing Industry. Proceedings from ACADIA, 10.

Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen, 2023
https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/beg_richtline_beg_em_20231221_PDF.html

SBD (2025) Strategiedialogs „Bezahlbares Wohnen und innovatives Bauen“: Einfach (Um-)bauen und Sanieren: Modellprojekt zu einfachen Sanierungsstrategien der TU München und GGH Heidelberg (GGH)
<https://www.sdb-bw.de/projekte/einfach-um-bauen-und-sanieren-modellprojekt-zu-einfachen-sanierungsstrategien-der-tu-muenchen-und-ggh-heidelberg>

Steinbach, J., Deurer, J., Senkpiel, C., Brandes, J., Heilig, J., Berneiser, J., & Kost, C. P. (2021). Wege zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes 2050. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).
<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-23-2021.html>

SWM M-Fernwärme für Geschäftskunden SWM, 19.03.2025.
<https://www.swm.de/geschaeftskunden/fernwaerme#primaer>

SWM – Stadtwerke München. (o. D.). Wärmewende für eine klimafreundliche Zukunft.
<https://www.swm.de/unternehmen/waermewende> (Zugriff am 01. Juli 2025)

Walberg, D. & Gniechwitz, T. (2021). Energiebedarf und tatsächlicher Energieverbrauch bei Wohngebäuden. Verbrauchsbenchmarks für Intervalle des Norm-Energiebedarfs (Arbeits- und Informationsblätter, 24-2021). Kiel: Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen.
<https://arge-ev.de/arge-ev/publikationen/arbeitsblaetter/>

Weber, D. (2021). Betriebskostenrecht: Nebenkosten rechtssicher abrechnen (5. Aufl.). Köln: Werner Verlag.

WPG - Wärmeplanungsgesetz. (2023). Wärmeplanungsgesetz vom 20. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 394)
<https://www.gesetze-im-internet.de/wpg/WPG.pdf>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: notwendige Entwicklung der Sanierungsquote bis 2031	3
Abbildung 2: Verteilung der Gebäude auf die Baualtersklassen in Bezug auf die Gesamtauswahl der 151 Gebäude.	8
Abbildung 3: Verteilung der zwölf Repräsentanten auf die Baualtersklassen.....	9
Abbildung 4: Datenerfassung im Bestand.....	18
Abbildung 5: Methoden der Datenerhebung: Vergleich & Bewertung, Teil 1: Handaufmaß, Tachymetrie, Bauteiluntersuchung.....	26
Abbildung 6: Methoden der Datenerhebung: Vergleich & Bewertung, Teil 2: 3D-Laserscan, 3D-Aero-Laserscan, Photogrammetrie, Aero-Photogrammetrie	27
Abbildung 7: Kategorien der Datenqualität	31
Abbildung 8: Zielformulierung bei der Datenerhebung im Bestand	33
Abbildung 9: Digitale Prozesse bei Maßnahmen im Bestand	35
Abbildung 10: „Soll“-, „Ist“- und „Kann“-Daten im Bestand	38
Abbildung 11: Prozessdarstellung des Datenmanagements im Bestand	40
Abbildung 12 Fassadenschnitt BAK 01, o.M.....	47
Abbildung 13 Fassadenschnitt BAK 02, o.M.....	48
Abbildung 14 Fassadenschnitt mit Balkonen BAK 02, o.M.....	49
Abbildung 15 Fassadenschnitt BAK 03, o.M.....	51
Abbildung 16 Fassadenschnitt BAK 04, o.M.....	53
Abbildung 17: Fassadenschnitt mit Balkonen BAK 04, o.M.....	54

Abbildung 18: Gebäudeschnitt BAK 01 o.M, mit U-Werten (W/m ² K) lt. Tabelle [BAnz, 2020]	55
Abbildung 19: Gebäudeschnitt BAK 02 o.M, mit U-Werten (W/m ² K) lt. Tabelle [BAnz, 2020]	57
Abbildung 20: Gebäudeschnitt BAK 03 o.M, mit U-Werten (W/m ² K) lt. Tabelle [BAnz, 2020]	58
Abbildung 21: Gebäudeschnitt BAK 04 o.M, mit U-Werten (W/m ² K) lt. Tabelle [BAnz, 2020]	59
Abbildung 22: Sanierungsvarianten BAK 01 o.M. mit durch die Sanierungsmaßnahmen erreichten U-Werten (W/m ² K).....	61
Abbildung 23: Sanierungsvarianten BAK 02 o.M. mit durch die Sanierungsmaßnahmen erreichten U-Werten (W/m ² K).....	62
Abbildung 24: Sanierungsvarianten BAK 03 o.M. mit durch die Sanierungsmaßnahmen erreichten U-Werten (W/m ² K).....	63
Abbildung 25: Sanierungsvarianten BAK 04 o.M. mit durch die Sanierungsmaßnahmen erreichten U-Werten (W/m ² K).....	64
Abbildung 26: Primärenergieträger bzw. Wärmeerzeuger der Baualtersklassen nach Anzahl [-]	66
Abbildung 27: natürliches Lüftungskonzept des Bestands (eigene Darstellung)	68
Abbildung 28: Schematische Darstellung eines gebäudezentralen Heizungsnetzes (eigene Darstellung)	70
Abbildung 29: Gebäudetechnischer Lösungsansatz für den klimaneutralen Heizbetrieb bei gebäudezentralen Heizungssystemen (eigene Darstellung)	72
Abbildung 30: Schematische Darstellung eines wohnungsweisen, dezentralen Heizungsnetzes (eigene Darstellung)	73

