

LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden

Bericht zu AP 5:

Techno-ökonomische und ökologische Analyse von Sanierungspaketen aus Gebäudehülle und LowEx-Systemen



Der vorliegende Bericht ist Ergebnis der wissenschaftlichen Querspanne »LowEx-Bestand Analyse« des thematischen Projektverbunds »LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden (LowEx-Bestand)«. In diesem Verbund arbeiten Forschungsinstitute mit Herstellern von Heizungs- und Lüftungstechnik und mit Unternehmen der Wohnungswirtschaft zusammen. Gemeinsam werden Lösungen entwickelt, analysiert und demonstriert, die den effizienten Einsatz von Wärmepumpen, Wärmeübergabesystemen und Lüftungssystemen bei der energetischen Modernisierung von Mehrfamiliengebäuden zum Ziel haben.

LowEx-Systeme arbeiten durch geringe Temperaturdifferenzen zwischen Heizmedium und Nutzwärme besonders effizient. Wärmepumpen haben dabei erhebliches Potenzial zur Absenkung der spezifischen CO₂-Emissionen bei der Wärmebereitstellung. Für die energetische Modernisierung von Mehrfamiliengebäuden ist der Einsatz solcher Systeme mit besonderen Herausforderungen und Anforderungen an die Übergabe der Raumwärme, die Warmwasserbereitung und die Nutzung von Umweltwärme verbunden. Diese Herausforderungen werden in LowEx-Bestand adressiert.

Projekt LowEx-Bestand Analyse

Bericht zu AP 5

Techno-ökonomische und ökologische Analyse von Sanierungspaketen aus Gebäudehülle und LowEx-Systemen

Stand: 08.02.2022

Autoren: Fritz Braeuer (KIT), Beatrice Rodenbücher (INATECH), Katrin Scharf (INATECH), Raphael Vollmer (INATECH), Dr. Rebekka Eberle (INATECH), Mohamed Obid (ISE), Jeannette Wapler (ISE), Dr. Constanze Bongs (ISE), Dr. Ferdinand Schmidt (KIT), Manuel Ruppert (KIT), Dr. Stefan Hess (INATECH)

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz- Gemeinschaft

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 03SBE0001

www.lowex-bestand.de



Kurzfassung

Im Arbeitspaket 5 des Verbundforschungsprojektes „LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden“ wird eine techno-ökonomische Bewertung der Sanierungspakete, d.h. Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle und Austausch des Wärmeversorgungssystems, für Mehrfamilienhäuser im Bestand in Deutschland durchgeführt. Dafür werden Investitionen in verschiedene Low-Ex-Systemvarianten mit Wärmepumpen (WP) für Referenz-Mehrfamilienhäuser (MFH) mit einem älteren Gas-Heizkessel hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen bewertet und mit dem Einbau eines modernen Gasbrennwertkessels verglichen. Hinsichtlich der Gebäudehülle wird dabei zwischen verschiedenen Sanierungsgraden und Sanierungs-Szenarien unterschieden. Zusätzlich werden die Akteursperspektiven von Mieter und Vermieter sowie die Sensitivitäten der Wirtschaftlichkeit der Investition anhand der maßgeblichen Eingangsdaten untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch energetische Hüllsanierung mit Wechsel des Heizsystems auf eine monoenergetische WP eine Reduktion der CO₂-Emissionen von bis zu 800 kg/m² über den Betrachtungszeitraum gegenüber dem Ursprungssystem zu erreichen ist (entspricht einer Reduktion um 85 % über den Betrachtungszeitraum). Im Zieljahr 2045 können die CO₂-Emissionen durch die monoenergetische WP sogar um ca. 95 % reduziert werden. Im Hauptszenario stellt sich das Sanierungspaket A60b (bivalentes Außenluftwärmepumpensystem mit Gasbrennwertkessel, WP ausgelegt auf 60 % der Leistung bezogen auf einen Bivalenzpunkt von -5 °C) in Kombination mit Dämmmaßnahmen an Außenwand und Fenster aus Sicht der energiebedingten Mehrinvestitionen als am wirtschaftlichsten dar.

Durch den langen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren wird die Wirtschaftlichkeit der LowEx-Systeme im Vergleich zu einem neuen Gas-Brennwertkessel stark von der zukünftigen Entwicklung von Gas- und Strompreisen beeinflusst. Der Kapitalwert der LowEx-Systeme bleibt aber in nahezu allen im Rahmen der Sensitivitätsanalyse betrachteten Szenarienkombinationen positiv.

Für den Einsatz von Wärmepumpen-Systemen in sanierten Mehrfamiliengebäuden lässt sich zusammenfassend festhalten:

- **CO₂-Emissionen:**
 - Die untersuchten Wärmepumpen-Systeme weisen kumuliert mehr als 50 % Emissions-Reduktion gegenüber einem Gas-Brennwert-Kessel auf.
 - Die Emissionen im Jahr 2045 sind stark abhängig vom Anteil erneuerbarer Energien bei der genutzten Elektrizität.
- **Wärmegestehungskosten:**
 - Die untersuchten WP-Systeme haben erheblich höhere Investitionskosten als der Einbau eines Gas-Brennwertkessels. Zur Überwindung dieser Hürde ist unabhängig von den Wärmegestehungskosten ein Investitionszuschuss sinnvoll.
 - Mit Investitionszuschuss zeigen die untersuchten WP über den Betrachtungszeitraum hinweg geringere Wärmegestehungskosten als Gas-Brennwertkessel.
 - Luft- und Erdreich-WP schneiden wirtschaftlich ähnlich ab; bei Luft-WP sind die Energie-Bezugskosten höher, bei Erdreich-WP die Investitionskosten.
 - Die System-Varianten monoenergetisch und bivalent unterscheiden sich bei optimaler Auslegung wirtschaftlich kaum.
- **Robustheit der Ergebnisse:**
 - Die MFH-Gebäudegröße hat einen geringen Einfluss auf das Ergebnis des System-Vergleichs.
 - Die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von WP-Systemen gegenüber Gas-Brennwertkesseln stellt sich robust gegenüber Variation der Studien-Annahmen dar.
 - Der Emissionsvorteil von monoenergetischen WP gegenüber bivalenten WP-Systemen ist weniger robust, weil er stark vom Anteil Power-to-Gas bzw. von grünem Wasserstoff im Gasnetz abhängt.

Abstract

The aim of work package 5 of the project "LowEx concepts for the heat supply of existing multi-family buildings" is a techno-economic evaluation of the renovation packages – renovation measures on the building envelope and replacement of the heating system – for existing multi-family houses in Germany. For this purpose, investments in LowEx systems with heat pumps (HP) in an existing medium-sized apartment building with an older gas boiler, in which refurbishment measures are to be carried out, are evaluated with regard to their economic and ecological effects and compared to a modern gas-fired condensing boiler. A distinction is made between different levels of renovation and refurbishment scenarios. In addition, the perspectives of both landlord and tenant as well as the sensitivities of the profitability of the investment with regard to the input data are examined.

The results show that a reduction in CO₂ emissions of up to 800 kg/m² compared to the original system can be achieved through energy-related envelope refurbishment with a change in the heating system to a mono-energetic HP (corresponds to a reduction of 85 % over the period under consideration). In the target year 2045, the CO₂ emissions can even be reduced by approx. 95 % by the mono-energetic HP. In the main scenario, the renovation package A60b (bivalent outdoor air heat pump system with gas-fired condensing boiler, HP designed for 60 % of performance based on a bivalence point of -5 °C) in combination with insulation measures on the exterior wall and windows is the most economical from the point of view of the energy-related additional investments.

Due to the long observation period of 25 years, the economic efficiency of the LowEx systems compared to a new condensing gas boiler is strongly influenced by the future development of gas and electricity prices. However, the net present value of the LowEx systems remains positive in almost all scenario combinations considered in the sensitivity analysis.

For the use of heat pump systems in refurbished multi-family buildings, the following is concluded:

- CO₂ emissions:
 - The investigated heat pump systems show a cumulative emission reduction of more than 50 % compared to a condensing gas boiler.
 - The emissions in 2045 are strongly dependent on the share of renewable energies in the electricity used.
- Levelized costs of heat (LCOH):
 - The studied HP systems have significantly higher investment costs than installing a condensing gas boiler. To overcome this hurdle, an investment subsidy makes sense, regardless of the heat production costs.
 - With an investment subsidy, the examined HPs show lower heat production costs than gas condensing boilers over the period under consideration.
 - Air-source and ground-source HPs perform economically similar; for air-source HPs, the energy procurement costs are higher, for ground-source HPs, the investment costs are higher.
 - The system variants mono-energetic and bivalent hardly differ economically when optimally designed.
- Robustness of the results:
 - MFH building size has a small impact on the results of the economic comparison.
 - The economic competitiveness of HP systems versus gas condensing boilers is robust to variation in study assumptions.
 - The emission advantage of mono-energetic HPs over bivalent HP systems is less robust because it depends strongly on the share of power to gas or green hydrogen in the gas grid.

Inhalt

Kurzfassung.....	I
Abstract	II
Inhalt.....	III
Nomenklatur	V
1 Einleitung.....	1
1.1 Fragestellung.....	1
1.2 Vorgehensweise der techno-ökonomischen und ökologischen Analyse	1
1.3 Untersuchungsgegenstand	2
1.3.1 Referenzgebäude, Sanierungsgrade und Sanierungs-Szenarien.....	2
1.3.2 LowEx-Systeme und Referenzsystem	3
1.3.3 Sanierungsmaßnahmen	4
2 Methodik und Datenbasis.....	7
2.1 Ökonomische und ökologische Kennwerte	7
2.1.1 Anfangsinvestition	7
2.1.2 Äquivalenter Energiepreis	8
2.1.3 Kapitalwertmethode.....	8
2.1.4 Kapitalwert der energiebedingten Mehrauszahlungen.....	10
2.1.5 Amortisationsmethode.....	10
2.1.6 Zinsfußmethode.....	11
2.1.7 CO ₂ -Emissionen	11
2.1.8 Spezifische Kosten für Wärme	11
2.1.9 Akteursperspektive: Mieter und Vermieter	12
2.2 Mietrechtliche Rahmenbedingungen.....	12
2.3 Technische Parameter für Auslegung und Betrieb der LowEx-Systeme.....	13
2.4 Ökonomische und ökologische Parameter	14
2.4.1 Kosten der Systemkomponenten	14
2.4.2 Kosten der Hüllsanierung	17
2.4.3 Energiepreisszenarien.....	20
2.4.4 Diskontierungsrate, Preisänderungsrate und Betrachtungszeitraum.....	21
2.4.5 Wartungskosten und Nutzungsdauern	22
2.4.6 CO ₂ -Emissionsfaktoren	23
2.4.7 Fördermaßnahmen von KfW und BAFA.....	23
2.5 Bestandstechnologie (Referenz)	24
3 Techno-ökonomische Bewertung von Gebäudehüll- und Systemsanierung.....	25
3.1 Sanierung der Gebäudehülle	25

3.1.1	Äquivalente Energiepreise	29
3.1.2	Kapitalwert der energiebedingten Mehrinvestition	31
3.1.3	CO ₂ -Emissionseinsparung	32
3.2	Sanierung des Heizungssystems	33
3.2.1	Anfangsinvestitionen	35
3.2.2	Energiekosteneinsparungen	36
3.2.3	Kapitalwert der energiebedingten Mehrinvestition	37
3.2.4	CO ₂ -Emissionseinsparungen	38
3.3	Zusammenfassung der Voruntersuchung	39
4	Techno-ökonomische Bewertung von Kombinationen von System- und Hüllsanierung	41
4.1	Reduktion der CO ₂ -Emissionen	41
4.2	Gesamtausgaben	42
4.3	Energiekosteneinsparungen	43
4.4	Kapitalwert der energiebedingten Mehrinvestition	44
4.5	Amortisationszeit und interner Zinsfuß	45
5	Akteursperspektiven und Sensitivitätsanalyse	47
5.1	Vergleich von monoenergetischen und bivalenten Systemen bei GEG-Sanierung	47
5.2	Akteursperspektive - Veränderung der Warmmiete	48
5.3	Sensitivitätsanalyse	49
5.3.1	Parametervariation	50
5.3.2	Strom- und Gaspreisszenarien	50
5.3.3	Berücksichtigung von Fördermöglichkeiten	55
6	Zusammenfassung und Fazit	57
7	Anhang	61
7.1	Ökonomische und ökologische Randbedingungen	61
7.1.1	Kosten der System-Komponenten	61
7.1.2	Kosten der Hüll-Komponenten	75
7.1.3	Energiepreisszenarien	85
7.1.4	CO ₂ -Emissionsfaktoren von Strom und Erdgas	86
7.2	Technische und energetische Angaben	89
7.2.1	Gebäudedaten im Detail, Sanierung des Heizsystems	89
7.2.2	Gebäudedaten, Sanierungsgrade und Sanierungspakete im Detail	90
7.2.3	Technische Auslegung der Systeme, Sanierung der Gebäudehülle	94
7.2.4	Technische Auslegung der Systeme, Sanierung des Heizsystems	96
7.2.5	Technische Auslegung der Systeme, Sanierungspakete	100
7.3	Ergebnisse MMH_70haupt_S im Detail	103
8	Literaturverzeichnis	107

Nomenklatur

Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen	Bedeutung
A	Auszahlung
AF	Annuitätenfaktor
Ann	Annuität
d_{iso}	Dämmstoffstärke
$\Delta\text{Miete}_{\text{Kalt}}$	Veränderung der Kaltmiete
$\Delta\text{Miete}_{\text{Warm}}$	Veränderung der Warmmiete
E	Energiebedarf
EF	Emissionsfaktor
F	Fläche
I	Investition
I_0	Anfangsinvestition
inv	spezifische Investition
K	Kosten
k	Spezifische Kosten
Kap	Kapazität
KW	Kapitalwert
Life	Lebensdauer
m	Menge
p	Preissteigerungsrate
$p_{\text{äqu}}$	Aquivalenter Energiepreis
Q	Wärmemenge
r	Zinssatz
r^*	Interner Zinsfuß
RW	Restwert
Spez	spezifisch
T	Betrachtungszeitraum
t^*	Amortisationszeit
U_{Modern}	Modernisierungsumlagefaktor
w	Wartungsrate

Indizes	Bedeutung
Äq	äquivalent
Bst	Bestandszustand
E	Energie
Ers	Ersatz
el	elektrisch
gas	Erdgas
Ges	gesamt
h	Systemkomponente
i	System
j	Sanierungsmaßnahme
k	Sanierungsstufe
l	Gebäude
m	Bauteil
MiKe	Mehrinvestition und Kosteneinsparung
ref	Referenzsystem
San	Sanierungsmaßnahme
Sys	System
t	Jahr
Tech	Wärmebereitstellungssystem
Tat	tatsächlich
W	Wartung

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
A100m	Monoenergetisches Außenluft-WP-System mit elektrischem Heizstab, WP ausgelegt auf einen Bivalenzpunkt von -5 °C
A60b	Bivalentes Außenluft-WP-System mit Gasbrennwertkessel, WP ausgelegt auf 60 % der Leistung bezogen auf einen Bivalenzpunkt von -5 °C
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAP	Baualtersperiode
BAU	Business as usual
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BKI	Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BW	Gasbrennwertkessel
CO ₂	Kohlenstoffdioxid

Abkürzung	Bedeutung
E100m	Monoenergetisches Erdsonden-WP-System mit elektrischem Heizstab, WP ausgelegt auf einen Bivalenzpunkt von -5 °C
E60b	Bivalentes Erdsonden-WP-System mit Gasbrennwertkessel, WP ausgelegt auf 60 % der Leistung bezogen auf einen Bivalenzpunkt von -5 °C
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EMK	Energiebedingte Mehrkosten
EnEV	Energieeinsparverordnung
EZB	Europäische Zentralbank
EVPG	Gesetz über die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte
EWI	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GMH	großes Mehrfamilienhaus – 32 Wohneinheiten
IWU	Institut Wohnen und Umwelt GmbH
IINAS	Internationales Insitut für Nachhaltigkeitsstrategien und -analysen
iSFP	individueller Sanierungsfahrplan
JAZ	Jahresarbeitszahl
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KMH	kleines Mehrfamilienhaus – 4 Wohneinheiten
KW _{Mike}	Kapitalwert der energiebedingten Mehrinvestition
kW _{th}	Thermische Leistung in Kilowatt
LowEx	Niedrig-Exergie
LowEx-Bestand	LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden (Projektname)
LiB	LowEx im Bestand
MFH	Mehrfamilienhaus
MMH	mittleres Mehrfamilienhaus – 9 Wohneinheiten
RH	Raumheizung
SP	Sanierungspaket (System + Sanierungsmaßnahme)
SK	Sowiesokosten
SQ KA-Durlach	Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach
TABULA	Typology Approach for Building Stock Energy Assessment
t _{co2}	Tonne CO ₂ -Äquivalent
TW	Trinkwasser
U- Wert	Wärmedurchgangkoeffizient von Bauteilen
UBA	Umweltbundesamt
VK	Vollkosten
WE	Wohneinheiten
WP	Wärmepumpe

1 Einleitung

1.1 Fragestellung

Die wesentlichen Hebel zur Reduktion von CO₂-Emissionen¹ bei der Bereitstellung von Wärme für Bestandsgebäude sind die Reduktion des Wärmebedarfs durch energetische Sanierungsmaßnahmen und eine energieeffiziente, möglichst regenerative Wärmebereitstellung. Die passende Kombination aus geeigneten Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle und aus ebenfalls CO₂-sparenden Wärmebereitstellungstechnologien ist ausschlaggebend für ein ökonomisch und ökologisch optimales Sanierungspaket. Ziel dieser Studie ist es, anhand im Projekt LowEx-Bestand identifizierter häufiger Sanierungsfälle beide Seiten gemeinsam zu betrachten.

Folgende Fragen stehen im Kern der Studie:

1. Welche Sanierungspakete (SP), die gleichzeitig Maßnahmen an Gebäudehülle und Wärmebereitstellungstechnologie umfassen, sind als am wirtschaftlichsten zu bewerten?
2. Welche CO₂-Emissionsreduktion kann durch die untersuchten Sanierungsmaßnahmen für die betrachteten Beispielgebäude erreicht werden?
3. Wie beeinflusst der Wechsel der Akteursperspektive (Vermieter- und Mietersicht) die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von SP?
4. Welche ökonomischen Parameter haben den größten Einfluss auf das Ergebnis des Wirtschaftlichkeitsvergleichs der möglichen Investitionsentscheidungen?

1.2 Vorgehensweise der techno-ökonomischen und ökologischen Analyse

Um ökonomisch, ökologisch und technisch sinnvolle Sanierungspakete definieren und anschließend bewerten zu können, werden zuerst Sanierungsmaßnahmen zur Reduktion des Wärmebedarfs (Kapitel 3.1) wie auch der Wechsel hin zu einer energieeffizienten Wärmebereitstellung durch sogenannte LowEx-Systeme (Kapitel 3.2) getrennt voneinander analysiert. Die folgende Hauptanalyse baut auf den Ergebnissen dieser Vorstudie auf und analysiert die optimale Kombination verschiedener Maßnahmen, sogenannte Sanierungspakete.

Die techno-ökonomische Analyse der Sanierungspakete wird in drei Teile unterteilt:

1. Techno-ökonomische Bewertung von LowEx-Systemen und Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle (siehe Kapitel 3).
2. Techno-ökonomische Bewertung der Sanierungspakete (siehe Kapitel 4)
 - a. Ökologische Bewertung: Welche Reduktion der CO₂ Emissionen kann gegenüber dem Ausgangszustand über den Betrachtungszeitraum erreicht werden?
 - b. Ökonomische Bewertung: Anfangsinvestition, Energiekosteneinsparungen, Kapitalwert der energiebedingten Mehrinvestition, Amortisationszeit und interner Zinsfuß
3. Akteursperspektive und Sensitivitätsanalyse (siehe Kapitel 5)
 - a. Warmmietveränderung
 - b. Sensitivitätsanalysen hinsichtlich Energiepreis- und Investitionsannahmen
 - c. Auswirkungen von Förderungsmaßnahmen und Vollkostenrechnung

Basis für diese vergleichenden Untersuchungen ist eine Primärquellen-Recherche der Investitionskosten von Gebäudehüll-, sowie Wärmebereitstellungssystem-Komponenten. Zusätzlich wurde auch eine Literaturrecherche von konsistenten möglichen zeitlichen Entwicklungspfaden der Energiebezugskosten von Netzstrom und Gas vom Jahr 2020 bis ins Jahr 2045 durchgeführt sowie der möglichen Entwicklungspfade der spezifischen CO₂-Emissionen dieser Energieträger im selben Zeitraum (vgl. Anhang 7.1). Grundlage der Energie-Bezüge und Verbräuche der Referenzgebäude in

¹ In diesem Bericht wird CO₂ synonym für CO₂-äquivalent verwendet.

ihren verschiedenen Sanierungszuständen sind die im Projekt LowEx-Bestand durchgeführten energetischen Simulationen, deren Ergebnisse in Anhang 0 dokumentiert sind.

1.3 Untersuchungsgegenstand

Die Ausgangslage dieser Studie ist, dass in einem un- oder teilsanierten Bestands-Mehrfamilienhaus im Jahr 2020 die Wärmebereitstellungstechnologie ausgetauscht werden muss. Es besteht in diesem Fall die Möglichkeit durch den Austausch der alten Technologie mit einer neuen Technologie (einem Gas-Brennwertkessel oder LowEx-System) durch eine höhere Effizienz Energie einzusparen und CO₂-Emissionen im Vergleich zur Ausgangslage zu senken. Gleichzeitig besteht aber auch die Möglichkeit, Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle durchzuführen und den Wärmebedarf im Gebäude zu senken. Hierdurch kann auch die neue Wärmebereitstellungstechnologie kleiner ausgelegt und so können Investitionen eingespart werden. Es gilt verschiedene Kombinationen aus Sanierungsmaßnahme an der Gebäudehülle und Austausch der Wärmebereitstellungstechnologie für häufige und relevante Fälle wirtschaftlich und ökologisch zu bewerten.

Im Folgenden werden die untersuchten Gebäude und deren Eigenschaften sowie die betrachteten LowEx-Systeme näher beschrieben. Auf die Definition der Bestandstechnologie wird in Abschnitt 0 näher eingegangen.

1.3.1 Referenzgebäude, Sanierungsgrade und Sanierungs-Szenarien

Für diese Studie wurden Mehrfamilienhäuser (MFH) der Baualtersperioden (BAP) 1958-78 sowie 1979-94 ausgewählt, weil in diesen Zeiträumen in Deutschland viele MFH errichtet wurden und hier auch der höchste Sanierungsbedarf erwartet wird (vgl. Ebert 2019,).

Die Referenzgebäude, Sanierungsgrade und Sanierungs-Szenarien sind in einem gesonderten Projektbericht dokumentiert (Vollmer et al. 2021). Die untersuchten Gebäude und die entsprechenden Abkürzungen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Während für die Voruntersuchung (siehe Kapitel 3) die BAP 1958-78 und 1979-94 sowie drei Gebäudegrößen – kleine Mehrfamilienhäuser (KMH), mittlere Mehrfamilienhäuser (MMH) und große Mehrfamilienhäuser (GMH) betrachtet wurden, konzentriert sich die Hauptanalyse in Kapitel 4 und 5 aufgrund der Komplexität unterschiedlicher Sanierungspakete auf nur ein Beispielgebäude, das MMH 1958-78. Das MMH umfasst 12 Wohneinheiten (WE) mit 1,67 Pers./WE und eine beheizte Fläche von 908 m².

Es wird zwischen drei Sanierungsgraden unterschieden. Sanierungsgrad B1 stellt den Erbauungszustand dar, bei dem alle Bauteile außer den Fenstern noch nicht verändert worden sind. Sanierungsgrad S ist als Standardsanierung definiert, welche sich an den Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) orientiert. Sanierungsgrad P repräsentiert eine ambitionierte Sanierung aller Bauteile auf U-Werte entsprechend dem Passivhausstandard (jedoch ohne Wärmerückgewinnung in der Lüftung). Die Hauptanalyse konzentriert sich auf den Sanierungsgrad S.

Detaillierte Angaben zu den einzelnen Gebäuden, wie Maße und U-Werte, sowie die verwendeten Werte, welche den Wärmebedarf zur Bereitstellung der Raumwärme und des Trinkwarmwassers beschreiben, sind den Tabellen im Anhang Kapitel 7.2 zu entnehmen.

Tabelle 1: Kennzahlen der untersuchten Referenzgebäude

	Kleines Mehrfamilienhaus	Mittelgroßes Mehrfamilienhaus	Großes Mehrfamilienhaus
Bezeichnung	KMH	MMH	GMH
Wohneinheiten [WE]	4	12	30
Bewohnerzahl [Pers./WE]	1,75	1,67	1,7
Beheizte Fläche [m²]	302	908	2270
Spez. TWW Bedarf [kWh/(m²a)]	11,8	11,5	11,8
spez. jährlicher Heizenergiebedarf [kWh/(m²a)]	B1: 194 S: 74 P: 55	B1: 148 S: 61 P: 46	B1: 121 S: 53 P: 40
BAP 1958-78			
BAP 1979-94	E: 176 S: 66 P: 46	E: 149 S: 56 P: 40	E: 135 S: 50 P: 41

1.3.2 LowEx-Systeme und Referenzsystem

Für die techno-ökonomische Analyse wurden sechs LowEx-Systemkonzepte mit Wärmepumpen bestimmt. Zusätzlich wurde ein Brennwertkesselsystem, System BW, definiert, mit welchem die LowEx-Systeme verglichen werden. Die Komponenten der untersuchten Systemkonzepte sind in Tabelle 2 übersichtlich dargestellt.

Die untersuchten Systeme werden nach Wärmequelle der Wärmepumpe (Luft oder Erdreich) sowie – unter Berücksichtigung der Wärmebereitstellungstechnologie zur Spitzenlastdeckung – nach bivalentem und monoenergetischem Betrieb unterschieden. Bivalent beschreibt einen Betrieb, in welchem zwei Wärmeerzeugungstechnologien mit unterschiedlichen Energieträgern verwendet werden. Im monoenergetischen Betrieb wird von jeder verwendeten Wärmeerzeugungstechnologie der gleiche Primärenergieträger eingesetzt. Die Systeme werden in der Basisauslegung (100 %) für einen Bivalenzpunkt von -5 °C ausgelegt. Der Bivalenzpunkt beschreibt die Außentemperatur, ab welcher die Wärme nur durch die Wärmepumpe bereitgestellt wird. Unter diesem Punkt wird die Spitzenlasttechnologie hinzugeschaltet (bivalent-paralleler Betrieb). Die bivalenten Systeme werden in abgestufter Dimensionierung von 100 % bis 20 % bezogen auf den Bivalenzpunkt von -5 °C betrachtet.

Das BW-System verfügt über eine konventionelle Wärmebereitstellungstechnologie, in diesem Fall einen Gasbrennwertkessel, und einen Warmwasserspeicher. Bei den LowEx-Systemen deckt eine Wärmepumpe die Wärmegrundlast der Gebäude. Als niederenergetische Wärmequelle steht entweder die Außenluft über eine Luft-Wasser-Wärmepumpe, Systembezeichnung A, oder Wärme aus dem Erdreich über eine Erdsonde und eine Sole-Wasser-Wärmepumpe, Systembezeichnung E, zur Verfügung. Die Spitzenwärmelast wird entweder monoenergetisch (m) über einen elektrischen Heizstab, beispielsweise die Systeme A100m und E100m, oder bivalent (b) über einen Gasbrennwertkessel, beispielsweise die Systeme A60b und E60b, bereitgestellt. Die Zahlen in der Kodierung beziehen sich auf die Prozentzahl der Dimensionierung bezogen auf den Bivalenzpunkt von -5 °C. Alle Systeme verfügen jeweils über einen Warmwasserspeicher und einen Heizungspufferspeicher.

Die technologische Ausgestaltung und Dimensionierung der System-Komponenten wird in (Hess et al. 2021) beschrieben. Sie ist im Anhang tabellarisch dargestellt (Kapitel 7.2).

Tabelle 2: Definition der untersuchten Systemkonzepte und ihrer Komponenten

Komponenten		Referenz	Außenluftsysteme		Erdsondensysteme	
		Brennwert	mono-energetisch	bivalent	mono-energetisch	bivalent
		<i>BW</i>	<i>Am</i>	<i>Ab</i>	<i>Em</i>	<i>Eb</i>
Wärmequelle	Außenluft	-	X	X	-	-
	Erdsonde	-	-	-	X	X
Wärmeerzeuger	Luft-Wasser-Wärmepumpe	-	X	X	-	-
	Sole-Wasser-Wärmepumpe	-	-	-	X	X
	Gasbrennwertkessel	X	-	-	-	-
Spitzenlast	Gasbrennwertkessel	-	-	X	-	X
	Heizstab, elektrisch	-	X	-	X	-
Speicher	Trinkwarmwasserspeicher	X	X	X	X	X
	Heizungspufferspeicher	-	X	X	X	X

1.3.3 Sanierungsmaßnahmen

Unter Sanierungsmaßnahmen werden in diesem Bericht sowohl Einzelmaßnahmen als auch Maßnahmenkombinationen an der Gebäudehülle, sogenannte Sanierungspakete (SP) verstanden, die den Wärmebedarf von MFH verringern. Die Einzelsanierungen können an den folgenden Komponenten der Gebäudehülle durchgeführt werden: Fenster (f), Wand (w), oberste Geschossdecke (de), Dach (da) und unterster Geschossboden (b). Ein Sanierungspaket beschreibt den Sanierungszustand der einzelnen Hüllkomponenten, die sich jeweils im Erbauungszustand (E), im Bestandszustand (B), in einer Standardsanierung nach TABULA (basierend auf GEG) (S) oder in einer ambitionierten Sanierung mit U-Werten vergleichbar zum Passivhaus-Standard (P) befinden können. Die Codierung der Sanierungspakete gibt Aufschluss über den Zustand der Hüllkomponenten. fS.wS.deE.daS.bE bedeutet beispielsweise, dass Fenster, Wand und Dach nach GEG saniert sind (S) und Decke und Boden im Erbauungszustand verbleiben (E). Die Sanierungspakete in Tabelle 3 sind von besonderem Interesse.

Tabelle 3: Sanierungsmaßnahmen der beiden untersuchten BAPs

BAP	Codierung SP 1	Codierung SP 2	Abbildung*	Beschreibung
1958-78	fB.wE.deE.daE.bE	B1		Unsanierter Zustand, Austausch von Fenstern wegen überschrittener Nutzungsdauer
	fB.wB.deB.daE.bB	B		Energetische Sanierung in der Vergangenheit
	fS.wS.deE.daS.bS	S		Komplettsanierung nach GEG mit B1 als Ausgangssituation
	fS.wS.deB.daS.bS	S6		Komplettsanierung nach GEG mit B als Ausgangssituation
	fP.wP.deE.daP.bP	P		Komplettsanierung nach Passivhausstandard mit B1 als Ausgangssituation
	fP.wP.deB.daP.bP	P1		Komplettsanierung nach Passivhausstandard mit B als Ausgangssituation
1979-94	fE.wE.deE.daE.bE	E		Erbauungszustand
	fS.wS.deS.daE.bS	S		Komplettsanierung nach GEG, Dach nicht erneuert wegen intakter Dacheindeckung
	fP.wP.deP.daE.bP	P		Komplettsanierung nach Passivhausstandard
* E (Bauzustand): schwarz, B (aktueller Zustand): orange, S (GEG-Sanierung): grün, P (Sanierung auf U-Werte vergleichbar mit Passivhausstandard): blau				

2 Methodik und Datenbasis

2.1 Ökonomische und ökologische Kennwerte

Um die Wirtschaftlichkeit der energetischen Sanierungspakete bewerten zu können, sollen zunächst Kennwerte definiert werden, die sowohl die Aufwendungen als auch die Erlöse berücksichtigen. Hierfür werden unterschiedliche Verfahren der Wirtschaftlichkeitsrechnung verwendet, wie der Kapitalwert, die Amortisationszeit und der interne Zinsfuß. Die Sanierungspakete werden mit dem Zustand im Bestand und einer Referenztechnologie verglichen. Die Berechnungen der Kennwerte sind orientiert an Lützkendorf (2017, S. 10).

Neben der Anfangsinvestition entfallen bei einer energetischen Sanierung erhebliche Einnahmen und Ausgaben auf die Nutzungsphase. Daher werden bei der techno-ökonomischen Bewertung auch die Gesamtkosten über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren berechnet, welche die Energie-, Betriebs- und Instandhaltungskosten beinhalten. Der Nutzen einer Investition unterscheidet sich je nach Akteursperspektive sehr stark und dessen Berechnung kann sehr komplex ausfallen (vgl. Rehkugel et al. (2016) und Lützkendorf (2017)). Für die Hauptanalyse sollen die „Einnahmen“ aus der Investition anhand der Energiekosteneinsparungen gegenüber dem Referenzzustand (Brennwertkessel, unsanierter Zustand der Gebäudehülle) dargestellt werden, da dies für alle Interessensgruppen einen Nutzen darstellt.

Im Folgenden werden die ökonomischen Kennwerte näher erläutert.

2.1.1 Anfangsinvestition

Wie aus dem Zwischenbericht zu AP 1.2 und AP 1.4 (Schnaidt 2020) und den Arbeiten von Naber und Lützkendorf (2017, S. 23) hervorgeht, ist die Finanzierbarkeit der Erneuerungsmaßnahmen ausschlaggebend für die Investitionsentscheidung. Dies ist vor allem für Einzelhausbesitzer oder kleinere Wohnungsbaugesellschaften entscheidend. Daher ist ein Vergleich der Anfangsinvestitionen ein wichtiger ökonomischer Kennwert der Analyse.

Um die Investitionen der einzelnen Sanierungspakete (I_0) zu bestimmen, gilt es, die Höhe der Investition in das Wärmebereitstellungssystem (I_{Tech}) und in die Sanierungsmaßnahme an der Gebäudehülle (I_{San}) zu berechnen, siehe Gleichung (1).

Wie in Gleichung (2) dargestellt setzt sich die Anfangsinvestition des Wärmebereitstellungssystems (I_{Tech}) aus den Auszahlungen (A_h) für die einzelnen Systemkomponenten (h) zusammen, welche wiederum mit unterschiedlichen Kapazitäten (Kap_h) installiert werden. A_h ist das Produkt aus der spezifischen Investition (inv_h) und der fallspezifischen Kapazität (Kap_h). Im Falle einer Wärmepumpe berechnet sich so z.B. die Anfangsinvestition I_{WP} aus den spezifischen Investitionskosten in €/kW_{th} multipliziert mit der thermischen Leistung der Wärmepumpe.

Die Höhe der Anfangsinvestition der Sanierungsmaßnahme (I_{San}) wird in Gleichung (3) bestimmt. Zur Bestimmung der Höhe der Investition wird die spezifische Bauteilinvestition ($inv_{k,l,m}$) für die Sanierungsstufe k am Gebäude l des jeweiligen Bauteils m mit der betroffenen Bauteilfläche ($F_{l,m}$) multipliziert.

Die spezifische Investition für Systemkomponenten und Sanierungsmaßnahmen ergibt sich aus den Kostenkurven, die in Anhang 7.1 näher beschrieben sind.

$$I_{0,i,j,k,l} = I_{Tech,i,j,k,l} + I_{San,j,k,l} \quad (1)$$

$$I_{Tech,i,j,k,l} = \sum_h A_{h,i,j,k,l} = \sum_h inv_h \cdot Kap_{h,i,j,k,l} \quad (2)$$

$$I_{San,j,k,l} = \sum_m inv_{k,l,m} \cdot F_{l,m} \quad (3)$$

2.1.2 Äquivalenter Energiepreis

Um die Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle wie auch unterschiedliche Gebäudeparameter miteinander zu vergleichen, wird der äquivalente Energiepreis verwendet. Dieser gibt an, wieviel Euro investiert werden müssten, um 1 kWh Wärme einzusparen. Der äquivalente Energiepreis kann dann individuellen Wärmegestehungskosten gegenübergestellt werden. Hierdurch kann bewertet werden, ob es wirtschaftlicher ist die Sanierung durchzuführen oder weiterhin zu den individuellen Wärmegestehungskosten zu heizen. Der äquivalente Energiepreis wird nicht als Bewertungsgröße für Kombinationen von Technologie- und Gebäudehüllensanierung herangezogen, da bei wechselnden Energieträgern eine Bewertung über den äquivalenten Energiepreis nicht möglich ist.

Für die Bestimmung des äquivalenten Energiepreises ($p_{\text{äqu}}$) wird die Annuität der Investition in die Sanierung (Ann) mit der jährlichen Wärmeinsparung (ΔQ) ins Verhältnis gesetzt, siehe Gleichung (4).

Ann ist abhängig von der Höhe des Kapitalwertes für die Hüllsanierung (KW) und dem Annuitätenfaktor (AF), welcher sich aus dem angenommenen Zinssatz (r) und der betrachteten Laufzeit (T) zusammensetzt, siehe Gleichung (5). Auf die Berechnung des Kapitalwertes wird in Kapitel 2.1.3 näher eingegangen.

Für die Berechnung der durch die Sanierungsmaßnahme jährlich eingesparten Menge an Wärme (ΔQ) wird von der Wärmemenge im unsanierten Bestandszustand (Q_{Bst}) der einzelnen Gebäude (l) die benötigte Wärmemenge (Q) nach der Durchführung der Sanierungsmaßnahme (j) mit Sanierungsstufe (k) abgezogen, siehe Gleichung (6).

$$p_{\text{äqu}} = \frac{Ann_{j,k,l}}{\Delta Q_{j,k,l}} \quad (4)$$

$$Ann_{j,k,l} = KW_{j,k,l} \cdot AF = KW_{j,k,l} \cdot \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} \quad (5)$$

$$\Delta Q_{j,k,l} = Q_{0,l} - Q_{j,k,l} \quad (6)$$

2.1.3 Kapitalwertmethode

Neben der Anfangsinvestition fallen weitere Auszahlungen während der Nutzungsphase an. Um den Zeitwert des Geldes beim Anfallen von Zahlungsströmen zu berücksichtigen, wird der Kapitalwert gebildet. Hierdurch können die Sanierungspakete anhand der über den gesamten Betrachtungszeitraum anfallenden Auszahlungen verglichen werden.

In Gleichung (7) ist die Berechnung des Kapitalwertes der einzelnen Systeme (KW in €) zum Anfangszeitpunkt 0 für die unterschiedlichen Sanierungspakete dargestellt. Der Kapitalwert umfasst die Anfangsinvestition der Wärmebereitstellungstechnologie und der Sanierungsmaßnahme, ggf. notwendige Ersatzbeschaffungen (A_{Ers} in €) innerhalb des Betrachtungszeitraums, die diskontierten Auszahlungen für die Wartung (A_W in €) und die diskontierten Auszahlungen für den Energiebezug (A_E in €), zuzüglich der Einzahlung des Restwerts (RW in €), falls das Wärmebereitstellungssystem oder das Bauteil nach dem Ende des Betrachtungszeitraums noch funktionstüchtig ist. Ausgaben für Ersatzbeschaffung, Wartung und Restwert sind in den folgenden Gleichungen (8) - (11) definiert.

Die Ausgaben für nötige Ersatzbeschaffungen, für Bauteile deren Lebensdauer innerhalb des Betrachtungszeitraums endet, werden in Gleichung (8) bestimmt. Die anfallenden Kosten werden auf den Beginn des Betrachtungszeitraums diskontiert unter Berücksichtigung der Inflation.

Die gesamten Auszahlungen für Wartung (A_W) werden über die Summe der diskontierten jährlichen Wartungskosten¹ berechnet, siehe Gleichung (9). Der Faktor r beschreibt die jährliche Diskontrate, der Faktor p die jährliche Preisänderungsrate. T beschreibt den Betrachtungszeitraum in Jahren t . Die jährlichen Wartungskosten (K_W) berechnen sich über die Summe der komponentenspezifischen Wartungsraten (w_h), multipliziert mit der Investition für die einzelnen Systemkomponenten beziehungsweise Bauteile, siehe Gleichung (10).

Der diskontierte Restwert ($RW_{i,j}$) eines Systems i wird in Gleichung (11) bestimmt. Er setzt sich aus dem Restwert der einzelnen Systemkomponenten h zusammen. Es wird angenommen, dass der Restwert bei allen Komponenten über den Betrachtungszeitraum T linear abnimmt und zum Ende der Lebensdauer ($Lif_{e_{i,j}}$) den Wert 0 erreicht.

Die gesamten Auszahlungen für den Energiebezug pro Sanierungspaket ($A_{E,i,j}$ in €) ergeben sich aus der Summe der diskontierten jährlichen Energiekosten ($K_{E,t,i,j}$), siehe Gleichung (12).

Gleichung (13) beschreibt die jährlichen Energiekosten für das Jahr t pro Kombination aus System- und Hüllsanierung ($K_{E,t}$ in €). Die bedarfsgebundenen Kosten² stellen die Auszahlungen dar, welche durch den jährlichen Strom- und Gasverbrauch entstehen. Diese setzen sich aus einem Anteil für elektrische Energie und einem Anteil für Energie aus Erdgas zusammen. Die Kosten für elektrische Energie berechnen sich aus dem jährlichen elektrischen Energiebedarf für die Wärmepumpe ($E_{el,WP}$ in kWh) multipliziert mit den spezifischen Kosten für elektrische Energie für Wärmepumpen - ($c_{el,WP,t}$ in €/kWh) im Jahr t . In Anlehnung daran berechnet sich der Gaskostenanteil aus dem Energiebedarf an Erdgas (E_{gas} in kWh) multipliziert mit den spezifischen Kosten für Erdgas in Jahr t ($c_{gas,t}$ in €/kWh). Um den zeitabhängigen Wert des Geldes zu berücksichtigen, ist es wichtig, zukünftige Auszahlungen für den Energiebezug auf einen Anfangszeitpunkt zu diskontieren.

$$KW_{i,j,k,l} = -I_{0,i,j,k,l} - A_{Ers,i,j,k,l} - A_{W,i,j,k,l} - A_{E,i,j,k,l} + RW_{i,j,k,l} \quad (7)$$

$$A_{Ers,i,j,k,l} = I_{0,i,j,k,l} \cdot \frac{p^{Lif_{e_h}}}{r^{Lif_{e_h}}} \quad (8)$$

$$A_{W,i,j,k,l} = \sum_{t=1}^T K_{W,i} \cdot \frac{(1+p)^t}{(1+r)^t} \quad (9)$$

$$K_{W,i,j,k,l} = \sum_h w_h \cdot inv_h \cdot Kap_{h,i,j,k,l} \quad (10)$$

$$RW_{i,j,k,l} = \sum_h \frac{(1+p)^T}{(1+r)^T} \cdot \left(1 - \frac{T}{Lif_{e_h}}\right) \cdot inv_h \cdot Kap_{h,i,j,k,l} + \sum_m \frac{(1+p)^T}{(1+r)^T} \cdot \left(1 - \frac{T}{Lif_{e_m}}\right) \cdot inv_{k,l,m} \cdot F_{l,m} \quad (11)$$

$$A_{E,i,j,k,l} = \sum_{t=1}^T \left(\frac{(1+p)^t}{(1+r)^t} \cdot K_{E,t,i,j,k,l} \right), \forall j \in J \quad (12)$$

$$K_{E,t,i,j,k,l} = E_{el,WP,i,j,k,l} \cdot k_{el,WP,t} + E_{gas,i,j,k,l} \cdot k_{gas,t} \quad (13)$$

¹ Schuster und Rüdts von Collenberg (2017, S. 30) zählt bei der Kapitalwertberechnung die Materialkosten und Instandhaltungskosten zu den laufenden Auszahlungen.

² Obwohl der Kapitalwert oft Ein- und Auszahlung bewertet, wird aus Gründen der Lesbarkeit im Rahmen dieser Studie teilweise auf den Kostenbegriff zurückgegriffen.

2.1.4 Kapitalwert der energiebedingten Mehrauszahlungen

Um die Wirtschaftlichkeit der LowEx-Systeme zu vergleichen, wird der Kapitalwert der energiebedingten Mehrauszahlungen und der energiebedingten Einzahlungen beurteilt. Die Mehrauszahlungen und die Einzahlungen werden gegenüber dem Bestandszustand als Referenz (unsaniertes Gebäude, Gaskessel) bestimmt. Im Weiteren wird dies als der Kapitalwert der energetischen „Mehrinvestition und Kosteneinsparung (MiKe)“ bezeichnet und mit KW_{MiKe} in € angegeben.

Die Berechnung von KW_{MiKe} ist in Gleichung (14) dargestellt. Sie beschreibt die Differenz zwischen dem Kapitalwert der Kombination von Hüll- und Systemsanierung und dem Referenzzustand.

Die Auszahlungen beziehen sich auf die energiebedingten Mehrauszahlungen, also die Mehrinvestition (ΔI_0 in €, siehe Gleichung (15)), die Differenz der Ausgaben für Ersatzbeschaffungen (ΔA_{Ers} in €, siehe Gleichung (16)) und die Differenz der Wartungszahlungen (ΔA_W in €, siehe Gleichung (17)). Die Einzahlungen stellen die vermiedenen Auszahlungen für den Energiebezug (ΔA_E in €, siehe Gleichung (18)) dar sowie die Differenz des Restwerts (ΔRW in €, siehe Gleichung (19)). Es gilt noch einmal darauf hinzuweisen, dass diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sich je nach Akteursperspektive ändern würde, weil für verschiedene Akteure unterschiedliche Ein- und Auszahlungen entstehen. Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf die energetischen Mehrauszahlungen und vermiedenen Energieauszahlungen, weil diese Werte mit vertretbaren Annahmen eine Aussage zulassen, welche von regionalen und sozialen Rahmenbedingungen unabhängig ist.

$$KW_{MiKe,i,j,k,l} = KW_{i,j,k,l} - KW_{ref,j,k,l} = -\Delta I_{0,i,j,k,l} - A_{Ers,i,j,k,l} - \Delta A_{W,i,j,k,l} + \Delta A_{E,i,j,k,l} + \Delta RW_{i,j,k,l} \quad (14)$$

$$\Delta I_{0,i,j,k,l} = I_{Tech,i,j,k,l} - I_{Tech,ref,j,k,l} + \Delta I_{San,j,k,l} \quad (15)$$

$$\Delta A_{Ers,i,j,k,l} = A_{Ers,i,j,k,l} - A_{Ers,ref,j,k,l} \quad (16)$$

$$\Delta A_{W,i,j,k,l} = A_{W,i,j,k,l} - A_{W,ref,j,k,l} \quad (17)$$

$$\Delta A_{E,i,j,k,l} = A_{E,ref,j,k,l} - A_{E,i,j,k,l} \quad (18)$$

$$\Delta RW_{i,j,k,l} = RW_{i,j,k,l} - RW_{ref,j,k,l} \quad (19)$$

Der Kapitalwert erlaubt es somit, die die Kombinationen aus Hüll- und System-Sanierung anhand der erwarteten Mehrauszahlungen und vermiedenen Energieauszahlungen zu vergleichen. Der Kapitalwert gibt wieder, wie viel die verschiedenen Sanierungspakete über den definierten Betrachtungszeitraum zum Zeitpunkt 0 wert sind. Ist der Betrag kleiner als 0, heißt das, dass die Kosteneinsparungen die Mehrauszahlungen nicht überschreiten, die Investition dementsprechend als wirtschaftlich nicht lohnend einzustufen ist. Das Sanierungspaket mit dem höchsten Kapitalwert verspricht den höchsten wirtschaftlichen Erfolg.

2.1.5 Amortisationsmethode

Zur Entscheidungsunterstützung ist es hilfreich neben dem Kapitalwert die Amortisationszeit ($t_{i,j}^*$), welche in Gleichung (20) dargestellt ist, zu berechnen. Die Amortisationszeit bestimmt den Zeitpunkt, ab welchem sich eine Investition selbst refinanziert hat, d.h. den Zeitpunkt, ab dem die Summe aus den jährlichen diskontierten Einzahlungen unter Berücksichtigung der Inflation für die einzelnen Sanierungspakete die Anfangsinvestition ausgleicht, Gleichung (20) (Schuster und Rüdert von Collenberg 2017, S. 119–127). Für diese Studie ist t in Jahren definiert. $t_{i,j}^*$ ist demnach das erste Jahr, ab welchem die Summe der diskontierten Einzahlungen größer oder gleich der Anfangsinvestition ist.

$$\Delta I_{0,i,j,k,l} = \sum_{t=1}^{t_{i,j}^*} (\Delta K_{E,i,j,k,l} - \Delta K_{W,i,j,k,l}) \cdot \frac{(1+p)^t}{(1+r)^t} \quad (20)$$

Je früher sich eine Investition selbst refinanziert hat, desto früher wird Kapital für andere Unternehmungen frei. Da die Amortisationszeit allerdings nur die Zahlungen bis zu dem Zeitpunkt $t_{i,j,k}^*$ berücksichtigt, ist sie als alleiniges Bewertungskriterium nicht ausreichend. Zudem kann diese Methode nur bei positiven Kapitalwerten verwendet werden.

2.1.6 Zinsfußmethode

Als letztes wird der interne Zinsfuß ($r_{i,j}^*$) berechnet, Gleichung (21). Dieser bestimmt den Zinssatz, bei welchem der Kapitalwert den Wert 0 annimmt. Liegt der Wert über dem verwendeten Zinssatz r , bedeutet das, dass die Investition eine höhere Rendite erwarten lässt, als der Kapitalmarkt plus Risikoaufschlag, und somit wirtschaftlich sinnvoll ist.

$$KW_{MiKe,i,j,k,l} = -\Delta I_{0,i,j,k,l} + \sum_{t=1}^T (\Delta K_{E,i,j,k,l} - \Delta K_{W,i,j,k,l}) \frac{(1+p)^t}{(1+r_{i,j,k,l}^*)^t} = 0 \quad (21)$$

Zur Bestimmung von $r_{i,j}^*$ wird die Gleichung nach $r_{i,j}^*$ umgestellt. Die Lösung wird iterativ bestimmt. Wegen der Mehrdeutigkeitsproblematik, wie von Schuster und Rüd von Collenberg (2017, S. 82–84) beschrieben, ist auch der interne Zinsfuß als alleiniges Bewertungskriterium nicht ausreichend.

2.1.7 CO₂-Emissionen

Da die Erreichung der klimapolitischen Ziele essentiell für die techno-ökonomische Bewertung ist, wird die CO₂-Einsparung (Δm_{CO_2}) der System- und Hüllsanierung im Vergleich zum Referenzsystem betrachtet, siehe Gleichung (22). Die ökologischen und ökonomischen Ergebnisse werden mit den CO₂-Vermeidungskosten zusammengeführt.

Die Berechnung der Menge an CO₂-Emissionen (m_{CO_2}) wird in Gleichung (23) dargestellt. Hier wird der Energiebedarf an elektrischer Energie beziehungsweise Gas mit dem entsprechenden Emissionsfaktor ($EF_{el,t}$ beziehungsweise $EF_{gas,t}$) multipliziert.

$$\Delta m_{CO_2,i,j,k,l} = m_{CO_2,ref,j,k,l} - m_{CO_2,i,j,k,l} \quad (22)$$

$$m_{CO_2,i,j,k,l} = \sum_{t=1}^T (E_{el,i,j,k,l} \cdot EF_{el,t} + E_{gas,i,j,k,l} \cdot EF_{gas,t}) \quad (23)$$

2.1.8 Spezifische Kosten für Wärme

Die spezifischen Kosten für Wärme $K_{Wärme,spez}$ ergeben sich aus der Summe von jährlichen Energiebezugskosten (inflationsbereinigt und nicht diskontiert) und der Annuität der kapital- und wartungsbezogenen Kosten bezogen auf die beheizte Wohnfläche F , wie in Gleichung (24) beschrieben. Diese Kostendarstellung ist dazu geeignet die Entwicklung der Heizkosten über den Betrachtungszeitraum darzustellen.