Abbildung 31: Gebäudetechnischer Lösungsansatz für den klimaneutralen Heizbetrieb bei wohnungsweise, dezentrale Heizungssysteme (eigene Darstellung)	75
Abbildung 32: Schematische Darstellung eines raumweisen, dezentralen Heizungsznetzes (eigene Darstellung)	76
Abbildung 33: Gebäudetechnischer Lösungsansatz für den klimaneutralen Heizbetrieb bei raumweise, dezentrale Heizungssysteme (eigene Darstellung)	78
Abbildung 34: Schematische Darstellung des empfohlenen Lüftungskonzepts nach der Sanierung (eigene Darstellung)	79
Abbildung 35: Methodik zur Ermittlung einer realistischen Energiebedarfseinsparung durch die Sanierungsvarianten (eigene Darstellung).....	80
Abbildung 36: Bedarfs-Verbrauchsabgleich der Repräsentanten in kWh/m ² a.....	82
Abbildung 37: Methodik zur Ermittlung der Niedertemperaturfähigkeit (NT-Ready) für den Wärmepumpenbetrieb (eigene Darstellung)	84
Abbildung 38: Energetische Einsparung ausgewählter Einzelmaßnahmen und Sanierungsvarianten in kWh/m ² a der Baualtersklassen-Repräsentanten	87
Abbildung 39: Ergebnisse der "Wärmepumpen Ready" Untersuchung nach Heizkörperauslegungstemperaturen (Vorlauf/Rücklauf/Raumtemperatur).....	88
Abbildung 40: Mittlere Abweichung des gemessenen Energieverbrauchs vom berechneten Endenergiebedarf nach Norm DIN V 4108-6	93
Abbildung 41: Für die Untersuchung angenommene Entwicklung der Energieträger für Gasheizung, Wärmepumpe und Fernwärme von 2026 – 2050.	96
Abbildung 42: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz einzelner Maßnahmen nach 25 Jahren, Wärmeerzeugung mit Gas.	97
Abbildung 43: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz umfangreicher Maßnahmen nach 25 Jahren, Wärmeerzeugung mit Gas.	100

Abbildung 44: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz reduzierter Maßnahmen nach 25 Jahren, Wärmeerzeugung mit Gas. .	101
Abbildung 45: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz einzelner Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Fernwärme.	102
Abbildung 46: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz umfangreicher Maßnahmen 2050, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Fernwärme.	103
Abbildung 47: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz einzelner Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Fernwärme.	104
Abbildung 48: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Wärmepumpe.	105
Abbildung 49: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz einzelner Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Holzpellets.	106
Abbildung 50: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz umfangreicher Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Holzpellets.	107
Abbildung 51: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz reduzierter Maßnahmen nach 25 Jahren, Wechsel der Wärmeerzeugung von Gas zu Holzpellets.	108
Abbildung 52: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 1 (BAK 01; 1950 – 1956), Bilanz für alle untersuchten Maßnahmen nach 25 Jahren.	109
Abbildung 53: Entwicklung von Dämmstandards und Kompaktheit.	110
Abbildung 54: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 2 (BAK 02; 1957 – 1968), Bilanz für alle untersuchten Maßnahmen nach 25 Jahren.	111

Abbildung 55: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 3 (BAK 03; 1969 – 1977), Bilanz für alle untersuchten Maßnahmen nach 25 Jahren.	112
Abbildung 56: Ergebnisse des Repräsentanten der Baualtersklasse 4 (BAK 04; 1978 – 1984), Bilanz für alle untersuchten Maßnahmen nach 25 Jahren.	113
Abbildung 57: Überblick der aktuellen Förderlandschaft des Bundes [Das moderne Haus, o.D.].....	118
Abbildung 58: Schematische Schnittdarstellung ausgewählter geplanter Sanierungsmaßnahmen zum Vergleich.....	120
Abbildung 59: Energieeinsparung für Raumwärme bei Umbauvarianten in Prozent gemäß Verbrauch gemessen im Januar und Februar 2025, auf ein Jahr hochgerechnet	120

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Randbedingungen der thermisch-dynamischen Simulation81

Tabelle 2: Randbedingungen zur Berechnung der Heizlast nach DIN EN 12831.....85