Die Annuität der kapital- und wartungsbezogenen Kosten (System-Annuität A_{sys}) wird analog zu Gleichung (7) berechnet, wobei die verbrauchsbezogene Annuität A_E auf 0 gesetzt wird. Stattdessen werden die Energiebezugskosten K_E analog zu Gleichung (13) für jedes Jahr des Betrachtungszeitraums berechnet.

$$K_{W\ddot{a}rme, spez} = \frac{A_{Sys} + K_E}{F} \quad (24)$$

2.1.9 Akteursperspektive: Mieter und Vermieter

Eine Modernisierungsmaßnahme stellt für die betroffenen Akteure einen unterschiedlichen Mehrwert dar. Der Vermieter kann durch die Durchführung der verschiedenen Hüll- und System-Sanierungskombinationen den Wert seiner Immobilie erhalten oder steigern. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit einen Teil der Investition in die Sanierung direkt auf die jährliche Kaltmiete umzulegen. Für die Mietparteien führen Modernisierungsmaßnahmen im idealen Fall zu einem angenehmeren Wohngefühl. Simultan sinken für die Mieter die Energieausgaben. In dieser Studie wird untersucht, welche Modernisierungsmaßnahmen zumindest warmmietneutral durchgeführt werden können, also durch welche Modernisierungsmaßnahmen die Mieter monetär nicht stärker belastet werden. Hierfür werden die einzelnen Sanierungsmaßnahmen anhand der Veränderung der Warmmiete ($\Delta Miete_{warm}$) bewertet, siehe Gleichung (25). $\Delta Miete_{warm}$ ist die Differenz zwischen der Veränderung der Kaltmiete ($\Delta Miete_{kalt}$) und den vermiedenen Energieausgaben. $\Delta Miete_{kalt}$ bestimmt sich über die gesetzlich festgelegte Modernisierungsumlage (u_{Modern}), welche festlegt, wieviel Prozent der energiebedingten Mehrinvestition jährlich auf die Kaltmiete umgelegt werden können, siehe Gleichung (26). Näheres zur Modernisierungsumlage ist im folgenden Unterabschnitt 2.2 zu finden.

$$\Delta Miete_{warm, i, j} = \Delta Miete_{kalt, i, j} - \Delta A_{E, i, j} \quad (25)$$

$$\Delta Miete_{kalt, i, j} = \sum_{t=1}^T \frac{u_{Modern} \cdot \Delta I_{0, i, j}}{(1+r)^t} \quad (26)$$

2.2 Mietrechtliche Rahmenbedingungen

Um Investitionen in Modernisierungsmaßnahmen im Gebäudesektor anzuregen, wurde gesetzlich die Möglichkeit eingeräumt, einen Teil der energiebedingten Mehrinvestition in Form einer Modernisierungsumlage auf die jährliche Kaltmiete umzulegen. War es zuvor möglich bis zu 11 % der energiebedingten Mehrinvestition jährlich umzulegen, ist seit dem 01.01.2019 ein Prozentsatz von 8 % wirksam (Bundesministerium für Justiz 31.01.2019). Ziel ist es, dass sich die Investition über die Lebensdauer der modernisierten Bauteile und Technologien durch die Modernisierungsumlage für den Vermieter amortisiert. Im besten Fall ist die finanzielle Belastung der Mieter durch die Umlage vertretbar, da die Mieter von der Verringerung ihrer Energieausgaben profitieren, ihre Warmmiete dadurch nicht steigt oder sogar sinkt.

Es gilt des Weiteren, dass die Kaltmiete durch die Modernisierungsumlage sich nicht um mehr als 3 € pro Quadratmeter erhöhen darf. Diese Modernisierungsumlage darf dauerhaft umgelegt werden und läuft nicht nach einem bestimmten Zeitraum aus. Nicht umlagefähig über die Modernisierungsumlage sind finanzielle Förderungen durch die öffentliche Institution der KfW-Bank.

Von einer Modernisierung ist nach §555b BGB die Rede, wenn bauliche Veränderungen vorliegen,

1. „durch die in Bezug auf die Mietsache Endenergie nachhaltig eingespart wird (energetische Modernisierung),
2. durch die nicht erneuerbare Primärenergie nachhaltig eingespart oder das Klima nachhaltig geschützt wird, sofern nicht bereits eine energetische Modernisierung nach Nummer 1 vorliegt,
3. durch die der Wasserverbrauch nachhaltig reduziert wird,
4. durch die der Gebrauchswert der Mietsache nachhaltig erhöht wird,
5. durch die die allgemeinen Wohnverhältnisse auf Dauer verbessert werden,
6. die auf Grund von Umständen durchgeführt werden, die der Vermieter nicht zu vertreten hat, und die keine Erhaltungsmaßnahmen nach § 555a BGB sind, oder
7. durch die neuer Wohnraum geschaffen wird.“ (BGB, §555b, 2018).

Bei der Modernisierungsumlage für die Heiztechnik gilt zu klären, ob die Heiztechnik aufgrund des GEG oder wegen eines Ausfalls ausgetauscht werden muss. Auf Grund des GEG muss eine Anlage ausgetauscht werden, wenn keine Brennwerttechnologie verbaut ist oder die Anlage älter als 30 Jahre ist. Im diesem Fall kann die komplette Investition umgelegt werden, da die Modernisierung aus Umständen zustande kommt, die der Vermieter nicht zu verantworten hat. Im Fall eines Ausfalls kann er nur die energiebedingte Mehrinvestition umlegen.

2.3 Technische Parameter für Auslegung und Betrieb der LowEx-Systeme

In diesem Abschnitt werden die technische Auslegung und Ergebnisse der Verbrauchsberechnung kurz vorgestellt. Hierfür werden exemplarisch die Unterschiede zwischen den Sanierungsmaßnahmen für das E100m im MMH (BAP 1958-78), siehe Tabelle 4, und die Unterschiede zwischen den einzelnen Systemvarianten, siehe Tabelle 5, tabellarisch gegenübergestellt. Alle weiteren Ergebnisse sind im Anhang (Kapitel 7.2) zu finden.

In Tabelle 4 werden beispielhaft die Ergebnisse der technischen Auslegung für das monoenergetische Erdsonden-System in Basisauslegung (E100m) für die Sanierungspakete B1, S und P im MMH sowie deren Energiebedarf tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 4: Technische Auslegung von System E100m (monoenergetisches Erdsonden-WP-System mit elektrischem Heizstab, WP ausgelegt auf einen Bivalenzpunkt von -5 °C) für unterschiedliche Sanierungsstufen im Gebäude MMH, Baualtersklasse 1958-78.

Systemvariante		E100m		
Sanierungsstufen		B1	S	P
Systemauslegung				
Erdsondenlänge	m	1050	579	493
Solewärmepumpe	kW _{th}	49	27	23
elektrischer Heizstab	kW	18	12	10
Warmwasserspeicher	l	830	830	830
Heizungspufferspeicher	l	980	540	460
Energiebedarf				
Elektrische Energie	MWh/a	62,3	28,4	24,4
Gas	MWh/a	0,0	0,0	0,0
Wärmebedarf				
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	143	59,1	44,6
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	10,4	10,4	10,4
Heizkreis				
Normheizlast	kW	63,8	35,8	30,7
Norm Vorlauftemperatur	°C	71,8	52,6	48,9
Norm Rücklauftemperatur	°C	58,0	44,9	42,2

Von dem unsanierten Fall bis zur Vollsanierung nimmt jeweils der Wärmebedarf für die Raumheizung (RH) ab, der Trinkwarmwasserbedarf (TW) bleibt allerdings konstant. Durch den geringeren Wärmebedarf kann das Erdsonden-System entsprechend kleiner ausgelegt werden. Aufgrund des konstanten Trinkwarmwasserbedarfs verändert sich die Größe des Warmwasserspeichers nicht.

In Tabelle 5 sind die unterschiedlichen Systeme für das Gebäude MMH mit einer Vollsanierung auf den Sanierungsgrad S und deren technische Auslegung und technische Parameter aufgelistet.

Tabelle 5: Technische Auslegung sowie Energienachfrage und technische Kennwerte aller Systeme für das MMH, Sanierungsstufe S (Vollsanierung), Baualtersklasse 1958-78.

MMH58_S		Systemvarianten						
Systemkomponente	Einheit	BW	A100m	A100b	A60b	E100m	E100b	E60b
Erdsonde	m ²	-	-	-	-	579	579	343
Wärmepumpe, Außenluft	kW (bei 2/35)	-	35	35	21	-	-	-
Wärmepumpe, Erdsonde	kW (bei 0/35)	-	-	-	-	27	27	16
Gasbrennwertkessel	kW	39	-	19	27	-	17	23
Elektrischer Heizstab	kW	-	19	-	-	12	-	-
Warmwasserspeicher	l	830	830	830	830	830	830	830
Heizungspufferspeicher	l	-	700	700	420	540	540	320
Endenergiebezug								
Elektrische Energie	MWh/a	-	32,2	20,5	18,1	28,4	17,4	15,0
Gas	MWh/a	87,7	-	13,1	19,6	-	12,3	21,1
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	59,1	59,1	59,1	59,1	59,1	59,1	59,1
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4
Technische Parameter								
Anteil der WP an Raumwärme	%	-	98,4	98,4	90,8	99,5	99,5	89,5
Anteil der WP an Trinkwasser	%	-	49,3	49,3	43,1	49,5	49,5	40,3
JAZ _{WP,H}	-	-	3,60	3,60	3,71	4,39	4,39	4,50
JAZ _{WP,TW}	-	-	2,37	2,37	2,42	2,55	2,55	2,58
JAZ _{WP,ges}	-	-	3,35	3,35	3,46	3,97	3,97	4,10

2.4 Ökonomische und ökologische Parameter

In diesem Abschnitt sind die für die techno-ökonomische Bewertung verwendeten Daten zusammengefasst. Herleitung und Quellen der Daten sind im Anhang (Kapitel 7.1) zu finden.

Die Gesamtkosten der Investition werden aufgeteilt in energiebedingte Mehrkosten (EMK) und Sowieso-Kosten (SK). Letztere fallen in jedem Fall an und haben nichts mit der energetischen Hülle oder der Anlagennachrüstung zu tun, während die EMK ausschließlich durch Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen entstehen.

Die Kostenkurven und die Aufteilung der Investitionskosten auf ohnehin anfallende Kosten (SK) und energiebedingte Mehrkosten (EMK) werden in den folgenden Kapiteln dargestellt. Die techno-ökonomische Bewertung bezieht sich nur auf die Vollkosten (VK), die sich aus EMK und SK zusammensetzen.

2.4.1 Kosten der Systemkomponenten

Die resultierenden Kostenkurven für die Sanierung verschiedener Komponenten des Wärmeversorgungssystems sind in Tabelle 6 und in Abbildung 1 bis Abbildung 5 dargestellt (vgl. Kostenkurven für "LiB-Ergebnis"). Details zu Datenquellen und Methodik finden sich in Anhang 7.1. Die Kostenkurven sind auf das erste Quartal des Jahres 2020 bezogen und die Preise sind als Bruttowerte angegeben, d. h. inklusive 19 % Mehrwertsteuer.

Tabelle 6: Verwendete Kostenkurven der Systemkomponenten für die techno-ökonomische Bewertung (x steht für die Leistung der Systemkomponente in kW bzw. die Größe des Wärmespeichers in l).

Kostenkurve "LiB-Ergebnis"	Systemkomponente
$K_{spez} = 1045.6 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot x^{-0.42}$	Gas-Brennwertkessel
$K_{spez} = 141.99 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot x^{-0.755}$	Elektrischer Heizstab
$K_{spez} = 619.79 \frac{\text{€}}{\text{l}} \cdot x^{-0.804}$	Wärmespeicher
$K_{spez} = 5670.1 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot x^{-0.537}$	Luftwärmepumpe
$K_{spez} = 2637.1 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot x^{-0.10}$	Solewärmepumpe (inklusive Sonde)
$K_{spez} = 3693.3 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot x^{-0.58}$	Solewärmepumpe (ohne Sonde)
$K_{spez,Sonde} = 79.14 \frac{\text{€}}{\text{m}}$ $K_{spez,Sonde} = 1695.9 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$	Solewärmepumpe – nur Sonde

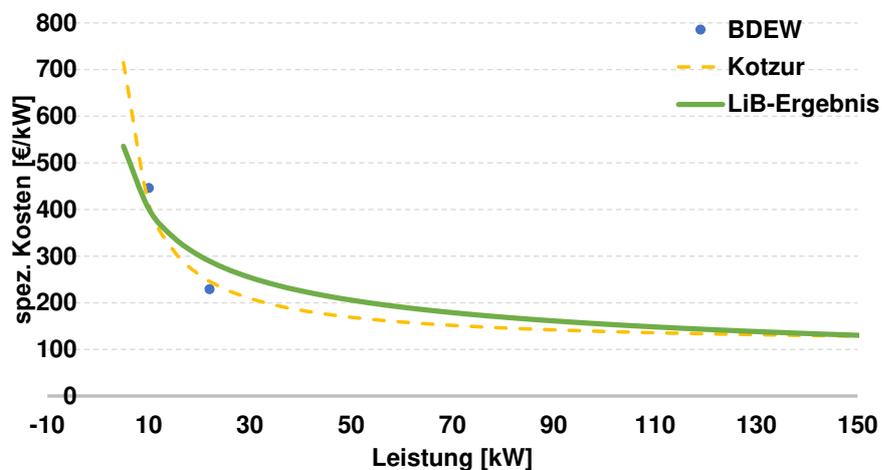


Abbildung 1: Resultierende LiB-Kostenkurve für den Gaskessel im Vergleich zu anderen Sekundärdaten

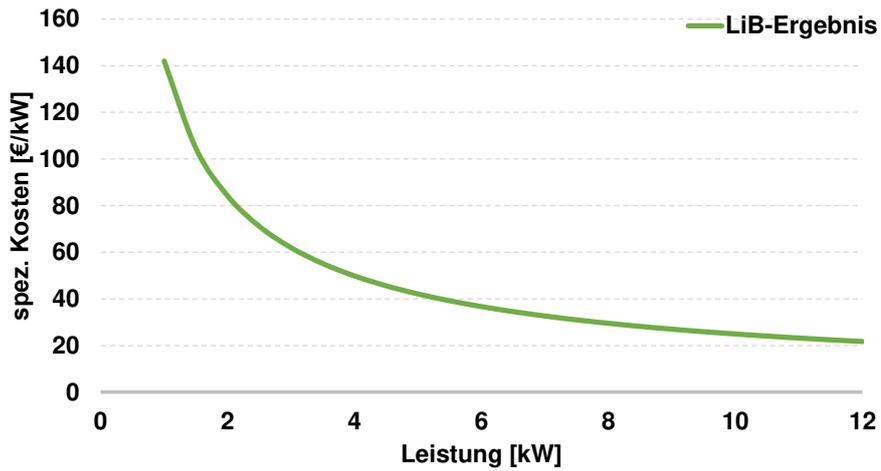


Abbildung 2: Resultierende LiB-Kostenkurve für den elektrischen Heizstab

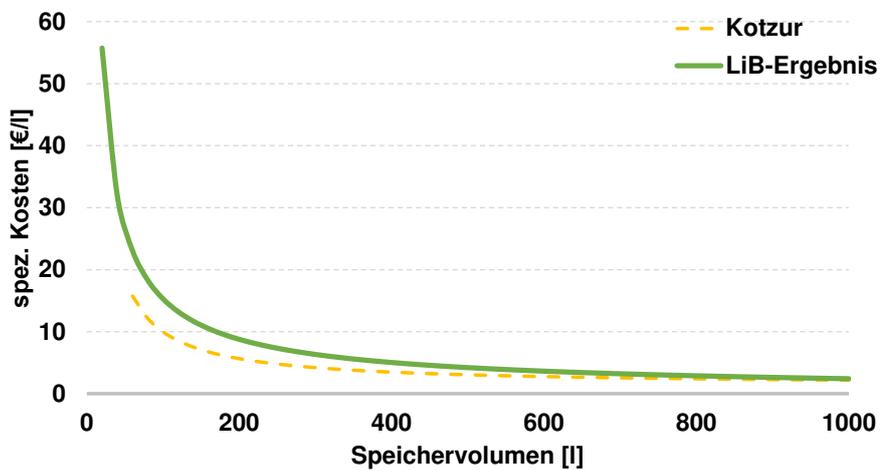


Abbildung 3: Resultierende LiB-Kostenkurve für den Wärmespeicher im Vergleich zu anderen Sekundärdaten

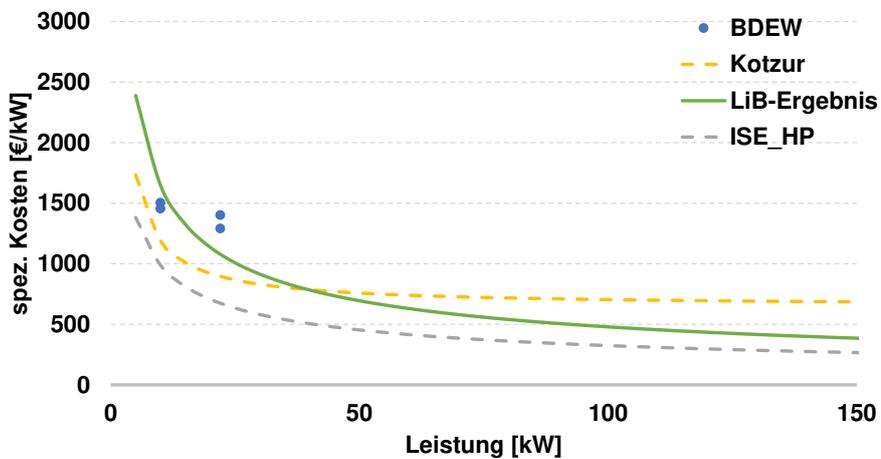


Abbildung 4: Resultierende LiB-Kostenkurve für die Luftwärmepumpe im Vergleich zu anderen Sekundärdaten

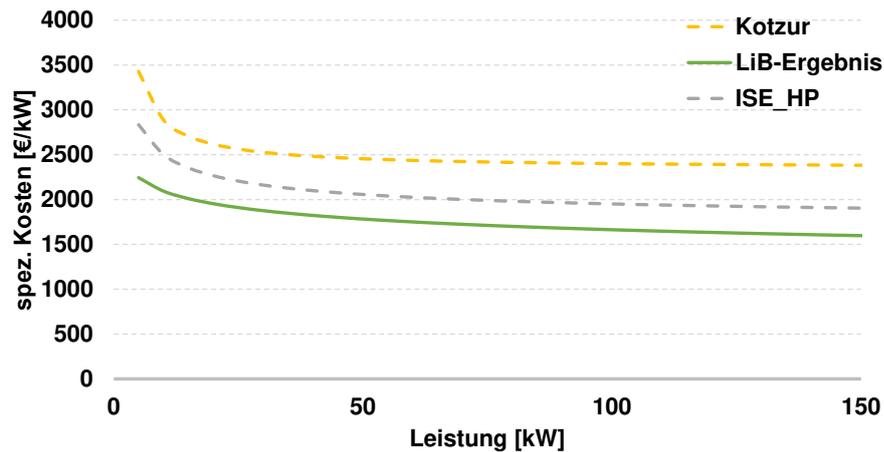


Abbildung 5: Resultierende LiB-Kostenkurve für die Solewärmepumpe (inklusive Bohrung) im Vergleich zu anderen Sekundärdaten

2.4.2 Kosten der Hüllsanierung

Die Kostenkurven für die Sanierung verschiedener Gebäudehüllenteile sind in Tabelle 7 bis Tabelle 12 zusammengefasst. Details zu Datenquellen und Methodik finden sich in Anhang D - LiB-Kostenkurven für die Sanierung der Gebäudehülle. Die Kostenkurven sind auf das erste Quartal des Jahres 2020 bezogen. Die Preise sind als Bruttowerte angegeben, d. h. inklusive Mehrwertsteuer. Die Kostenkurven sind als Vollkosten (VK) dargestellt, unterteilt in energiebedingte Mehrkosten (EMK) und Sowiesokosten (SK).

Die Kostenkurven sind für einen Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{ref} = 0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ angegeben. Für eine andere Wärmeleitfähigkeit muss die äquivalente Dämmdicke nach Gleichung 1 berechnet werden

$$d_{iso, \ddot{a}q} = d_{iso, tat} \cdot \frac{\lambda_{tat}}{\lambda_{ref}} \tag{27}$$

Mit $d_{iso, \ddot{a}q}$	[cm]	äquivalente Dämmdicke (für spezifische Kostenkurven)
$d_{iso, tat}$	[cm]	tatsächliche Dämmdicke
λ_{tat}	[W/(mK)]	tatsächliche Wärmeleitfähigkeit
λ_{ref}	[W/(mK)]	Referenz-Wärmeleitfähigkeit (0.035 W/(mK))

Tabelle 7: Verwendete Kostenkurven für die Fassade

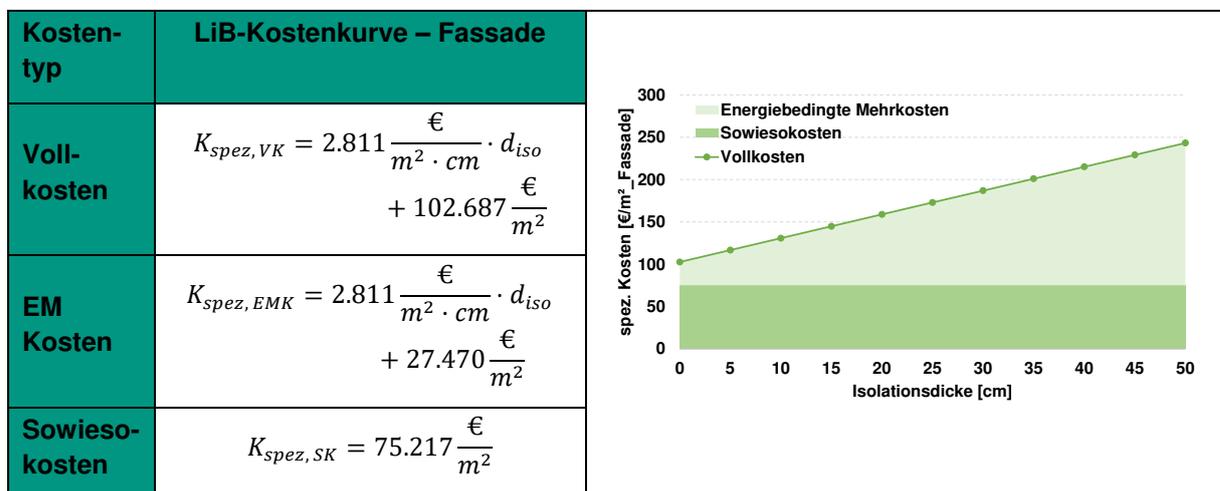


Tabelle 8: Resultierende Kostenkurve für den Boden / die Kellerdecke

Kosten-typ	LiB- Kostenkurve – Boden	
Voll-kosten	$K_{spez,VK} = 1.832 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \cdot \text{cm}} \cdot d_{iso} + 45.504 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$	
EM Kosten	$K_{spez,EMK} = 1.832 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \cdot \text{cm}} \cdot d_{iso} + 45.504 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$	
Sowieso-kosten	$K_{spez,SK} = 0$	

Tabelle 9: Resultierende Kostenkurve für das Dach

Kosten-typ	LiB-Kostenkurve – Dach	
Voll-kosten	$K_{spez,VK} = 2.79 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \cdot \text{cm}} \cdot d_{iso} + 158.90 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$	
EM Kosten	$K_{spez,EMK} = 2.55 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \cdot \text{cm}} \cdot d_{iso} + 6.65 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$	
Sowieso-kosten	$K_{spez,SK} = 0.24 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \cdot \text{cm}} \cdot d_{iso} + 152.24 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$	

Tabelle 10: Resultierende Kostenkurven für zweifach verglaste, dreifach verglaste und Standard-Passivfenster (Teil 1)

Kosten-typ		LiB Kostenkurve– Fenster	
Voll-kosten	Zweifach verglast	$K_{spez,VK} = 467.23 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \cdot \frac{A_{Fenster}}{\text{m}^2}^{-0.232}$	
EM Kosten		$K_{spez,EMK} = 0$	
Sowieso-kosten		$K_{spez,SK} = 467.23 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \cdot \frac{A_{Fenster}}{\text{m}^2}^{-0.232}$	

Tabelle 1011: Resultierende Kostenkurven für zweifach verglaste, dreifach verglaste und Standard-Passivfenster (Teil 2)

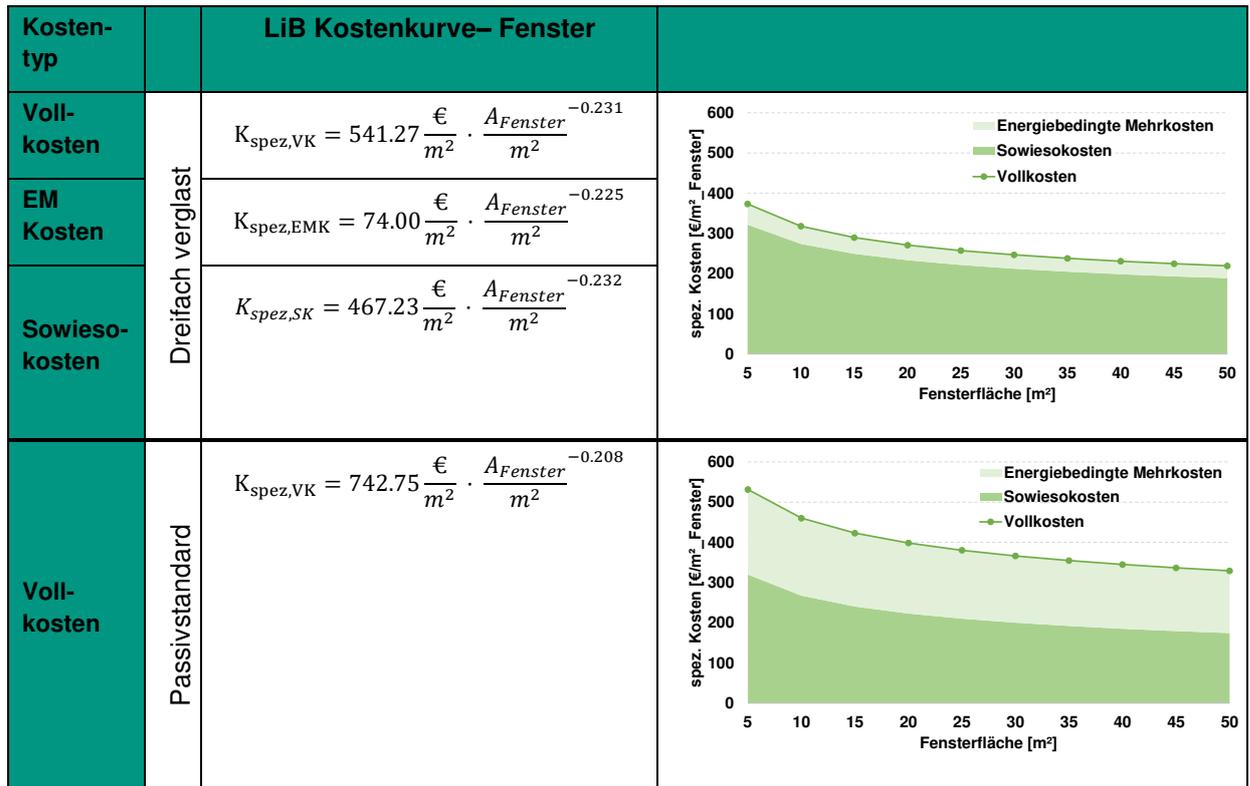


Tabelle 12: Resultierende Kostenkurve für die oberste Geschossdecke

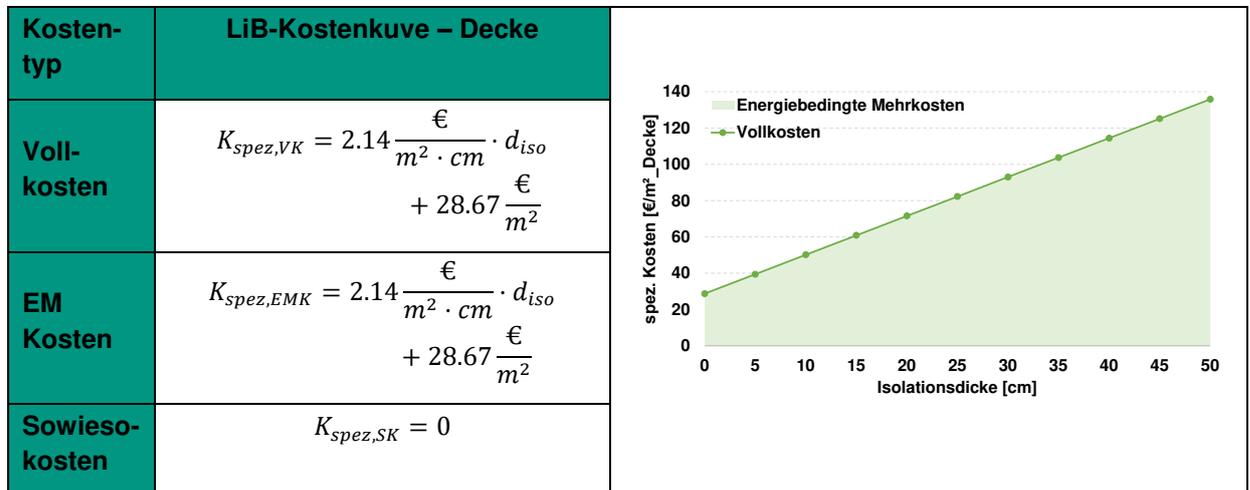
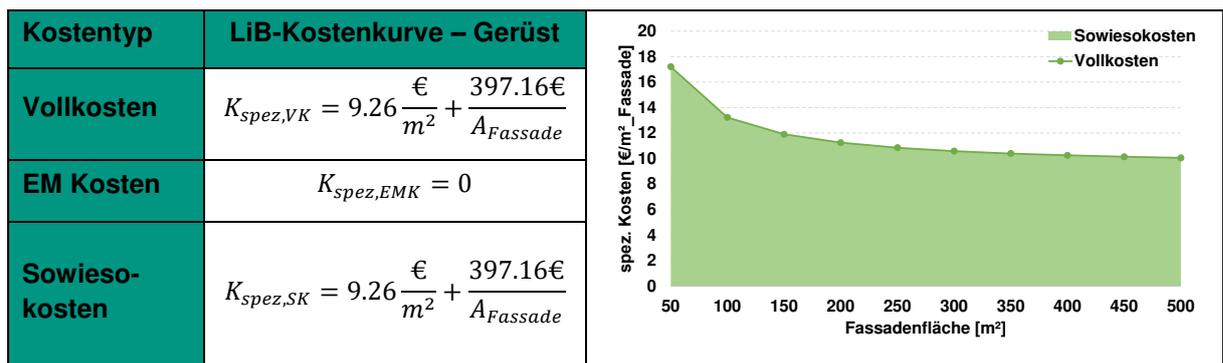


Tabelle 13: Resultierende Kostenkurve für das Gerüst.



2.4.3 Energiepreisszenarien

Das Basis-Jahr der Energiepreisszenarien ist das Jahr 2020. Die Energie-Bezugskosten für Strom und Gas in 2020 stammen von der Bundesnetzagentur (2021).

Der Wärmepumpen-Stromtarif wurde für 2020 aus einer Abfrage von 468 Stromlieferanten für eine vorgegebene Menge von 7.500 kWh ermittelt und betrug 23,58 ct/kWh (Bundesnetzagentur 2021, S. 297). Der Gas-Bezugspreis betrug in 2020 für das Abnahmeband II mit 5.556 kWh bis 55.556 kWh im Tarif-Mittel 6,31 ct/kWh (Bundesnetzagentur 2021, S. 440).

Die Bezugskosten für die Jahre 2030 und 2050 basieren auf der Kurzstudie des EWI und des E.ON ERC (Wagner et al. 2019c), die Prognosen für inflationsbereinigte Real-Preise aus der Perspektive des Jahres 2017 enthält. Für die Hauptanalyse wird Szenario COP1 herangezogen. Dieses entspricht einem moderaten Anstieg der CO₂-Bepreisung auf 180 EUR/tCO₂ in 2050. Zwei Anpassungen werden gemacht:

- Die Kurzstudie betrachtet nur den allgemeinen Haushaltsstrompreis. Um einen WP-Stromtarif zu errechnen wird angenommen, dass für den Zeitraum von 2020 bis 2040 der Wärmepumpenstromtarif konstant 73,6 % des regulären Haushaltsstrompreises beträgt. Dieser Wert ist das Verhältnis des Jahres 2020 nach dem Monitoringbericht der Bundesnetzagentur (2021). Vgl. dazu den Haushaltsstrompreis von 32,05 ct/kWh (Bundesnetzagentur 2021, S. 274) im Abnahmeband 2.500 kWh – 5.000 kWh und den Wärmepumpen-Stromtarif von 23,58 ct/kWh (Bundesnetzagentur 2021, S. 297).
- Um die Real-Preise aus der Kurzstudie vergleichend mit den realen Preisen in 2020 und somit aus der Perspektive des Jahres 2020 (nicht 2017) verwenden zu können, werden die Werte für 2030 und 2050 um den realen Verbraucherpreisindex, d.h. die reale Inflation der Jahre 2017 bis 2019 angehoben. Hierfür wird eine Diskontierungsrate von 1,047 verwendet (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2020).

Leider sind für höhere Abnahmemengen von Haushalts- oder WP-Strom von der Bundesnetzagentur keine Durchschnittswerte verfügbar. Für Gewerbekunden mit Abnahmemenge 50 MWh/a wird ein Strom-Bezugspreis von 23,03 ct/kWh in 2020 angegeben (Bundesnetzagentur 2021, S. 272). Im Demovorhaben "Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach" gibt die Volkswohnung für 2021 WP-Strombezugskosten von 25 ct/kWh an, die KES von 21 ct/kWh.

Die CO₂-Bepreisung gilt für alle Bereiche außerhalb des existierenden CO₂-Zertifikatehandels. Die Endverbraucherpreise gemäß der drei Preisszenarien, wie sie in dieser Studie verwendet werden, sind in Tabelle 14 aufgelistet. Des Weiteren kann über Abbildung 6 der Verlauf des realen (Basisjahr 2020) Strom- und Gaspreises von 2020 bis 2050 nachempfunden werden.

Weitere Details zur EWI-Kurzstudie (Wagner et al. 2019b; Auerswald 2021) sind im Anhang (Kapitel 7.1.2) zu finden.

Tabelle 14: Wärmepumpenstrompreis und Gaspreis für die drei Preisszenarien. Für die Hauptanalyse dieser Studie wird das Szenario COP1 herangezogen. Für Zwischenwerte soll linear interpoliert werden.

Jahr	Einheit	Wärmepumpenstrompreis ¹⁾ , real (2020) ²⁾			Erdgaspreis, real (2020) ²⁾		
		BAU	COP1	COP2	BAU	COP1	COP2
2020 ³⁾	ct/kWh	23,58			6,31		
2030 ⁴⁾	ct/kWh	22,20	18,73	18,73	9,12	11,32	11,73
2040 ⁵⁾	ct/kWh	21,01	19,04	19,08	9,48	13,36	14,56
2050 ⁴⁾	ct/kWh	19,81	19,35	19,43	9,85	15,40	17,39

1) Annahme Wärmepumpenstromtarif 2030 u. 2050: 73,6 % des regulären Haushaltsstrompreises (Bundesnetzagentur 2021, S. 297; 274)

2) Umrechnung Realpreise 2030 u. 2050 aus Sicht 2017 auf Sicht 2020 mit Verbraucherpreisindex (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2020)

3) Werte für 2020 von (Bundesnetzagentur 2021, S. 274; 440)

4) Werte aus der EWI-Kurzstudie (Wagner et al. 2019c, S. 4) Umrechnungsfaktor 2017 auf 2020: 1,048

5) Lineare Interpolation

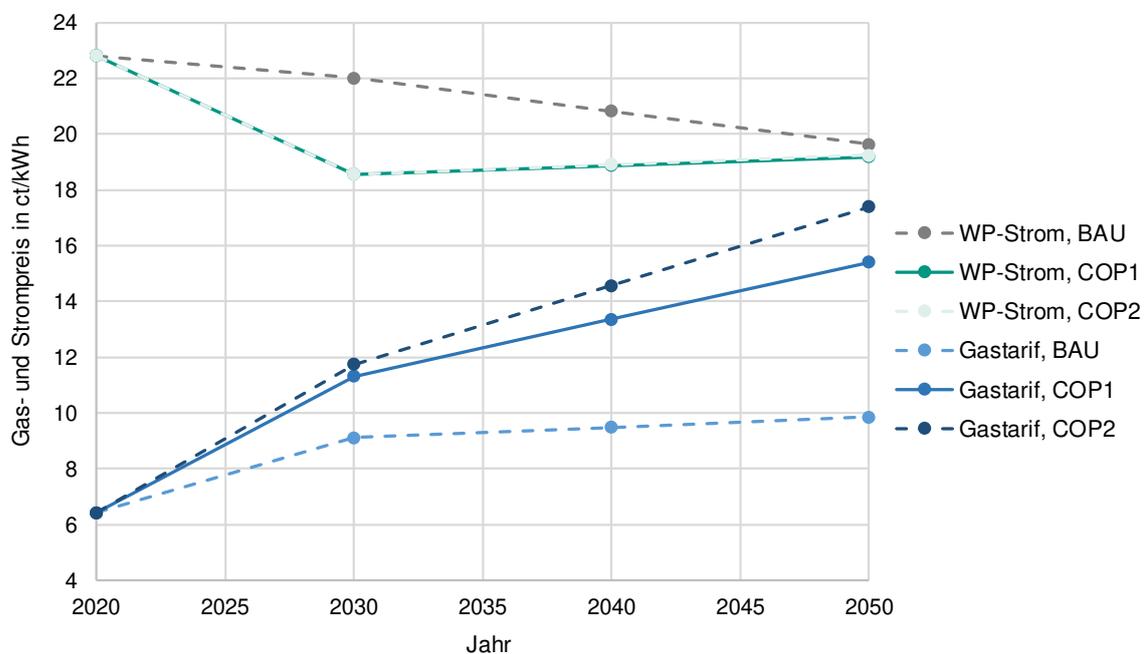


Abbildung 6: Verlauf der Wärmepumpenstrom- und Gaspreise, Realpreis (2020), Datenbasis: Wagner et al. 2019b; Bundesnetzagentur 2020, S. 312; 345.

2.4.4 Diskontierungsrate, Preisänderungsrate und Betrachtungszeitraum

Für die Hauptanalyse der vorliegenden Studie wird eine Diskontierungsrate von 7,5 % angenommen. Der betrachtete Zeitraum der Analyse erstreckt sich über 25 Jahre vom Jahr 2020 bis einschließlich des Jahres 2045.

Capros et al. (2016, S. 46) berücksichtigen für unterschiedliche Investoren die individuellen Finanzierungsmöglichkeiten, Risikobereitschaft und Gewinnerwartung. So setzen sie die Zinserwartung für regulierte Monopolunternehmen und Netzbetreiber auf 7,5 %. Dies entspricht sehr guten Finanzierungsmöglichkeiten aber regulierten Gewinnerwartungen. Für private Haushalte, welche in Modernisierungsmaßnahmen investieren und von politischen Förderungsmaßnahmen profitieren können, nehmen die Autoren einen Zinssatz von 12 % an. Dies berücksichtigt die eingeschränkten Finanzierungsmöglichkeiten und ein höheres Investitionsrisiko, welches durch Förderungsmaßnahmen

wiederum verringert werden kann. Auf der anderen Seite empfiehlt Lützkendorf (2017, S. 13) für eine marktwirtschaftliche Betrachtung von Investitionsentscheidungen im Wohngebäudebereich einen Zinssatz von 3 %, da "hohe Zinssätze die Gewichtung zwischen dem heutigen finanziellen Aufwand und den künftigen Einsparungen an Energiekosten deutlich zu Ungunsten der Einsparungen" verringern. Für die techno-ökonomische Bewertung in der vorliegenden Studie werden 7,5 % verwendet. Hierdurch soll die Gewinnerwartung einer profitorientierten Wohnungsbaugesellschaft abgebildet werden. Die Auswirkung abweichender Diskontierungsraten wird in der Sensitivitätsanalyse näher untersucht.

Als Preisänderungsrate werden 2 % angenommen, entsprechend dem Inflationsziel der EZB.

2.4.5 Wartungskosten und Nutzungsdauern

Die Kosten für Instandhaltung, Wartung und Inspektion der verschiedenen Systemkomponenten, sowie deren Nutzungsdauern sind der VDI 2067 entnommen (VDI 2067). Die Daten für Wärmespeicher werden in der VDI 2067 nicht genannt und sind daher der Einschätzung von Leander Kotzur (Leander Kotzur 2018, S. 89) entnommen. Die Wartungskosten der Erdsonde, die z. B. für den Austausch des Glykols anfallen, werden mit 2,5 % der Investitionskosten als ähnlich hoch wie die Wartungskosten der Solewärmepumpe angenommen. Die Lebensdauer der Erdsonde weicht vom Wärmepumpenaggregat ab und wird in Anlehnung an die in der VDI 2067 angegebenen Erdsonden zur Kühlung mit 50 Jahren angenommen.

Für die Bauteile der Gebäudehülle wird die Lebensdauer auf Basis einer Auflistung des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI 2017) zugrunde gelegt und es wird davon ausgegangen, dass keine Instandhaltungskosten anfallen, unabhängig vom Sanierungszustand. Die Werte sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Nutzungsdauer und Wartungskosten der Hüll- und Systemkomponenten

Komponente	Nutzungsdauer [a]	Wartungskosten [% Investition]	Quelle
Gaskessel	18	3	VDI 2067
El. Heizstab	22	1	VDI 2067
Wärmespeicher	25	0	Kotzur 2018
Luft-Wärmepumpe	18	2,5	VDI 2067
Sole-Wärmepumpe	20	2,5	VDI 2067
Sonde	50	2,5	VDI 2067
Fenster	30	-	BMI 2017
Fassade	40	-	BMI 2017
Boden	> 50	-	BMI 2017
Decke	> 50	-	BMI 2017
Dach	40	-	BMI 2017

2.4.6 CO₂-Emissionsfaktoren

In diesem Bericht werden die CO₂-Emissionen ausschließlich auf den Energieverbrauch der Systeme und nicht auf den gesamten Lebenszyklus der Systemkomponenten (Produktion, Entsorgung etc.) bezogen. Die Angaben zu CO₂ sind synonym als CO₂-Äquivalent zu verstehen. Die Annahmen für die CO₂-Emissionen von Gas und Strom sind in Tabelle 16 dargestellt und entstammen der IINAS-Studie (Fritsche et. al. 2019; IINAS 2019). Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der CO₂-Entwicklungspfad der IINAS-Studie wahrscheinlich nicht mit dem der EWI-Studie übereinstimmt. Somit entsteht eine Diskrepanz zwischen den Preispfaden und den Emissionspfaden, welche nicht zu vernachlässigen ist. Allerdings wird aus der EWI-Studie nicht ersichtlich, wie es sich mit den CO₂-Emissionen des deutschen Strommixes verhält. Auch wird mit dem verwendeten KS95-Szenario der IINAS-Studie das Klimaziel 2050 erreicht und mit dem COP2-Szenario der EWI-Studie das Ziel knapp verfehlt. Nichtsdestotrotz repräsentieren die Ergebnisse der IINAS-Studie einen ambitionierten Klimapfad, wie er auch mit dem COP2-Szenario der EWI-Studie angestrebt wird. Daher wird für diese Studie auch aufgrund mangelnder Datenlage zu übereinstimmenden Preis- und Emissionsszenarien auf die vorgestellten Werte zurückgegriffen.

Detailliertere Informationen zu den Szenarien der CO₂-Emissionsfaktoren sind im Anhang (Kapitel 7.1.4) zu finden.

Tabelle 16: Emissionsfaktoren für den deutschen Strommix (lokal) und für Gas (lokal, auf Brennwert bezogen) nach IINAS (Fritsche et. al. 2019; IINAS 2019).

Jahr	Einheit	Strommix	Gas
2020	g/kWh	402,9	200,8
2030	g/kWh	193,0	183,9
2040*	g/kWh	107,1	175,2
2050	g/kWh	21,1	166,4
* linear interpolierter Wert			

2.4.7 Fördermaßnahmen von KfW und BAFA

Als finanzielle Unterstützung und Anreiz bietet die Bundesregierung eine Förderung für die energetische Sanierung von Gebäuden, die sogenannte BEG (Bundesförderung für effiziente Gebäude). Die neuen Regelungen gelten ab Juli 2021 und sollen die bisherige Vielfalt der Fördermöglichkeiten und den Aufwand bei der Antragstellung vereinfachen.

Bei der Hüllen- und Anlagensanierung kommen zwei Wege der Förderung des BEG in Betracht. In Kombination mit einem individuellen Sanierungsplan (iSFP) durch einen professionellen Energieberater erhöhen sich die Fördersätze um 5 %, so dass folgende Sätze bezogen auf die Investition gelten:

- Hüllsanierung: 20 % + 5 % = 25 %
- Systemsanierung:
 - Monoenergetisches WP-System: 35 % + 5 % = 40 %
 - Bivalentes WP-System: 20 % + 5 % = 25 %

Die Rahmenbedingungen sind eine Mindestinvestition von 2000 € und eine förderfähige Höchstinvestition von 60.000 € pro Wohneinheit (BAFA 2021a, 2021b)

2.5 Bestandstechnologie (Referenz)

Zur Bewertung der Kombinationen aus Hüll- und Systemsanierung werden die Energiekosteneinsparungen den energiebedingten Mehrausgaben gegenübergestellt. In diesem Unterabschnitt wird erklärt, anhand welcher Referenztechnologie die Energiekosteneinsparungen bestimmt werden und welche anfallenden Sowieso-Kosten die energiebedingten Mehrkosten definieren.

Die Ausgangslage dieser Studie ist, dass zu Beginn des Betrachtungszeitraums die Wärmebereitstellungstechnologie ausgetauscht werden muss. Es wird angenommen, dass im Bestandsgebäude ein Heizkessel verbaut ist, der mit Erdgas betrieben wird. Die Energiekosten, die durch den Gasbedarf entstehen, stellen die Referenzgröße für die Bestimmung der Energiekosteneinsparung dar, wie sie in Abschnitt 2.1.3 Gleichung (13) beschrieben sind. Im Referenzfall eines MMH im Sanierungszustand B1 wird für die Bereitstellung von Raumwärme ein Wirkungsgrad von 89 % angenommen beziehungsweise 85 % für die Bereitstellung von Warmwasser.

Für die Bestimmung der energiebedingten Mehrausgaben auf der Technologieseite, stellt die Gasbrennwerttechnologie die anfallenden Sowieso-Kosten dar. Diese Vorgehensweise lehnt sich an die Annahme von Hinz (2015, S. 34) an, für welche die Autoren für zweifach verglaste Fenster keine energiebedingten Mehrausgaben ausweisen, da dieser Fensterstandard der Mindeststandard ist, welcher auf dem Markt erhältlich ist. Dementsprechend wird für eine Investition in die Wärmebereitstellungstechnologie angenommen, dass keine andere Technologie verbaut werden kann als die Brennwerttechnologie. Dies ist auf die Ökodesign-Richtlinie der EU zurückzuführen (Europäische Union 31.10.2009), welche 2015 in Kraft getreten ist und welche Hersteller in den meisten Fällen für Anlagengrößen zwischen 4 kW und 400 kW verpflichtet, nur noch Brennwertkessel oder hoch-effiziente Niedertemperaturkessel anzubieten ($\eta_s > 86\%^1$). Die Richtlinie wird über das EVPG, Gesetz über die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte, (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 16.11.2011) im deutschen Recht verankert. Bei einer eigenen Produktrecherche bei großen deutschen Heizungsherstellern wurden keine Angebote zu Niedertemperaturkesseln gefunden, die als zentrale Wärmebereitstellungstechnologien in Mehrfamilienhäusern (Leistung < 400 kW) in Frage kommen. Demzufolge wird für die Studie angenommen, dass für die Installation eines Brennwertkessels keine energiebedingten Mehrausgaben entstehen, da diese Technologie den aktuellen Mindeststandard darstellt. Dementsprechend werden für die Bestimmung der energiebedingten Mehrausgaben für LowEx-Systeme die Kosten und Ausgaben für die Brennwerttechnologie als Sowieso-Kosten bestimmt, siehe Abschnitt 2.1.4 Gleichung (15).

Dieses Vorgehen deckt sich auch mit dem Vorgehen in der Studie von Enseling et al. (2011, S. 15).

¹Die jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz η_s bezieht sich auf den brennwertbezogenen Nutzungsgrad unter Berücksichtigung der benötigten Hilfsenergie (Schlobach 2015).

3 Techno-ökonomische Bewertung von Gebäudehüll- und Systemsanierung

In diesem Abschnitt werden Maßnahmen an der Gebäudehülle und dem Heizsystem getrennt voneinander techno-ökonomisch bewertet. Zu Anfang werden Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle vorgestellt (Kapitel 3.1). Im Anschluss wird die Erneuerung des Heizungssystems insbesondere durch LowEx-Systeme untersucht und bewertet (Kapitel 3.2). Die Ergebnisse dieses Kapitels repräsentieren die Voruntersuchungen zur Hauptuntersuchung in Kapitel 4. Hier wird ein besonderes Augenmerk auf die Kombination von Hüllsanierung und Systemsanierung gelegt.

3.1 Sanierung der Gebäudehülle

Im Folgenden werden Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle bewertet. Hierbei werden die Sanierungsmaßnahmen in zwei Sanierungsstufen S und P untersucht. Zur Erläuterung der Ergebnisse werden die äquivalenten Energiepreise (Kapitel 3.1.1), die Kapitalwerte (Kapitel 3.1.2) sowie die CO₂-Emissionseinsparungen (Kapitel 3.1.3) der einzelnen Sanierungsmaßnahmen dargestellt und diskutiert. Details zur technischen Auslegung sind im Anhang (Kapitel 7.2.3) zu finden.

Grundsätzlich können die einzelnen Komponenten der Gebäude unabhängig voneinander saniert werden. Zum Beispiel ist es denkbar, dass ein Gebäude bereits eine Außenwand und Fenstersanierung auf GEG-Niveau erhalten hat, jedoch die unterste Geschossdecke sowie das Dach sich noch im Erbauungszustand befinden. Folglich sind unterschiedlichste Konstellationen an Sanierungsmaßnahmen (vgl. Tabelle 17 und Tabelle 18) möglich. Eine detaillierte Auflistung der einzelnen U-Werte etc. befindet sich im Anhang (vgl. Kapitel 7.2.2).

*Tabelle 17: Untersuchte Maßnahmenpakete der BAK 1958-78 mit den Abkürzungen
E = Erbauungszustand, B = Bestand, S = GEG-Niveau, P = Passivhaus-Niveau*

Ausgangszustand: Sanierungs- Niveau von „o“	Endzustand: Sanierungs- Niveau von „X“	Fenster	Wand	Decke ¹⁾	Dach	Boden ²⁾	Endzustand: Codierung 1	Endzustand: Codierung 2	Haupt- varianten
E	E	o	o	o	o	o	fE.wE.deE.daE.bE	E	E
	B	x	o	o	o	o	fB.wE.deE.daE.bE	B1	B1
	B	x	x	o	o	o	fB.wB.deE.daE.bE	B2	-
	B	x	x	x	o	x	fB.wB.deB.daE.bB	B	B
B1	S	o	o	o	o	x	fB.wE.deE.daE.bS	S1	-
	S	o	o	o	x	o	fB.wE.deE.daS.bE	S2	-
	S	x	x	o	o	o	fS.wS.deE.daE.bE	S3	-
	S	x	x	o	x	o	fS.wS.deE.daS.bE	S4	-
	S	x	x	o	x	x	fS.wS.deE.daS.bS	S	S
	P	x	x	o	x	x	fP.wP.deE.daP.bP	P	P
B2	S	o	o	o	x	x	fB.wB.deE.daS.bS	S5	-
B	S	x	x	o	x	x	fS.wS.deB.daS.bS	S6	-
	P	x	x	o	x	x	fP.wP.deB.daP.bP	P1	-

1) Decke = oberste Geschossdecke (Trennung beheiztes Raumvolumen von unbeheiztem Dachraum)

2) Boden = unterste Geschossdecke (Trennung beheiztes Raumvolumen von unbeheiztem Keller)

Tabelle 18: Untersuchte Maßnahmenpakete der BAK 1979-94 mit den Abkürzungen E = Erbauungszustand, B = Bestand, S = GEG-Niveau, P = Passivhaus-Niveau

Ausgangszustand: Sanierungs-Niveau von „0“	Endzustand: Sanierungs-Niveau von „X“	Fenster	Wand	Decke ¹⁾	Dach	Boden ²⁾	Endzustand: Codierung 1	Endzustand: Codierung 2 ³⁾	Hauptvarianten
E	E	o	o	o	o	o	fE.wE.deE.daE.bE	E	E
	S	o	o	o	o	x	fE.wE.deE.daE.bS	S1	-
	S	o	o	x	o	o	fE.wE.deS.daE.bE	S2	-
	S	x	x	o	o	o	fS.wS.deE.daE.bE	S3	-
	S	x	x	x	o	o	fS.wS.deS.daE.bE	S4	-
	S	x	x	x	o	x	fS.wS.deS.daE.bS	S	S
	P	x	x	x	o	x	fP.wP.deP.daE.bP	P	P

1) Decke = oberste Geschossdecke (Trennung beheiztes Raumvolumen von unbeheiztem Dachraum)
 2) Boden = unterste Geschossdecke (Trennung beheiztes Raumvolumen von unbeheiztem Keller)
 3) Unterschied bei S2 bzw. S4 in der BAK 58 und '78: Bei '58 wird das Dach gedämmt und bei '78 die OGD

Die weitere Analyse erfolgt für verschiedene Ausgangssituationen, die in Abbildung 7 zusammengefasst sind. Die Hintergründe der verschiedenen Szenarien werden im Folgenden erläutert:

BAP	Szenario	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040
							Betrachtungszeitraum (2020-2045)		
1958-78	70haupt	E			B1		S/P		
	70min	E			B1			S/P	
	70teil	E			B1		S1...S4		
	70mid	E			B			S6/P1	
	70max	E			B		S6/P1		
1979-94	90haupt			E			S/P		

Abbildung 7: Übersicht über die zu berechnenden Szenarien für die Gebäudehülle (Betrachtungszeitraum gelb markiert)

70haupt:

Die Hauptanalyse für BAP 1958-78 wird für ein **1970 errichtetes Gebäude (E)** durchgeführt. Im Jahr 2000, als die Lebensdauer der Fenster abgelaufen war, wurde die notwendige Sanierung durchgeführt, d. h. die Fenster wurden ausgetauscht (B1). Zu Beginn des Betrachtungszeitraums im Jahr 2020 muss das Wärmeversorgungssystem ausgetauscht werden und gleichzeitig wird die Gebäudehülle nach GEG (S) oder mit U-Werten vergleichbar mit Passivhausstandard (P) saniert. Da das Dach saniert wird, bleibt die oberste Geschossdecke im Erbauungszustand. Die Zeitpunkte zum Austausch der verschiedenen Hüllkomponenten sind in Abbildung 8 dargestellt. Die Restnutzungsdauer bezieht sich auf die verbleibende Nutzungsdauer nach 2045.

70haupt	Nutzungsdauer	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040	Restnutzungsdauer
	E				B1		S/P			
Fenster	30 a									5 a
Dach	40 a									15 a
Fassade	40 a									15 a
Decke	50 a									0 a
Boden	50 a									25 a

Abbildung 8: Zeitplan für das Szenario 70haupt (Betrachtungszeitraum gelb markiert)

90haupt:

Die Hauptanalyse für BAP 1979-94 wird für ein **1990 errichtetes Gebäude (E)** durchgeführt. Zu Beginn des Betrachtungszeitraums im Jahr 2020, wenn die Lebensdauer der Fenster abgelaufen ist, wird eine vollständige energetische Sanierung nach GEG (S) oder mit U-Werten vergleichbar mit Passivhausstandard (P) durchgeführt. Das Dach wird nicht saniert, da seine Lebensdauer zum Zeitpunkt der Sanierung noch nicht abgelaufen ist. Die Zeitpunkte zum Austausch der verschiedenen Hüllkomponenten sind in Abbildung 9 dargestellt.

90haupt	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040	Restnutzungsdauer
Nutzungsdauer	E					S/P			
Fenster 30 a									5 a
Dach 40 a									0 a
Fassade 40 a									15 a
Decke 50 a									25 a
Boden 50 a									25 a

Abbildung 9: Zeitplan für das Szenario 90hauptn (Betrachtungszeitraum gelb markiert)

70min:

Diese Ausgangssituation beschreibt den geringstmöglichen Aufwand bei der Hüllsanierung eines im Jahr 1990 errichteten Gebäudes (E). Im Jahr 2000, als die Lebensdauer der Fenster abgelaufen war, wurde die notwendige Sanierung durchgeführt, d. h. die Fenster wurden ausgetauscht (B1). Dach und Fassade werden über ihre Lebensdauer hinaus genutzt. Innerhalb des Betrachtungszeitraums im Jahr 2030, wenn die Lebensdauer der Fenster ein zweites Mal abläuft, wird eine energetische Vollsaniierung nach den gesetzlichen Anforderungen des GEG (S) oder mit U-Werten vergleichbar mit Passivhausstandard (P) durchgeführt. Da das Dach saniert wird, bleibt die oberste Geschosdecke im Erbauungszustand. Die Zeitpunkte zum Austausch der verschiedenen Hüllkomponenten ist in Abbildung 10 dargestellt.

70min	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040	Restnutzungsdauer
Nutzungsdauer	E			B1		S/P			
Fenster 30 a									15 a
Dach 40 a									25 a
Fassade 40 a									25 a
Decke 50 a									0 a
Boden 50 a									35 a

Abbildung 10: Zeitplan für das Szenario 70min (Betrachtungszeitraum gelb markiert)

70max:

Diese Ausgangssituation beschreibt den maximalen Aufwand bei der Hüllsanierung eines im Jahr 1970 errichteten Gebäudes (E). Im Jahr 2000, als die Lebensdauer der Fenster abgelaufen war, wurde eine vollständige energetische Sanierung nach dem damaligen Energiestandard durchgeführt (B). In diesem Fall wurde die oberste Geschosdecke gedämmt, nicht das Dach. Zu Beginn des Betrachtungszeitraums im Jahr 2020 muss das Wärmeversorgungssystem ausgetauscht werden und die Gebäudehülle wird gleichzeitig nach GEG (S6) oder mit U-Werten vergleichbar mit Passivhausstandard (P1) saniert. Die bereits sanierte Decke wird nicht mehr angefasst. Die Zeitpunkte zum Austausch der verschiedenen Hüllkomponenten ist in Abbildung 11 dargestellt.

70max	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040	Restnutzungsdauer
Nutzungsdauer	E			B		S6/P1			
Fenster 30 a									5 a
Dach 40 a									15 a
Fassade 40 a									15 a
Decke 50 a									0 a
Boden 50 a									25 a

Abbildung 11: Zeitplan für das Szenario 70max (Betrachtungszeitraum gelb markiert)

70mid:

Diese Ausgangssituation beschreibt einen Mittelweg zwischen minimalem und maximalem Aufwand bei der Hüllsanierung eines 1970 errichteten Gebäudes (E). Im Jahr 2000, als die Lebensdauer der Fenster abgelaufen war, wurde eine vollständige energetische Sanierung nach dem damaligen Energiestandard durchgeführt (B). In diesem Fall wurde die oberste Geschossdecke gedämmt, nicht das Dach. Innerhalb des Betrachtungszeitraums im Jahr 2030, wenn die Lebensdauer der Fenster ein zweites Mal abläuft, wird eine energetische Vollsanierung nach den gesetzlichen Anforderungen des GEG (S) oder mit U-Werten vergleichbar mit Passivhausstandard (P) durchgeführt. Da das Dach saniert wird, bleibt die oberste Geschossdecke im Erbauungszustand. Die Zeitpunkte zum Austausch der verschiedenen Hüllkomponenten ist in Abbildung 12 dargestellt.

70mid	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040	Restnutzungsdauer
Nutzungsdauer	E			B			S6/P1		
Fenster	30 a								15 a
Dach	40 a								25 a
Fassade	40 a								25 a
Decke	50 a								0 a
Boden	50 a								35 a

Abbildung 12: Zeitplan für das Szenario 70mid (Betrachtungszeitraum gelb markiert)

70teil:

Dieses Szenario beschreibt Teilsanierungen, um die Auswirkungen der Sanierung einzelner Komponenten der Gebäudehülle eines 1970 errichteten Gebäudes (E) zu analysieren. Im Jahr 2000, als die Lebensdauer der Fenster abgelaufen war, wurde die notwendige Sanierung durchgeführt, d. h. die Fenster wurden ausgetauscht (B1). Zu Beginn des Betrachtungszeitraums im Jahr 2020 muss das Wärmeversorgungssystem ausgetauscht werden und gleichzeitig werden einzelne Komponenten der Gebäudehülle saniert (S1 ... S4). Die Zusammensetzung der Teilsanierungszustände und die Zeitpunkte zum Austausch der verschiedenen Hüllkomponenten ist in Abbildung 13 dargestellt.

70teil	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040	Restnutzungsdauer
Nutzungsdauer	E			B1		S1/S2/S3/S4			
Fenster	30 a					S3 S4			0/0/5/5 a
Dach	40 a					S2 S4			0/15/0/15 a
Fassade	40 a					S3 S4			0/0/15/15 a
Decke	50 a								0/0/0/0 a
Boden	50 a					S1 S2			25/25/0/0 a

Abbildung 13: Zeitplan für das Szenario 70teil (Betrachtungszeitraum gelb markiert)

Gebäudegröße:

Der Einfluss der Gebäudegröße auf die Ergebnisse wird anschließend für die Hauptszenarien beider BAPs analysiert, d. h. durch Betrachtung von KMH und GMH für 70haupt und 90haupt.

Wärmeversorgungssystem:

In den Szenarien 70min und 70mid findet innerhalb des Betrachtungszeitraums eine Hüllsanierung statt. Das heißt, auch der Raumwärmebedarf und die Nennheizlast ändern sich im Jahr 2030. Das Wärmeversorgungssystem muss in jedem Fall im Jahr 2020 ausgetauscht werden. Innerhalb des Betrachtungszeitraums sind Erneuerungen im Wärmeversorgungssystem notwendig, wie Abbildung 14 zeigt. Das System kann nun für den reduzierten Wärmebedarf kleiner dimensioniert werden.

Nutzungsdauer		2020	2030	2040	Restnutzungsdauer
Gaskessel	18 a				11 a
Heizstab	22 a				19 a
Speicher	25 a				0 a
WP Luft	18 a				11 a
WP Sole	20 a				15 a
Bohrloch	50 a				25 a

Abbildung 14: Zeitplan der Erneuerungen im Wärmeversorgungssystem (Betrachtungszeitraum gelb markiert)

3.1.1 Äquivalente Energiepreise

Abbildung 15 zeigt die äquivalenten Energiepreise für alle untersuchten Sanierungsstufen der BAP 1958-78 für alle Gebäudegrößen. In Abbildung 16 sind die äquivalenten Energiepreise für verschiedene Szenarien des MMH beider BAPs angegeben. Über den äquivalenten Energiepreis werden die Investitionen in die unterschiedlichen Sanierungspakete mit der durch die Sanierungspakete eingesparten Wärme ins Verhältnis gesetzt. Hierbei wird der Preis pro kWh Raumwärme inklusive der angesetzten Förderung gezeigt.

Grundsätzlich ist zu beobachten, dass unabhängig von der Gebäudegröße der Energiepreis einer Sanierung auf GEG-Standard (S) geringer ausfällt als auf Sanierung nach Passivhaus-Standard (P). Dies gilt zusätzlich für die verschiedenen BAPs. Grund hierfür sind hohe zusätzliche Kosten bei einer Sanierung nach Passivhaus-Standard, die jedoch nicht von einem reduzierten Energiebedarf kompensiert werden können. Betrachtet man noch genauer den Einfluss unterschiedlicher Sanierungsmaßnahmen für das MMH, ist zu erkennen, dass sich insbesondere eine Sanierung der Fassade und Fenster (S3) vorteilhaft auf den äquivalenten Energiepreis auswirkt, da hierbei hohe Energieeinsparungen bei gleichzeitig relativ niedriger Gesamtinvestition möglich sind. Das Gegenteil trifft auf eine Dachsanierung (S2) zu, die trotz hoher Investitionskosten nur zu minimaler Energieeinsparung und dadurch zu einem hohen Energiepreis führt.

Betrachtet man nun den Einfluss der Gebäudegröße ergibt sich eine Reduzierung des äquivalenten Energiepreises mit zunehmender Gebäudegröße, verursacht durch Skalierungseffekte.

Abbildung 16 zeigt die äquivalenten Energiepreise für verschiedene Baualterperioden und verschiedene Zeitpunkte einer Hüllsanierung. Szenarien mit Sanierungen im Jahr 2020 sind als farbige Balken dargestellt, der Unterschied zu einer Sanierung im Jahr 2030 als Fehlerindikator. Die BAP beeinflusst ebenfalls den Energiepreis, BAP1979-94 ist hier vorteilhaft gegenüber BAP1958-78, da hier bereits energieeffizientere Materialien eingesetzt wurden. Wurden in der Vergangenheit nur die Fenster getauscht ohne weitere Sanierung (70min), ergibt sich aufgrund der großen Energieeinsparung während einer nun durchgeführten Sanierung ein geringerer Energiepreis im Vergleich zu schon in der Vergangenheit sanierten Gebäuden (70haupt).

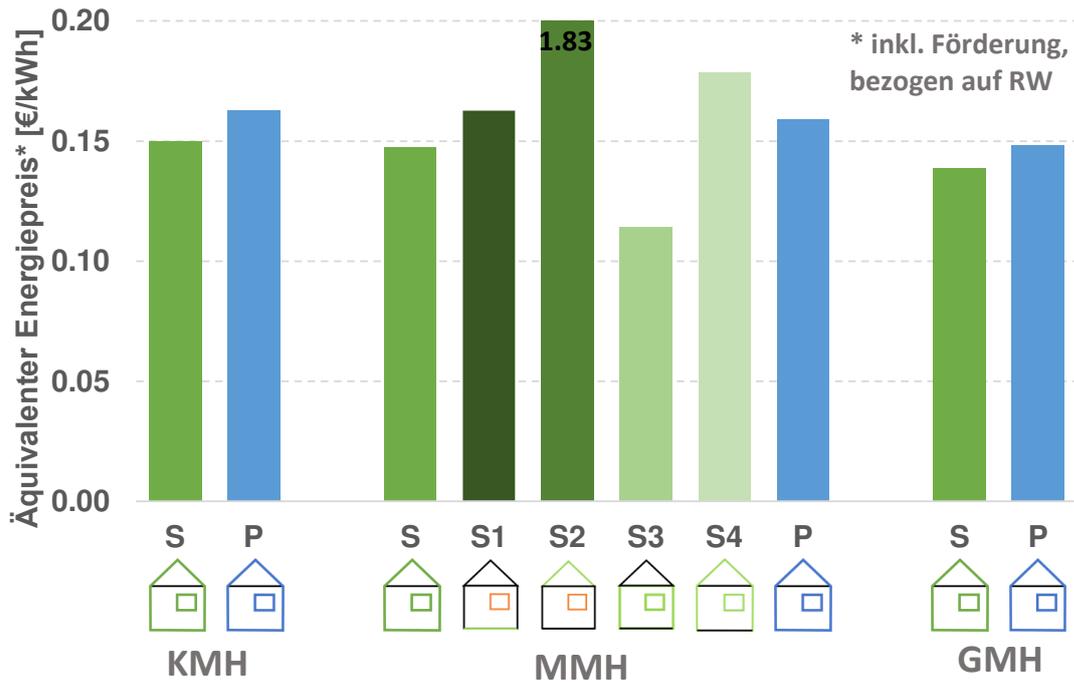


Abbildung 15: Äquivalenter Energiepreis der Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle für alle untersuchten Sanierungsstufen der Baualtersperiode 1958-78 in allen Gebäudegrößen.

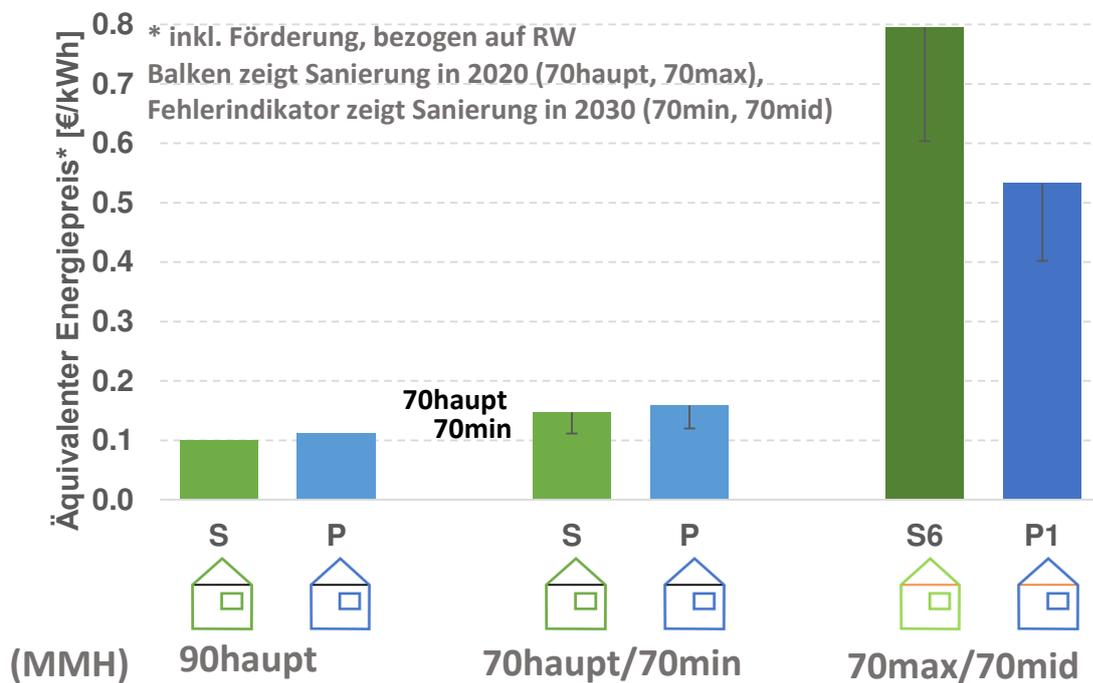


Abbildung 16: Äquivalenter Energiepreis der Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle für verschiedene Szenarien und Baualtersperioden des MMH. Die Ergebnisse der Szenarien mit einer Hüll-Sanierung im Jahr 2020 sind als farbige Balken dargestellt, die Unterschiede zu den Ergebnissen der Szenarien mit Hüll-Sanierung im Jahr 2030 als Fehlerindikatoren.

3.1.2 Kapitalwert der energiebedingten Mehrinvestition

In Abbildung 17 und Abbildung 18 ist der Kapitalwert der energiebedingten Mehrinvestition (KW_{Mike}) der einzelnen Sanierungsmaßnahmen für alle Gebäudetypen angegeben. Der obere Graph zeigt die Sanierungsmaßnahmen für die BAP 1958-78, der untere Graph für verschiedene Einbauszenarien und BAPs. Der KW_{Mike} wird hier bezogen auf die Wohnfläche abgebildet in $\text{€}/\text{m}^2_{\text{Wohnfläche}}$. Unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Wertes des Geldes und der Rohstoffpreissteigerungen stellt der KW_{Mike} der Sanierungsmaßnahmen die Summe der Anfangsinvestition abzüglich des diskontierten Restwerts und den über den Zeitraum anfallenden Auszahlungen dar, wobei immer nur energiebedingte Mehrinvestition bzw. -auszahlungen berücksichtigt werden. Als jährliche Auszahlungen werden daher die jährlichen Energiekosteneinsparungen der Wärmebereitstellung gewertet, die wie eine Einzahlung positiv gewertet werden. Zur Ermittlung der Energiekosten wird als Wärmebereitstellungstechnologie die in Kapitel 2.5 beschriebene Referenztechnologie in Form eines Brennwertkessels angenommen.

Aus Abbildung 17 ist zu erkennen, dass für die BAP 1958-78 die Sanierungsmaßnahme an Außenwand und Fenster (S3) den höchsten Wert für den KW_{Mike} erzielt, da in diesem Fall hohe Energiekosteneinsparungen relativ geringen Sanierungskosten gegenüberstehen. Wird zusätzlich noch das Dach saniert (S4), führt dies zum gegenteiligen Effekt, da eine Dachsanierung zu hohen Kosten bei gleichzeitig geringem Mehrwert führt. Für Sanierungen eines Gebäudes der BAP 1958-78 kann grundsätzlich ausgesagt werden, dass eine Sanierung auf GEG-Standard zu positiver Wirtschaftlichkeit führt, unabhängig vom Gebäudetyp. Des Weiteren ist zu beobachten, dass bei Gebäuden desselben Typs diejenigen Gebäude der älteren Baualtersklasse 1958-78 höhere Kapitalwerte aufweisen, als die Gebäude der jüngeren Altersperiode 1979-94 (siehe Abbildung 18). Dies ist darauf zurückzuführen, dass in den älteren Gebäuden durch Sanierungsmaßnahmen höhere Energieeinsparungen zu erzielen sind. Hierdurch fallen auch die Einnahmen durch Energiekosteneinsparungen verhältnismäßig höher aus. Im Vergleich der drei Gebäudetypen weist das große Mehrfamilienhaus der BAP 1958-78 die höchsten spezifischen Werte bezogen auf die Wohnfläche des KW_{Mike} auf.

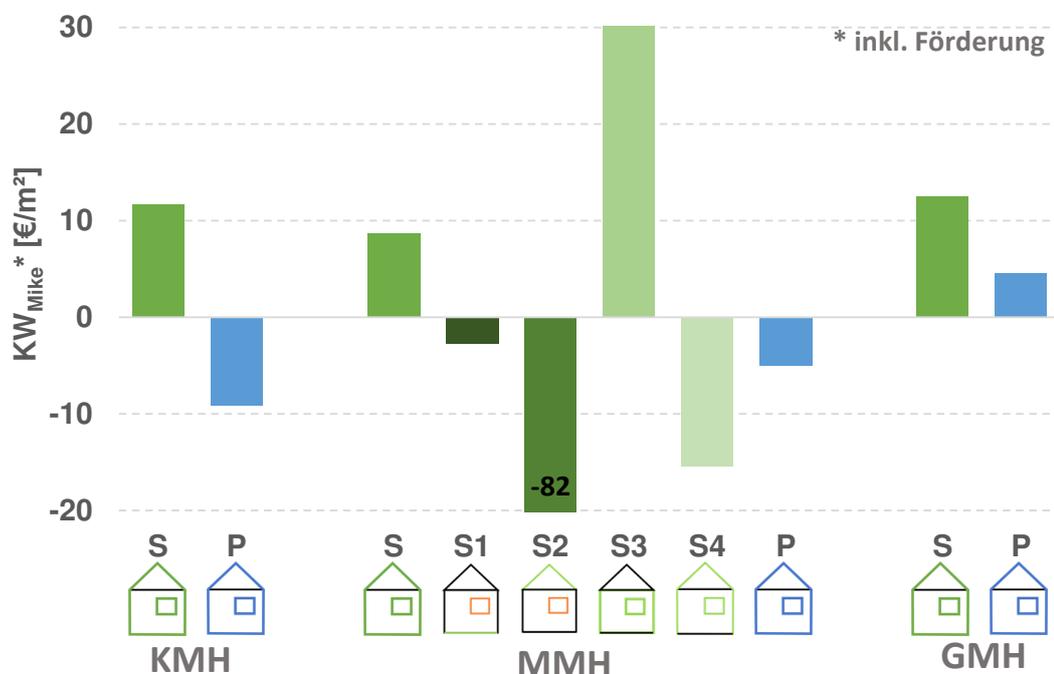


Abbildung 17: KW_{Mike} der Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle für alle untersuchten Sanierungsstufen der Baualtersperiode 1958-78 in allen Gebäudegrößen. Analog zu den Werten für den äquivalenten Energiepreis verhalten sich die Ergebnisse des KW_{Mike} .

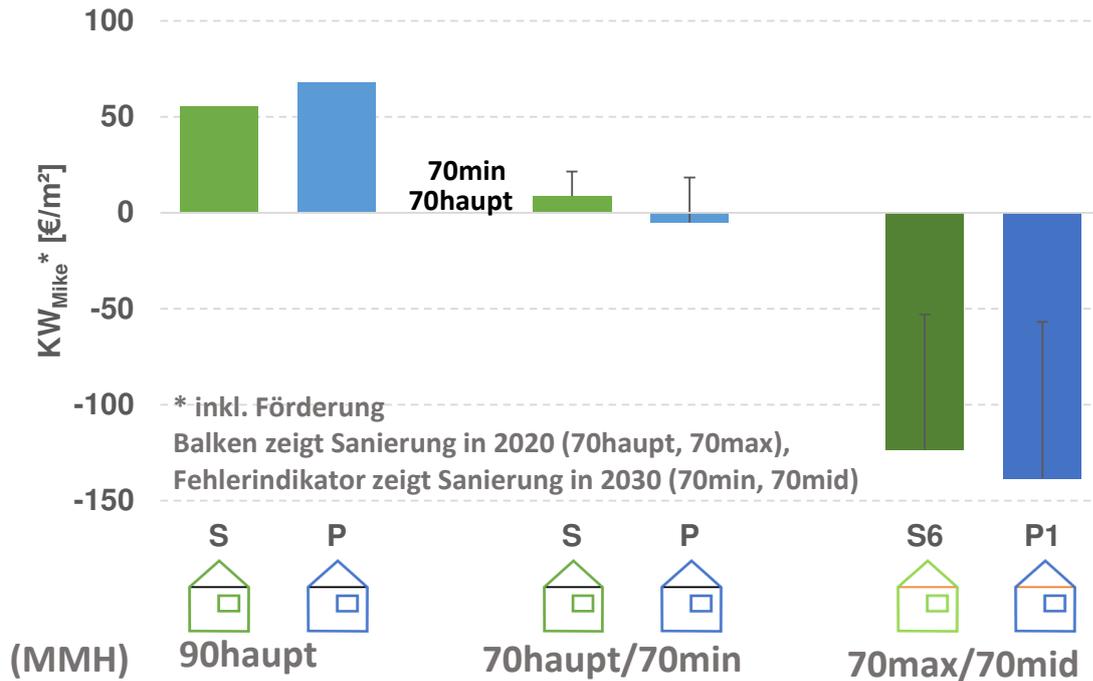


Abbildung 18: KW_{Mike} der Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle für verschiedene Szenarien und Baualtersperioden des MMH. Die Ergebnisse der Szenarien mit einer Hüll-Sanierung im Jahr 2020 sind als farbige Balken dargestellt, die Unterschiede zu den Ergebnissen der Szenarien mit Hüll-Sanierung im Jahr 2030 als Fehlerindikatoren. Analog zu den Werten für den äquivalenten Energiepreis verhalten sich die Ergebnisse des KW_{Mike} .

3.1.3 CO₂-Emissionseinsparung

In Abbildung 19 und Abbildung 20 ist die vermiedene Menge an CO₂-Emissionen der einzelnen Sanierungsmaßnahmen für alle Gebäude bezogen auf die Wohnfläche dargestellt. Der obere Graph zeigt die Ergebnisse für alle untersuchten Sanierungsstufen der Baualtersperiode 1958-78 für alle Gebäudegrößen, der untere Graph für verschiedene Szenarien und BAPs des MMH. Wie aus den Betrachtungen des äquivalenten Energiepreises bereits hervorgegangen ist, ist die Wärmebedarfsreduktion durch die Einzelsanierungsmaßnahmen an Dach oder Keller als verhältnismäßig gering einzuschätzen. Wie in Abbildung 19 zu erkennen, führt dies zu verhältnismäßig geringen Mengen an vermiedenen CO₂-Emissionen. Eine Vollsanierung führt in allen Fällen zu den höchsten Werten, wobei eine Sanierung auf Passivhaus-Standard (P) aufgrund des geringen Energiebedarfs zu noch besserer CO₂-Einsparung als eine Sanierung nach GEG (S) führt.

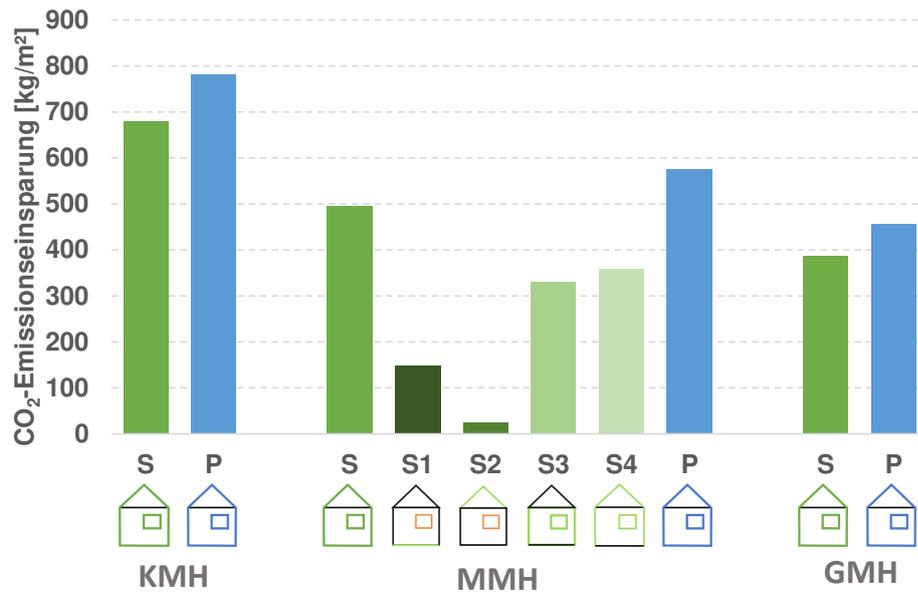


Abbildung 19: Vermiedene Menge an CO₂-Emissionen pro Wohnfläche der Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle für alle untersuchten Sanierungsstufen der Baualtersperiode 1958-78 in allen Gebäudegrößen.

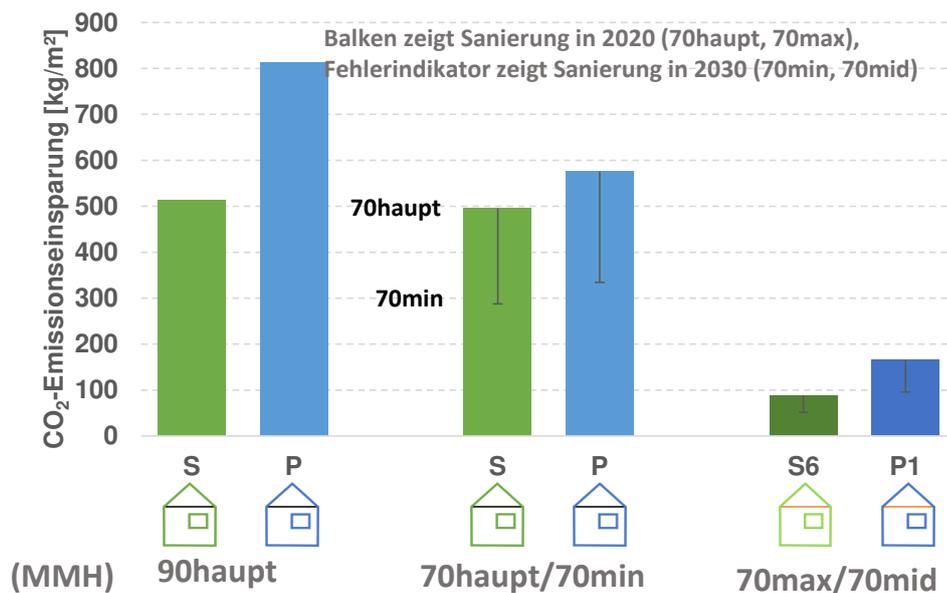


Abbildung 20: Vermiedene Menge an CO₂-Emissionen pro Wohnfläche der Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle für verschiedene Szenarien und Baualtersperioden des MMH. Die Ergebnisse der Szenarien mit einer Hüll-Sanierung im Jahr 2020 sind als farbige Balken dargestellt, die Unterschiede zu den Ergebnissen der Szenarien mit Hüll-Sanierung im Jahr 2030 als Fehlerindikatoren.

3.2 Sanierung des Heizungssystems

Die techno-ökonomische Bewertung der Erneuerung des Heizungssystems erfolgt anhand des in Kapitel 3.1 beschriebenen Szenarios 70haupt für das mittlere Mehrfamilienhaus. Für die Bewertung wird zuerst die spezifische Anfangsinvestition der einzelnen Systeme dargestellt (Kapitel 3.2.1). Anschließend werden die Energiekosteneinsparungen durch den Wechsel der Systeme präsentiert

(Kapitel 3.2.2), aus welchen sich der KW_{Mike} ableiten lässt (Kapitel 3.2.3). Abschließend werden die ökologischen Implikationen in Form von CO_2 -Emissionseinsparungen (Kapitel 3.2.4) bewertet. Details zur technischen Auslegung sind im Anhang (Kapitel 7.2.4) zu finden.

Um die Auswahl der Heizsysteme einzuschränken wurden Voruntersuchungen zum Kapitalwert verschiedener Heizsysteme durchgeführt. Hierbei wurde der Kapitalwert für Außenluft- und Erdsondenwärmepumpen in Sanierungsstufe S und P berechnet, der Bivalenzpunkt wurde dabei prozentual ausgehend von einer Auslegung auf 100% der maximalen Leistung bei einem Bivalenzpunkt von $-5^\circ C$ variiert. Die Ergebnisse der Voruntersuchung sind in Abbildung 21 dargestellt. Über fast alle Sanierungsstufen und Wärmepumpentypen hinweg stellen die Heizsysteme mit einer Auslegung des Bivalenzpunktes auf 60% die vorteilhaftesten Kapitalwerte dar. Daher werden diese Heizsysteme zusätzlich zu Systemen mit einer 100 % Auslegung bezogen auf den Bivalenzpunkt von $-5^\circ C$ in der kommenden Analyse untersucht.

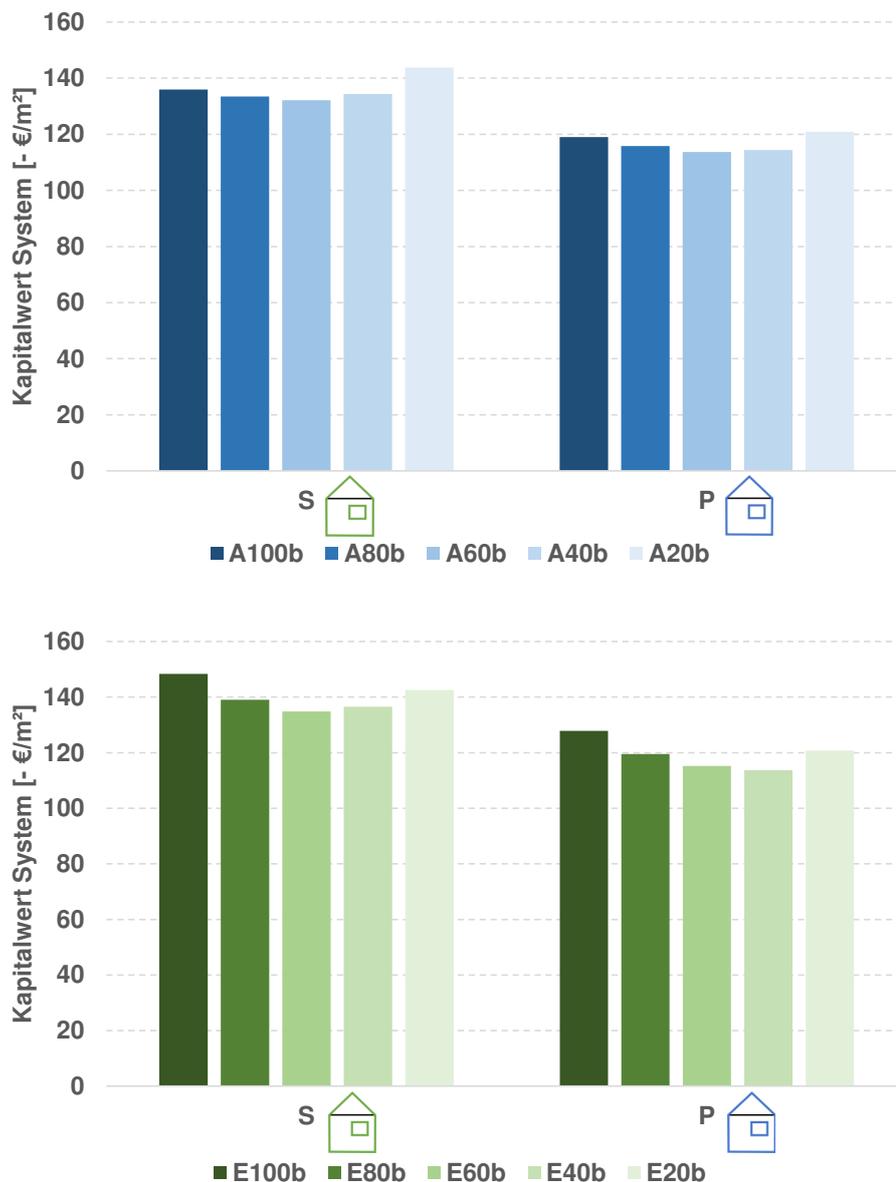


Abbildung 21: Kapitalwerte für Heizsysteme mit bivalenten Außenluftwärmepumpen (oben) bzw. Erdwärmepumpen (unten). Die Kapitalwerte sind für unterschiedliche Abstufungen der Leistung bezogen auf die maximale Leistung gegeben. 100% entspricht einem Bivalenzpunkt von $-5^\circ C$.

3.2.1 Anfangsinvestitionen

In Abbildung 22 ist die Höhe der spezifischen Anfangsinvestitionen der unterschiedlichen Systeme über die betrachteten Gebäude aufgeführt. Es ist deutlich zu erkennen, dass für alle Gebäudetypen der Gasbrennwertkessel als Referenzfall (BW) die niedrigsten Anfangsinvestitionen aufweist. Dies ist auf die sehr niedrigen spezifischen Investitionen für Gasbrennwertkessel zurückzuführen. Hinzu kommt, dass besonders bei einem hohen Wärmebedarf, wie im unsanierten Fall B1, die Brennwertkesseltechnologie im Vergleich zur Wärmepumpentechnologie höhere Skaleneffekte erzielen kann.

Die Außenluftwärmepumpe muss aufgrund der geringeren Qualität der Wärmequelle und daraus resultierend geringerer Jahresarbeitszahl größer ausgelegt werden als die Solewärmepumpe. Gleichzeitig liegt die spezifische Investition der Außenluftwärmepumpe über der der Solewärmepumpe. Nichtsdestotrotz liegen die Anfangsinvestitionen der Erdsondensysteme in den meisten Fällen über den Anfangsinvestitionen der entsprechenden Außenluftsysteme. Dies ist auf die hohe Investition für die Erdsonde (v.a. aufgrund der Bohrung) zurückzuführen.

Unter den Außenluftsystemen hat die monoenergetische Außenluftwärmepumpe die geringste Anfangsinvestition. In bivalenter Auslegung der Wärmepumpensysteme fallen zusätzlich zur Wärmepumpe noch Kosten für den Gaskessel an weshalb die Investitionen hier größer ausfallen als in monoenergetischer Arbeitsweise.

In Gebäuden mit einem relativ hohen Wärmebedarf, MMH58 und GMH58, ist bei den bivalenten Systemen mit einer Auslegung der Wärmepumpe auf 60% der maximalen Heizlast wieder der Skaleneffekt des Brennwertkessels zu erkennen. Durch den höheren Auslegungspunkt von +2 °C in dieser Betriebsart wird die Deckungsrate der Wärmepumpe am gesamten Wärmebedarf um ungefähr 10-18 Prozentpunkte gesenkt. Dadurch kann die installierte Leistung der Wärmepumpe verringert werden, welche den größten Anteil an den Anfangsinvestitionen ausmacht. Der restliche Wärmebedarf wird durch den Brennwertkessel gedeckt, welcher den Skaleneffekt bei der Investition aufweist. Hierdurch liegt die Anfangsinvestition dieser Systeme deutlich unter denen der 100%-Systeme.

Bei gleicher Auslegung von 100 % bezogen auf den Bivalenzpunkt von -5 °C liegt die Anfangsinvestition im bivalenten Fall (A100b und E100b) stets leicht über dem monoenergetischen (A100m und E100m). Dies ist darauf zurückzuführen, dass monoenergetisch die Spitzenwärmelast durch einen elektrischen Heizstab bereitgestellt wird, welcher geringere spezifische Investitionen aufweist als der Gasbrennwertkessel im bivalenten Fall.

Der unterschiedliche Wärmebedarf der Beispielgebäude ist gut an der Höhe der Anfangsinvestition auszumachen. Mit zunehmendem Sanierungsgrad von MMH58_B1 zu MMH58_P sinkt die installierte Leistung der Wärmebereitstellungstechnologie und daraus folgend die Anfangsinvestition um mehr als die Hälfte. Die Datenbasis für Investitionen unter 15 kW_{th} fällt im Falle der Außenluftwärmepumpen detaillierter aus als für die Solewärmepumpen. Hierdurch nähert sich beim KMH58_S das Niveau der Außenluftsysteme an das der Erdsondensysteme an.

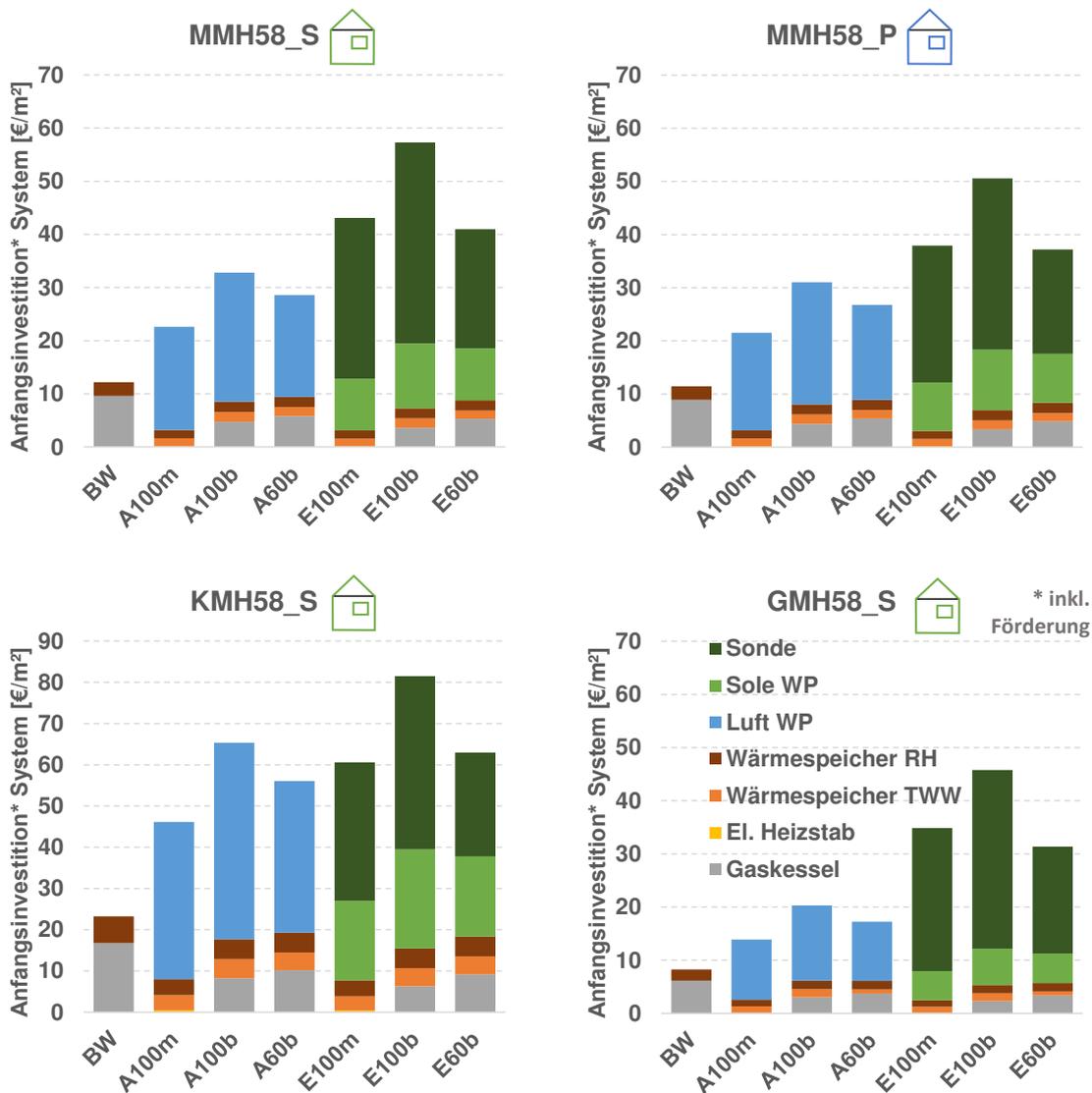


Abbildung 22: Spezifische Anfangsinvestitionen pro Wohnfläche der einzelnen Systeme pro Gebäude (KMH: kleines, MMH: mittleres, GMH: großes Mehrfamilienhaus; B1: original, S: Sanierung nach GEG, P: Passivhaus-Standard), aufgeschlüsselt nach Kostenanteil der Komponenten.

3.2.2 Energiekosteneinsparungen

In Abbildung 23 sind die diskontierten Energiekosteneinsparungen der einzelnen Systeme bezogen auf die Wohnfläche dargestellt. Die Energiekosteneinsparungen beziehen sich auf das Referenzsystem, beschrieben in Kapitel 1.3.2.

Das Zusammenspiel einer vergleichsweise hohen Deckungsrate der Wärmepumpe an der Wärmeerzeugung, der hohen Jahresarbeitszahl und daraus resultierend den geringsten Verbrauchskosten bedeuten dabei das beste Ergebnis für das System E100b. Das entsprechende monoenergetische System weist höhere Energieausgaben auf, da die Verbrauchskosten des elektrischen Heizstabs über denen des Brennwertkessels liegen.

Besonders bei Sanierung der Gebäude nach GEG (S) lässt sich der monetäre Vorteil der LowEx-Systeme gegenüber dem Gasbrennwertkessel erkennen. Durch die Möglichkeit entgeltlos Wärme aus Niedertemperaturquellen zu nutzen, erreichen die Energiekosteneinsparungen im Gebäudezustand S

ein hohes Niveau. Der Unterschied zum BW-System wird unter Berücksichtigung von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle geringer, was auf die Abnahme des Wärmebedarfs zurückzuführen ist.

Die drei Gebäudegrößen auf derselben Sanierungsstufe weisen unterschiedliche spezifische Energiekosteneinsparungen auf. Dies ist sowohl auf die unterschiedliche Gebäudegeometrie wie auch die Bewohnerzahl pro Wohnfläche und deren Trinkwarmwasserbedarf zurückzuführen. So ist das Verhältnis zwischen dem Wärmebedarf für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser zum gesamten Wärmebedarf in GMH_S im Vergleich zum MMH_S und KMH_S am geringsten. Das Niveau der Energiekosteneinsparungen ist hier am höchsten. Das Verhältnis Trinkwarmwasserbedarf zu Raumwärmebedarf ist im Fall des KMH_S am höchsten und die Energiekosteneinsparungen am geringsten. Für das höher temperierte Trinkwarmwasser im Kontrast zur Raumwärme muss in den Systemen die Wärmepumpe mit relativ niedrigen Leistungszahlen operieren oder zum großen Teil die Spitzenlasttechnologie eingesetzt werden. Beides führt zu höheren Verbrauchskosten.

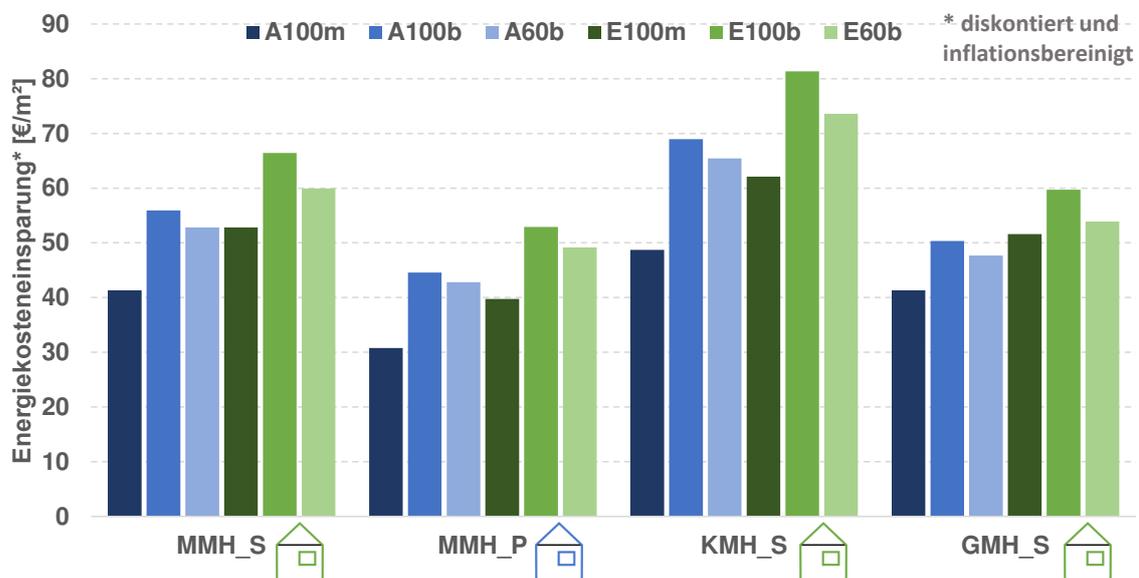


Abbildung 23: Diskontierte spezifische Einsparung bei den Energie-Bezugskosten pro Wohnfläche über den Betrachtungszeitraum für alle LowEx-Systeme über alle Gebäude.

3.2.3 Kapitalwert der energiebedingten Mehrinvestition

Die Ergebnisse für KW_{Mikro} im Szenario COP1 sind in Abbildung 24 dargestellt. Es ist auffällig, dass der Wechsel des Heizsystems in fast allen Fällen als wirtschaftlich nach der Kapitalwertmethode zu bewerten ist. Nur für den Fall der bivalenten Außenluftwärmepumpe mit Auslegung auf 100% (A100b) des KMH_S mit relativ hohem Wärmebedarf ist ein Systemwechsel nicht wirtschaftlich. Hier übersteigt die Anfangsinvestition die diskontierten Energiekosteneinsparungen.

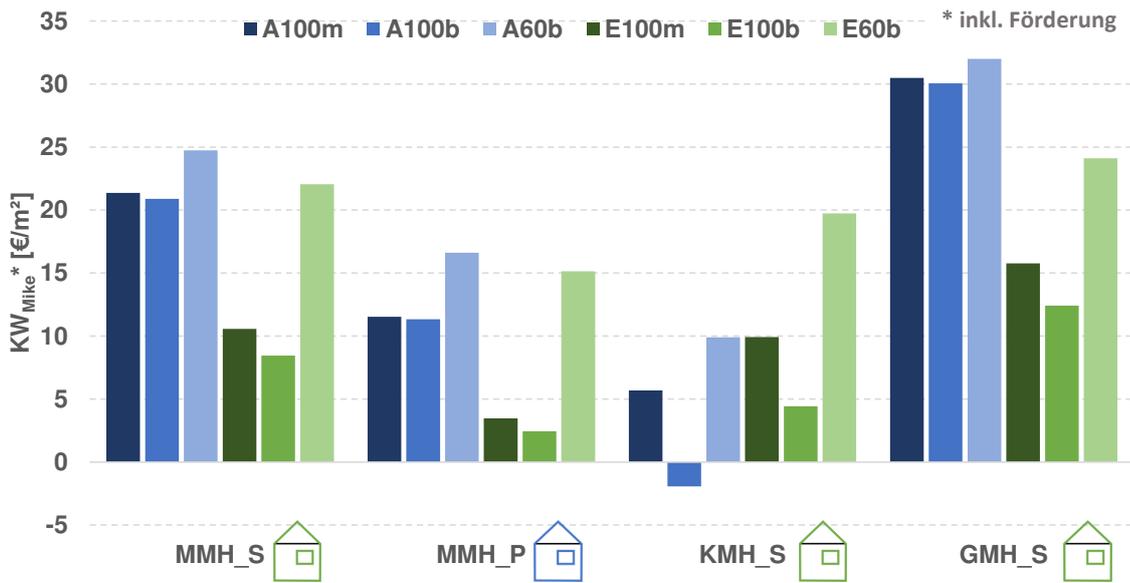


Abbildung 24: KW_{Mike} pro Wohnfläche für alle LowEx-Systeme über alle Gebäude.

3.2.4 CO₂-Emissionseinsparungen

Um die Umstellung des Heizsystems ökologisch zu bewerten, sind in Abbildung 25 die spezifischen kumulierten CO₂-Emissionseinsparungen pro Wohnfläche angegeben. Hier ist zu erkennen, dass das bivalente System mit Außenluftwärmepumpe und Auslegung auf 60% (A60b) für alle Gebäudetypen die höchsten CO₂-Emissionen und somit die geringste Einsparung verursacht.

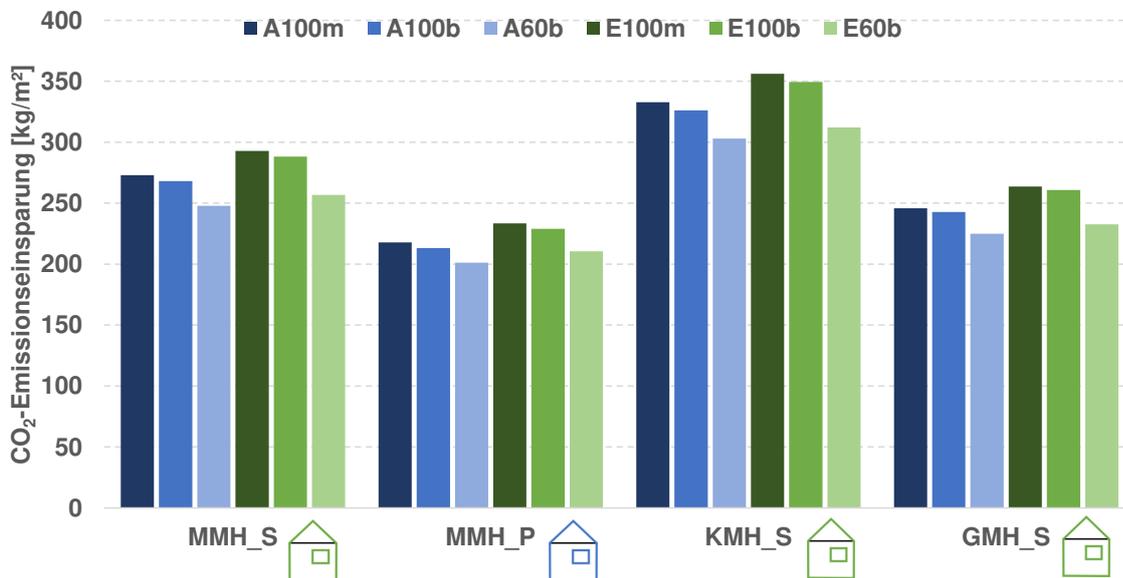


Abbildung 25: Vermiedene spezifische kumulierte CO₂-Emissionen in t_{CO2} pro Wohnfläche für alle Systeme über alle Gebäude über den Betrachtungszeitraum.

Im Vergleich der LowEx-Systeme liegen die Außenluftsysteme mit ihren CO₂-Einsparungen bei allen Gebäudevarianten unter den Erdsondensystemen. Dies ist auf den höheren Strombedarf durch die niedrigeren Jahresarbeitszahlen der Luftwärmepumpen zurückzuführen. Bei den Außenluft- oder Erdsondensystemen weisen die A60b und E60b mit den kleiner ausgelegten Wärmepumpen jeweils die

niedrigsten CO₂-Einsparungen auf. Hier treibt die geringere Effizienz des Gasbrennwertkessels die Emissionen an. Mit derselben Auslegung von 100 %, führen die bivalenten Systeme A100b und E100b jeweils zu geringeren Emissionseinsparungen als die monoenergetischen Systeme A100m und E100m. Dies wird durch den geringen Emissionsfaktor des Gaskessels im Vergleich zum elektrischen Heizstab hervorgerufen. Allerdings sind die Unterschiede sehr klein.

3.3 Zusammenfassung der Voruntersuchung

In diesem Kapitel wurde das techno-ökonomische Potential zum einen von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle und zum anderen von LowEx-Systemen zur Bereitstellung von Wärme für Mehrfamilienhäuser im Bestand getrennt voneinander untersucht. In der techno-ökonomischen Bewertung wurden zunächst die Anfangsinvestition sowie Energiekosteneinsparungen berechnet. Diese beiden Werte wurden dann einander gegenübergestellt und als Kapitalwert der energiebedingten Mehrinvestition KW_{Mik} ausgedrückt. Die Energiekosteneinsparungen stellen die Einnahmen über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren dar. Die Gesamtausgaben umfassen des Weiteren auch die anfallenden Wartungskosten.

Betrachtet man die Hüllsanierung und die Systemsanierung getrennt voneinander, kann man auf beiden Seiten ein Potential erkennen, die CO₂-Emissionen eines Gebäudes zu senken. Die Hüllsanierungen können anhand der Kapitalwertmethode unter den Annahmen dieser Studie in den meisten Fällen als wirtschaftlich bewertet werden, wie auch ein Wechsel des Heizungssystems.

Ein Resultat der Untersuchung ist, dass die Einzelmaßnahmen an Dach oder Kellerdecke sich wirtschaftlich nicht lohnen, da der Kapitalwert der energiebedingten Mehrinvestitionen in diesen beiden Fällen negativ ist. Des Weiteren können durch das Sanieren auf Sanierungsstufe P die CO₂-Emissionen stärker reduziert werden als durch die Sanierung auf Sanierungsstufe S. Allerdings sinkt der Kapitalwert stärker als die CO₂-Reduktionen steigen.

Als Resultat aus der Heizsystembewertung ist zu vermerken, dass die Erdsondensysteme in vielen Fällen nach der Kapitalwertmethode besser zu bewerten sind als die Außenluftsysteme. In Gebäude mit einem relativ hohen Wärmebedarf schneiden die monoenergetischen Systeme besser ab als die bivalenten. Nichtsdestotrotz ist im mittleren Mehrfamilienhaus zu beobachten, dass die Auswahl des wirtschaftlicheren Heizsystems stark von der Sanierungsstufe und damit dem Wärmebedarf abhängt. Hier muss des Weiteren auf das Verhältnis zwischen Trinkwarmwasser- und Raumwärmebedarf geachtet werden.

4 Techno-ökonomische Bewertung von Kombinationen von System- und Hüllsanierung

In diesem Abschnitt werden mögliche Maßnahmenkombinationen techno-ökonomisch bewertet, also Kombinationen aus Maßnahmen auf der Seite der Wärmebereitstellungstechnologie und Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle. Als Ausgangslage für die Untersuchung wird das Szenario 70haupt angenommen, bei welchem die Wärmebereitstellungstechnologie ausgewechselt werden muss. In diesem Fall gilt es aus techno-ökonomischer Sicht zu bewerten, welches Wärmebereitstellungssystem den größten wirtschaftlichen Mehrwert bewirkt und wie Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle die Bewertung beeinflussen. Als Bestandsgebäude wird ein typisches mittleres Mehrfamilienhaus, Baualtersperiode von 1958 bis 1978, betrachtet. Das Referenzsystem und die anfallenden Sowieso-Kosten werden in Kapitel 2.5 beschrieben. Die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle erreichen den Sanierungsgrad S.

Zunächst wird die mögliche Einsparung der CO₂-Emissionen im Vergleich zum Ausgangszustand betrachtet (Kapitel 4.1). Darauf folgend wird auf den Kapitalwert der Gesamtausgaben eingegangen und dessen Zusammensetzung aus Anfangsinvestition, Energiebezugs- und Wartungsausgaben dargestellt (Kapitel 4.2). Die resultierenden Energiekosteneinsparungen werden anschließend analysiert (Kapitel 4.3). Abschließend wird die Wirtschaftlichkeit anhand des Kapitalwerts der energiebedingten Mehrauszahlungen (Kapitel 4.4), der Amortisationszeit und des internen Zinsfußes (Kapitel 4.5) bewertet. Details zur technischen Auslegung sind im Anhang (Kapitel 7.2.5) zu finden.

4.1 Reduktion der CO₂-Emissionen

In Abbildung 26 sind die vermiedenen Mengen an CO₂-Emissionen dargestellt. Hohe CO₂-Einsparungen sind nur zu erreichen, wenn gleichzeitig Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle zusätzlich zur Änderung des Heizsystems durchgeführt werden. Im Vergleich der einzelnen LowEx-Systeme ist zu erkennen, dass die monoenergetischen Systeme höhere Werte erreichen als die bivalenten. Gleichzeitig reduzieren die 100%-Systeme eine größere Menge an CO₂-Emissionen als die 60%-Systeme, da im ersten Fall die Wärmepumpe größer ausgelegt wird und so auch die Deckungsrate, also der Anteil der in der Wärmepumpe erzeugten Wärme an der Wärmeerzeugung, größer ist. Durch den geringen Energiebedarf und den abnehmenden CO₂-Emissionsfaktor im deutschen Strommix bis 2040 führt die elektrische Erzeugung von Wärme zu geringeren CO₂-Emissionen als die gasbetriebene Erzeugung. Abschließend ist in Abbildung 26 zu erkennen, dass die höhere Jahresarbeitszahl bei den Erdsondensystemen zu den höchsten CO₂-Reduktionszahlen führt.

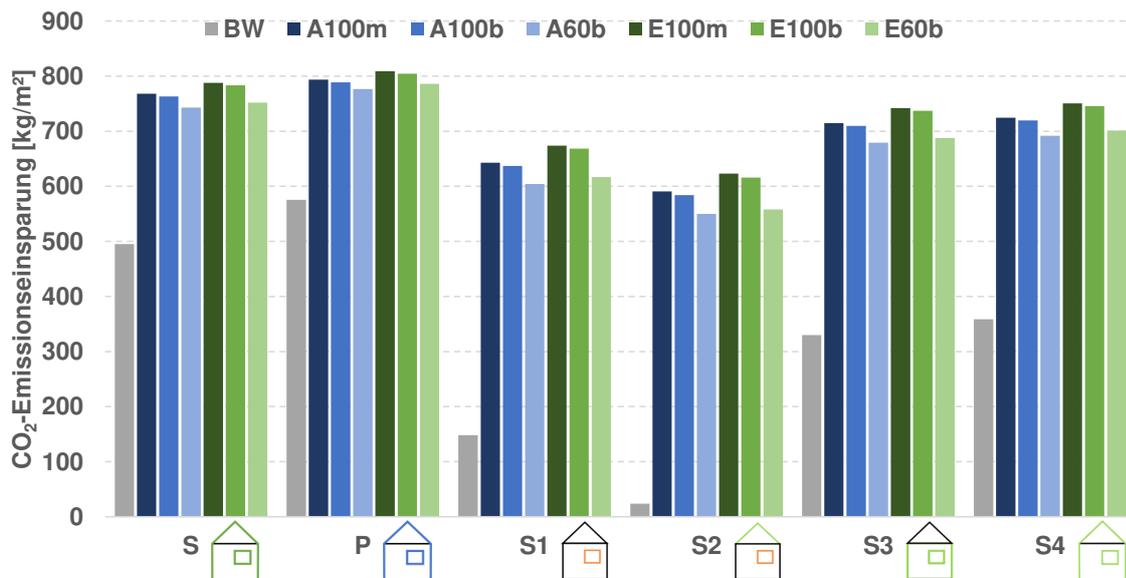


Abbildung 26: Vermiedene spezifische kumulierte CO₂-Emissionen in kg_{CO2} pro Wohnfläche für alle Systeme über alle Sanierungsmaßnahmen für das Gebäude MMH 1958-78. Im Ausgangszustand beträgt die kumulierte CO₂-Emission 0,98 t/m² (gesamt: 572 t).

4.2 Gesamtausgaben

In Abbildung 27 ist der Kapitalwert der Gesamtausgaben der verschiedenen LowEx-Systeme für alle Sanierungsmaßnahmen dargestellt. Die Balken sind farblich in die unterschiedlichen Ausgabenpositionen unterteilt. An dieser Abbildung ist gut zu erkennen, welcher Anteil der Gesamtausgaben auf die Investition in die Wärmebereitstellungstechnologie und welcher auf die Investition in die Sanierungsmaßnahme entfällt. Des Weiteren ist gut zu erkennen, wie die Energieausgaben die Gesamtausgaben beeinflussen. In diesem Abschnitt werden finanzielle Fördermöglichkeiten bei Sanierungsmaßnahmen und Systemwechsel nicht berücksichtigt. Der Einfluss der Nichtinanspruchnahme von Fördermaßnahmen auf die Kapitalwerte wird in Kapitel 5.3.3 näher betrachtet.

Über alle Hüllmaßnahmen hinweg sind die Gesamtausgaben des Brennwertkesselsystems zum größten Teil über die Ausgaben für den Gasbezug bestimmt. Dies führt trotz geringerer Investitionskosten in das Heizsystem zu erhöhten Kapitalwerten und somit höheren Gesamtkosten über die Lebenszeit des Systems gegenüber den Wärmepumpensystemen. Von den Wärmepumpensystemen ist, wie im vorherigen Kapitel 3.3 beschrieben, die Wahl eines bivalenten Systems mit Auslegung auf 60% der maximalen Last wirtschaftlich zu bevorzugen.

Bei den Sanierungspaketen in Kombination mit Hüllmaßnahmen liegen die Anfangsinvestition für LowEx-Systeme deutlich über denen für das Brennwertkesselsystem. Hiervon ist die günstigste Variante S3, die eine Sanierung der Fassade und Fenster beinhaltet. Bei dieser Variante sind die Energieeinsparungen sehr hoch, bei gleichzeitig geringer Investition in die Hüllsanierung.

Anhand von Abbildung 27 wird allerdings deutlich, dass für die Erdsonden-Sanierungspakete der Anteil der Energieausgaben an den Gesamtausgaben in vielen Fällen geringer ist als der Anteil der Anfangsinvestition.

Es ist auffällig, dass die Anfangsinvestition für die Erdsondensysteme in den meisten Fällen über der für die Außenluftsysteme liegt. Das ist in erster Linie auf die hohen Investitionen für die Erdbohrung zurückzuführen. Obwohl die Erdsondensysteme auf Grund der höheren JAZ mit einer geringeren Kapazität für die Wärmepumpe ausgelegt werden können und die spezifischen Kosten für die Solewärmepumpen unter denen der Außenluftwärmepumpen liegen, liegt die Anfangsinvestition der

Solewärmepumpensysteme inklusive Erdbohrung zwischen 50 % und 60 % über der Anfangsinvestition der Luftwärmepumpensysteme.

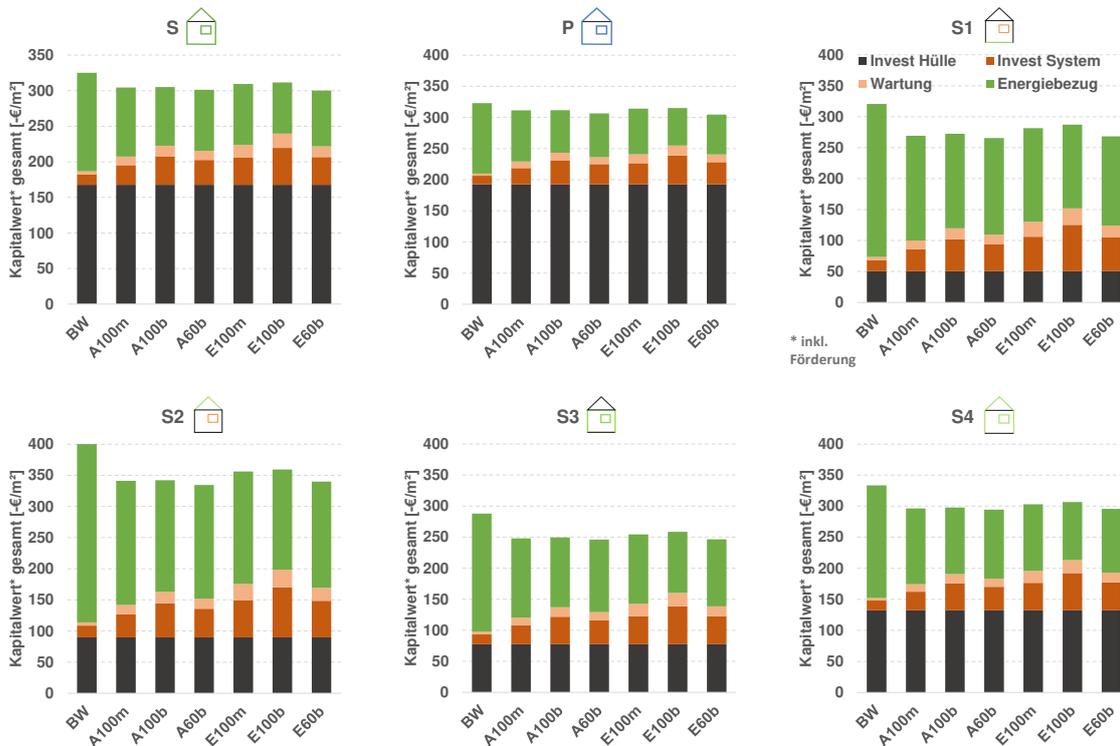


Abbildung 27: Kapitalwert der Gesamtausgaben über die einzelnen Systeme für alle Sanierungsmaßnahmen für das Gebäude MMH 1958-78.

4.3 Energiekosteneinsparungen

Abbildung 28 zeigt die Energiekosteneinsparungen gegenüber dem Bestandszustand. Über alle Hüllmaßnahmen hinweg lässt sich der monetäre Vorteil der Low-Ex-Systeme gegenüber dem Gasbrennwertkessel erkennen. Durch die Möglichkeit, entgeltlos Wärme aus Niedertemperaturquellen zu nutzen, erreichen die Energiekosteneinsparungen der Wärmepumpensysteme das teilweise mehrfache Niveau des Gasbrennwertkessels. Bei Sanierungspaketen mit Hüllsanierung beträgt die Energiekosteneinsparungen bis zu 230 €/m². Der Unterschied zwischen Gasbrennwertkessel und LowEx-Systemen wird unter Berücksichtigung von Sanierungsmaßnahmen mit hohem Energieeinsparpotential an der Gebäudehülle (S und P) geringer, was auf die Abnahme des Wärmebedarfs zurückzuführen ist.

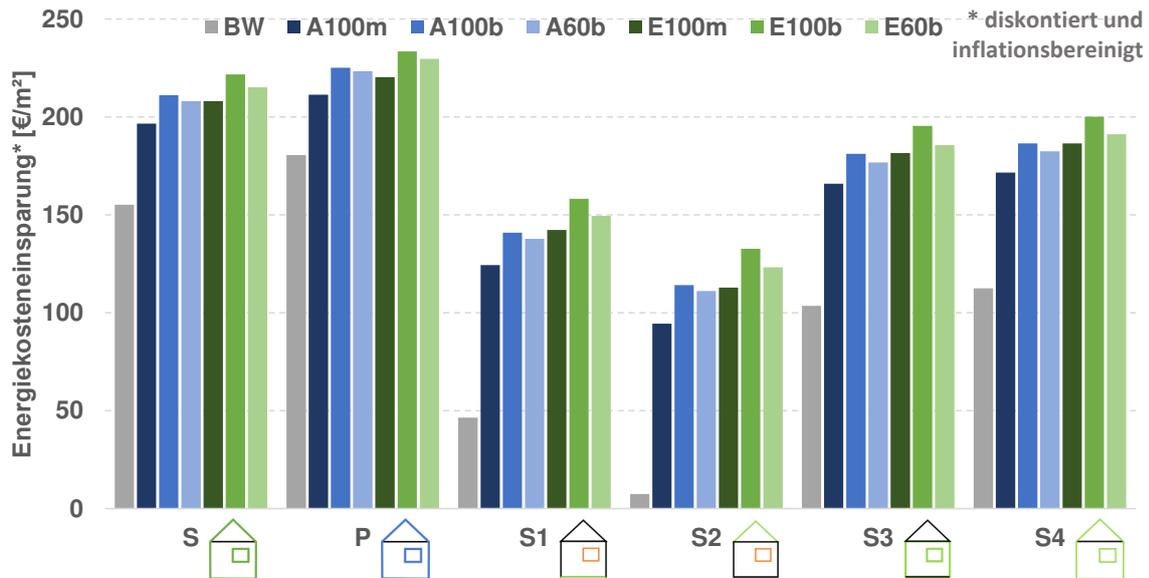


Abbildung 28: Diskontierte kumulierte Energiekosteneinsparung im Vergleich zum Bestandsgebäude über den gesamten Betrachtungszeitraum für alle LowEx-Systeme über alle Sanierungsmaßnahmen für das Gebäude MMH 1958-78.

4.4 Kapitalwert der energiebedingten Mehrinvestition

In Abbildung 29 ist der Kapitalwert der energiebedingten Mehrinvestition, KW_{Mike} , dargestellt für alle Szenarien. Es ist gut zu erkennen, dass der KW_{Mike} für fast alle LowEx-Systeme positiv ist (=geringerer Kapitalwert). Ausnahme hiervon ist S2, welches nur eine Dämmung des Dachstuhls vorsieht. Hierbei sind jedoch die Kosten der Hüllsanierung zu hoch im Vergleich zur geringen Energieeinsparung und können nicht kompensiert werden. Über alle Szenarien hinweg liefern die Brennwertkesselsysteme den unvorteilhaftesten KW_{Mike} und sind somit unattraktiver als LowEx-Systeme. Wie für den Kapitalwert ist auch der KW_{Mike} der bivalenten Systeme mit Auslegung auf 60% am höchsten und somit den anderen Heizsystemen zu bevorzugen. Erdsondensysteme schneiden hierbei geringfügig schlechter ab als Systeme mit Außenluftwärmepumpe.



Abbildung 29: KW_{Mike} pro Wohnfläche für alle LowEx-Systeme über alle Sanierungsmaßnahmen für das Gebäude MMH 1958-78.

4.5 Amortisationszeit und interner Zinsfuß

In Abbildung 30 ist die dynamische Amortisationsdauer für alle Szenarien dargestellt. Über fast alle Hüllsanierungsmaßnahmen hinweg liegt die Amortisationsdauer des Brennwertkessels über der der Wärmepumpensysteme und ist somit unvorteilhafter als ein LowEx-System. Bei den LowEx-Systemen weisen monoenergetische Wärmepumpen größtenteils eine geringere Amortisationsdauer als bivalente Systeme auf, aufgrund der hohen Anfangsinvestition liegt hierbei jedoch die Amortisationsdauer der Erdsondenwärmepumpen über der von Außenluftwärmepumpen. Es ist jedoch hinzuzufügen, dass ein hoher Anteil aller Heizsysteme Amortisationsdauern jenseits 25 Jahren besitzt.

Die geringste Amortisationsdauer ist bei der Hüllsanierung S1 zu sehen, welche nur eine Bodensanierung des untersten Geschosses beinhaltet. Hierbei treffen geringe Kosten auf eine hohe Energieeinsparung was wiederum zu einer frühen Amortisation der Sanierung führt. Dabei stellt wiederum das bivalente Außenluftwärmepumpensystem mit Auslegung auf 60% die geringste Amortisationsdauer dar.

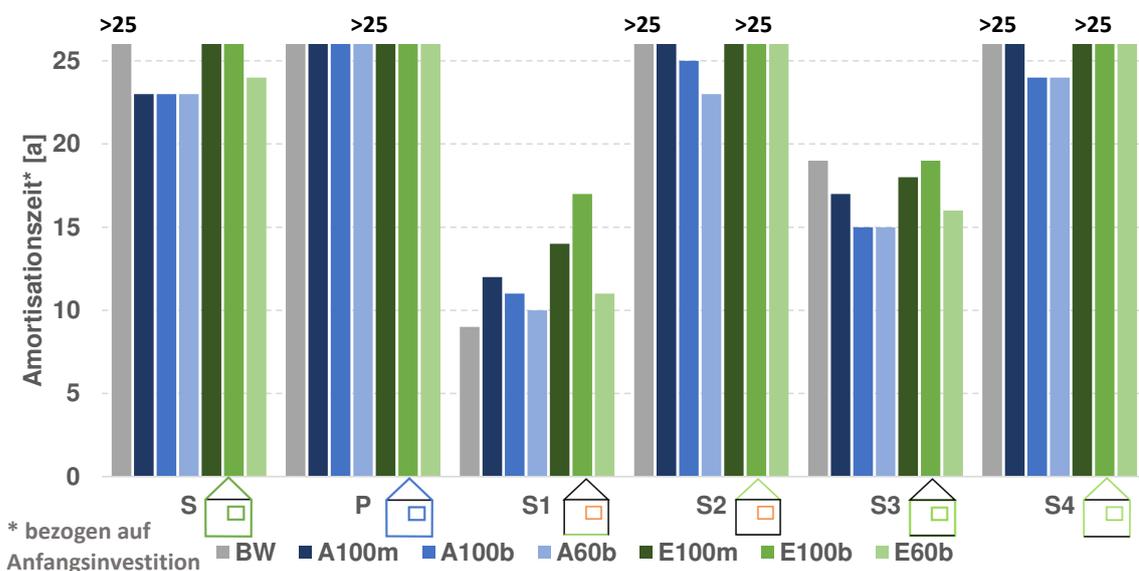


Abbildung 30: Dynamische Amortisationsdauer für alle LowEx-Systeme über alle Sanierungsmaßnahmen für das Gebäude MMH 1958-78.

Der interne Zinsfuß der einzelnen Systeme ist in Abbildung 31 dargestellt. Zur Orientierung ist als gestrichelte Linie die Diskontierungsrate der Hauptanalyse angegeben. Der Großteil der Systeme ist als wirtschaftlich mit Bezug auf die Diskontierungsrate zu bewerten. Im Vergleich der Systeme zueinander weist das Brennwertsystem die niedrigsten Werte für den internen Zinsfuß auf. Für S2 ist hier sogar ein negativer Zinsfuß errechnet, da hier einer hohen Investition eine geringe Energiekosteneinsparung gegenübersteht. Vergleicht man die Ergebnisse mit denen des KW_{Mike} ist der Geldwert der Investition der LowEx-Systeme in den meisten Fällen höher als der des Brennwertkessels.

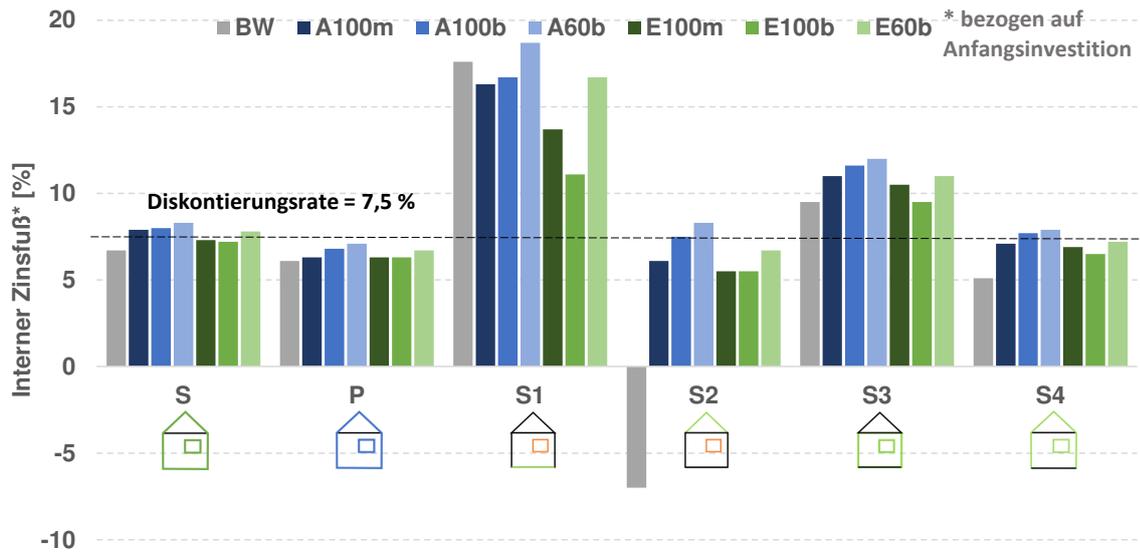


Abbildung 31: Interner Zinsfuß für alle LowEx-Systeme über alle Sanierungsmaßnahmen für das Gebäude MMH 1958-78.

5 Akteursperspektiven und Sensitivitätsanalyse

In der Hauptanalyse werden die LowEx-Systeme in erster Linie anhand der Anfangsinvestition und Einnahmen durch Energiekosteneinsparungen beurteilt. In Gebäuden mit vermieteten Wohneinheiten stellt dies eine zusammengefasste Betrachtung der divergierenden Interessen unterschiedlicher Akteure dar. Ein Vergleich von monoenergetischen und bivalenten Systemen bei einer GEG-Sanierung wird in Kapitel 5.1 anhand der spezifischen Kosten für Wärme gezeigt. In Kapitel 5.2 wird näher auf die Akteursperspektive des Investors oder Vermieters und der Mietparteien in einem mittleren Mehrfamilienhaus, Baualtersperiode 1958-1978, eingegangen. Des Weiteren werden in Kapitel 5.3 die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse vorgestellt. Diese ist wichtig, um einen Eindruck über die Robustheit der Ergebnisse der Hauptanalyse zu erhalten.

5.1 Vergleich von monoenergetischen und bivalenten Systemen bei GEG-Sanierung

Die bisher gezeigten Ergebnisse sind kumulierte Werte über den gesamten Betrachtungszeitraum. In Abbildung 32 wird der zeitliche Verlauf von spezifischen CO₂-Emissionen und spezifischen Kosten für Wärme betrachtet. Die Analyse erfolgt anhand des GEG-sanierten (S) MMH der BAP 1958-78 mit Hüllsanierung im Jahr 2020 (Szenario 70haupt) für die monoenergetischen und 60 % bivalenten Luft- und Sole-Wärmepumpensysteme und dem Gaskesselsystem als Vergleichswert.

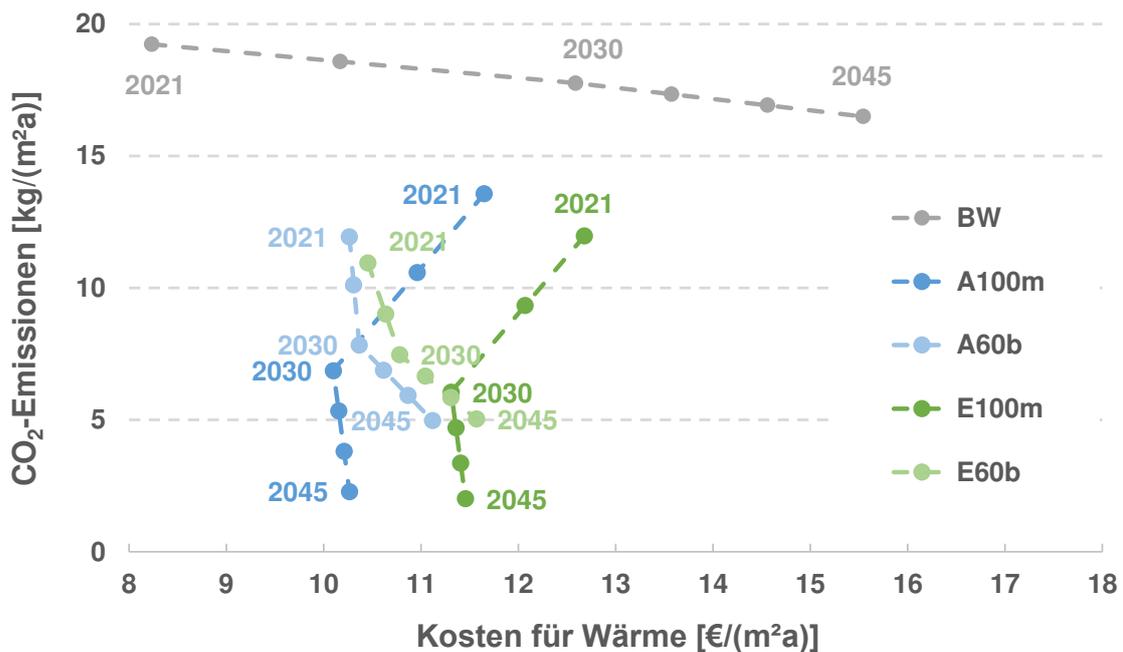


Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf von spezifischen CO₂-Emissionen und spezifischen Kosten für Wärme des GEG-sanierten MMH der BAP 1958-78 für den Brennwertkessel (BW) und monoenergetische und 60 % bivalente Wärmepumpensysteme (A100m = monoenergetische Außenluft-WP, A60b = bivalente Außenluft-WP, E100m = monoenergetische Sonden-WP, E60b = bivalente Sonden-WP). Die Ergebnisse sind unter Berücksichtigung von Fördersätzen angegeben.

Grundsätzlich zeigen alle Systeme sinkende CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2045. Während die Emissionen des Brennwert-Systems nur leicht sinken, steigen die Kosten vergleichsweise stark. Dies ist auf den Verlauf der spezifischen CO₂-Emissionen und Energiebezugskosten von Gas zurückzuführen. Die Wärmepumpensysteme zeigen stark sinkende Emissionen und geringere Veränderungen der Kosten. Der Verlauf der spezifischen CO₂-Emissionen und Energiebezugskosten

von Strom ist in den aufgetragenen Werten der monoenergetischen Wärmepumpensysteme zu erkennen.

Während das Brennwert-System über den gesamten Betrachtungszeitraum die höchsten CO₂-Emissionen hat, verursacht es die geringsten Kosten für Wärme in den ersten zehn Jahren des Betrachtungszeitraums. Bis zum Jahr 2030 weisen alle Wärmepumpensysteme geringere Kosten als das Brennwert-System auf. Verglichen mit den bivalenten Systemen, starten die monoenergetischen Systeme mit höheren Kosten, verursacht durch die deutlich höheren Energiebezugskosten für Strom als für Gas im Jahr 2021. Im Laufe des Betrachtungszeitraums ändert sich dieses Verhältnis, so dass bis zum Jahr 2035 die monoenergetischen Systeme geringere Kosten verursachen als die bivalenten. Dies gilt insbesondere für die Luft-Wärmepumpen. Durch die höheren Investitionskosten fallen für die Sole-WP-Systeme generell höhere Kosten an als für die Luft-WP-Systeme.

Eine detaillierte Aufstellung der Ergebnisse für das MMH im Szenario 70haupt ist in Anhang 0 mit und ohne Förderung zu finden.

5.2 Akteursperspektive - Veränderung der Warmmiete

In Abbildung 33 werden die beiden Akteursperspektiven zusammengeführt. Dargestellt sind die kumulierten Ein- und Auszahlungen für das monoenergetische Außenluftwärmepumpensystem, in Kombination mit einer Hüllsanierung nach GEG (S) (A100m). Der Aufschlag auf die Kaltmiete stellt die Einnahmen des Investors oder Vermieters durch die Modernisierungsumlage dar, welche gleichzeitig eine Mehrbelastung für die Mieter bedeuten, siehe Kapitel 2.2. Die Energiekosteneinsparungen wiederum betreffen direkt nur die Mieter und stellen für diese eine finanzielle Entlastung dar. Die resultierende Differenz zwischen dem Aufschlag auf die Kaltmiete und den Energiekosteneinsparungen stellt die Veränderung der Warmmiete dar. Die Wartungskosten sind in dieser Analyse nicht berücksichtigt. Aufgetragen ist der Verlauf über 25 Jahre. Der schraffierte Bereich stellt den Lösungsbereich für eine Variation des Diskontierungszinssatzes dar, zwischen 0 % und 11 %. Die gestrichelte schwarze Linie repräsentiert die energiebedingte Mehrinvestition (ΔInv) des Investors oder Vermieters. Es darf als Ziel des Vermieters angesehen werden, dass dieser über die Modernisierungsumlage die getätigte energiebedingte Mehrinvestition amortisieren möchte.

Es wird deutlich, dass sich die Investition für den Vermieter für den angenommenen Zinssatz von 7,5 % und darunter in dem Betrachtungszeitraum amortisiert. Allerdings beträgt die Amortisationsdauer 21 Jahre. Unter der Annahme eines wesentlich höheren Diskontierungssatzes würde sich die Investition nicht im Betrachtungszeitraum amortisieren. Die Energiekosteneinsparungen für die Mieter zeigen einen nur geringfügig steileren, negativen Anstieg als der Aufschlag der Kaltmiete. Dies resultiert in einer Reduktion der Warmmiete für die Mietparteien für alle betrachteten Diskontierungssätze zwischen 0 % und 7,5 %. Für den Diskontierungssatz von 11 % ist eine leichte Erhöhung der Warmmiete zu erwarten.

In Abbildung 34 ist die Veränderung der Warmmiete für alle Sanierungspakete dargestellt. Unter den Annahmen führt etwa die Hälfte der betrachteten Kombinationen aus Hüll- und Systemsanierung im Fall des COP1-Szenarios zu einer Minderung der Warmmiete. Das heißt, dass die Mieter durch das SP weniger Warmmiete als im Referenzfall zahlen müssen. Dementsprechend sind die Einnahmen durch die Energiekosteneinsparungen größer als der Anstieg der Kaltmiete durch die Modernisierungsumlage. Ausnahmen hiervon stellen viele Brennwertsysteme dar: unter Einbeziehung zukünftig ansteigender Gasbezugskosten führt dies in den meisten Fällen zu einem Anstieg der Warmmiete. Zusätzlich stellt sich eine Sanierung auf Passivhausstandard sowie der Einsatz von Solewärmepumpen als negativ für die Mieter dar. In diesem Fall sind die Anfangsinvestitionen und die daraus resultierende Modernisierungsumlage zu hoch, um durch die Energiekosteneinsparungen kompensiert zu werden.

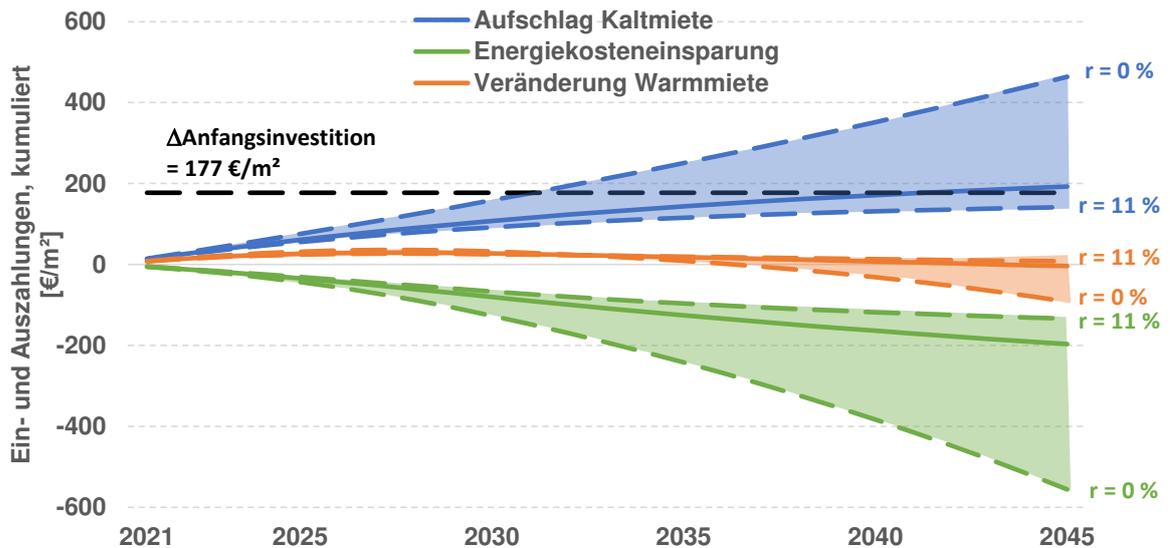


Abbildung 33: Kumulierte diskontierte Einsparungen und Aufwendungen (Kapitalwert) für SP A100m (Gebäude MMH 1958-78) bei einer Diskontierungsrate von 7,5 %. Der schraffierte Bereich stellt den Lösungsbereich für eine Variation der Diskontierungsrate zwischen 0 % und 11 % dar.



Abbildung 34: Veränderung der Warmmiete (Kapitalwert) über den Betrachtungszeitraum für alle Systeme und Sanierungsmaßnahmen (Gebäude MMH 1958-78).

5.3 Sensitivitätsanalyse

Über die Sensitivitätsanalyse sollen verschiedene Unsicherheiten der Ergebnisse sowie bestimmte mögliche Szenarien und Entwicklungen näher untersucht werden. Wie aus Kapitel 2 hervorgeht, ist ein großer Unsicherheitsfaktor die Bestimmung der Anfangsinvestition. Das Bestimmtheitsmaß der Kostenfunktion ist niedrig und die tatsächlich auftretende Höhe der Investition stark abhängig von den individuellen Gebäuden. Dazu kommt, dass die gesetzlichen Rahmenbindungen einen großen Einfluss auf die Investitionsentscheidung haben. So bestehen diverse gesetzliche Verpflichtungen für die Durchführung von Sanierungsmaßnahmen. Gleichzeitig bietet die KfW unterschiedliche

Fördermöglichkeiten an. Für die techno-ökonomische Analyse sind Annahmen über die Wärmebereitstellungstechnologie maßgeblich für die Ergebnisse. Mit welchem Nutzungsgrad oder mit welcher Jahresarbeitszahl die Wärmebereitstellungstechnologie eingesetzt wird, verändert die mögliche Endenergieeinsparung. Welche Endenergiepreise angenommen werden, beeinflusst daraufhin die Profitabilität der Sanierung. Diese Punkte werden in dem folgenden Abschnitt adressiert.

5.3.1 Parametervariation

Abbildung 35 zeigt den Einfluss verschiedener Parameter auf das Ergebnis des Kapitalwerts. Untersucht wird der Einfluss, analog zu Abschnitt 5.2, anhand des Systems A100m für ein mittleres Mehrfamilienhaus, Baualtersperiode 1958-78 Sanierungsstufe S. Der Einfluss wird in Form eines Tornadodiagramms gezeigt. Die Parameter werden jeweils einzeln um eine Variationsrate von $\pm 15\%$ variiert. In Abbildung 35 zeigen die blauen Balken die Variation des Eingangsparameters um negative 15 %. Der orangene Balken zeigt eine Variation um positive 15 % an. Die Investition in die Hülle hat den größten Einfluss, da durch dessen Niveau insbesondere die Energieausgaben im Referenzfall beeinflusst werden und hierdurch die Möglichkeiten der Energiekosteneinsparung. Eine Veränderung des Preises um -15 % führt zu einer Verringerung des Kapitalwerts um $\sim 8\%$. Das Ergebnis verhält sich symmetrisch für eine Zunahme von +15 %. Als nächstes hat die Variation des Diskontierungssatzes um 15 % einen Einfluss von rund 2,5 % auf den Kapitalwert. Den drittgrößten Einfluss hat die Nutzungsdauer der Hülle, wobei diese einen gegenüber der Anfangsinvestition in die Hülle entgegengesetzten Einfluss hat. Als letzten merklichen Einfluss ist die Anfangsinvestition in das System zu nennen.

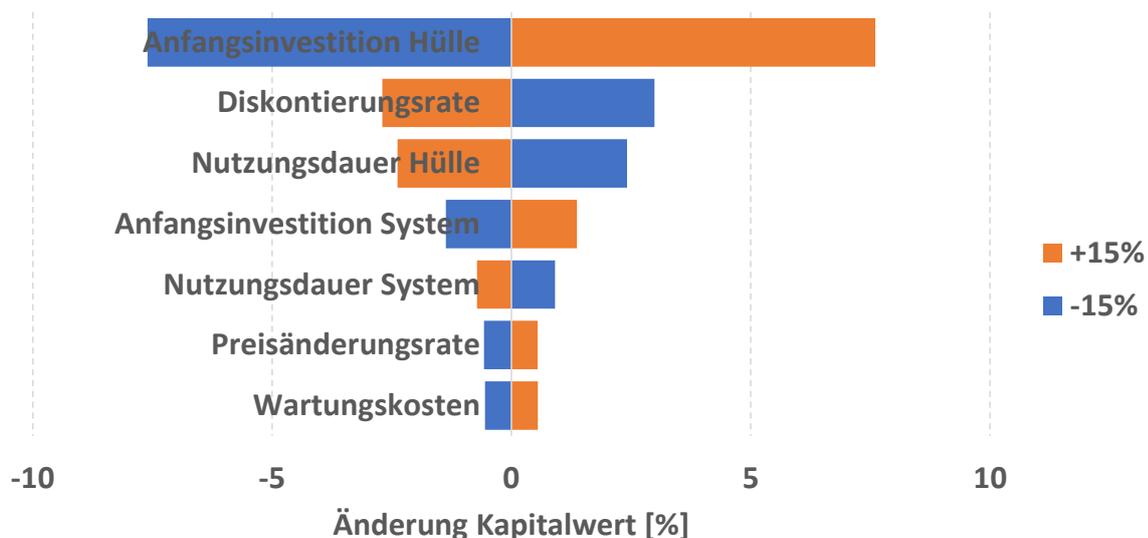


Abbildung 35: Tornadodiagramm der Parametervariation um 15 % für EA100m für Gebäude MMH 1958-78 Sanierungsstufe S.

5.3.2 Strom- und Gaspreisszenarien

An dieser Stelle werden Ergebnisse der resultierenden Kapitalwerte bei Annahme der Energiepreise aus dem für die Hauptanalyse genutzten Szenario COP1 mit den Resultaten bei Annahme des Business-as-usual (BAU) und des COP2 Szenarios verglichen. Im BAU-Szenario ergeben sich leicht höhere Strompreise für die Wärmepumpe in allen zukünftigen Stützjahren, während der Anstieg des Gaspreises gegenüber den heutigen Preisen signifikant niedriger ausfällt. Abbildung 36 stellt die Ergebnisse des Kapitalwerts für das BAU-Szenario dar, zu erkennen an dem unteren Ende der Fehlerbalken. Das obere Ende der Fehlerbalken stellt zum Vergleich die Ergebnisse des COP2-

Szenarios dar. Es ist zu erkennen, dass im BAU-Szenario ein Preisniveau für Strom- und Gaspreise erreicht wird, welches zu ähnlichen Kapitalwerten von BW- und Wärmepumpensystemen führt. Im BAU-Szenario fallen in allen betrachteten Kombinationen die Einnahmen durch die Energiekosteneinsparungen geringer aus, da der geringere Gaspreis zu geringeren Energiekosten für den Brennwertkessel des Referenzfalls führt, insbesondere in den späteren Jahren des Betrachtungszeitraums. Für das BAU-Szenario ist für die Hüllsanierungsvarianten nach GEG (S) und vergleichbar zum Passivhaus-Standard (P) nun der Brennwertkessel als am wirtschaftlichsten zu bewerten ist. Dies ist durch die aus LowEx-Sicht ungünstigere Preisentwicklung in den zukünftigen Jahren zu erklären. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Unterschiede im Kapitalwert in allen Sanierungsszenarien, wie auch schon im Leitszenario, relativ gering ausfallen und die emissionsärmeren Systeme auch im BAU-Szenario mit dem Brennwertkessel wirtschaftlich konkurrieren können. Im direkten Vergleich der LowEx-Systeme im BAU-Szenario als auch im COP2-Szenario schneidet in allen Sanierungsvarianten das A60b-System in S1 (Sanierung des untersten Geschossbodens) am besten ab. Insgesamt ergeben sich Änderungen in der Rangfolge der Kapitalwerte zwischen den LowEx-Systemen, allerdings in geringem absolutem Umfang.

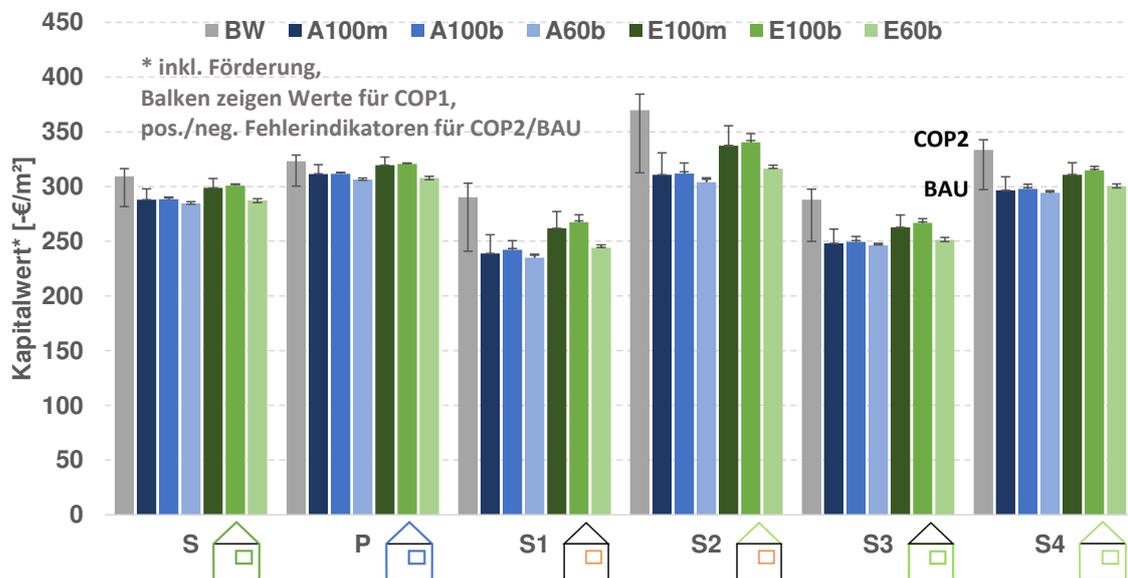


Abbildung 36: Kapitalwert pro Wohnfläche für das BAU-Preisszenario sowie für das COP2-Preisszenario für alle SP für das Gebäude MMH 1958-78. Die farbigen Balken zeigen die Werte für das COP1-Preisszenario, die Fehlerindikatoren geben den Unterschied zum COP2-Szenario (positiver Fehlerindikator) bzw. zum BAU-Szenario (negativer Fehlerindikator) an.

Um die vorherigen Analysen noch zu vertiefen ist eine allgemeinere Variation der Energiebezugpreise für Strom und Gas, auf Grundlage von COP1, in Abbildung 37 dargestellt. Die daraus resultierenden Kapitalwerte für unterschiedliche Heizsysteme eines MMH auf Sanierung nach GEG (S) sind in Abhängigkeit des Strom- und Gaspreises in Abbildung 38 dargestellt. Auch hier ergibt sich ein ähnliches Bild: bei günstiger Entwicklung des Strompreises sind Systeme mit hohem Strombedarf, wie monoenergetische Wärmepumpen, wirtschaftlich vorteilhaft. Bei steigenden Kosten für Gas wird der wirtschaftliche Nachteil eines Brennwertkessel durch einen steigenden Kapitalwert immer deutlicher.

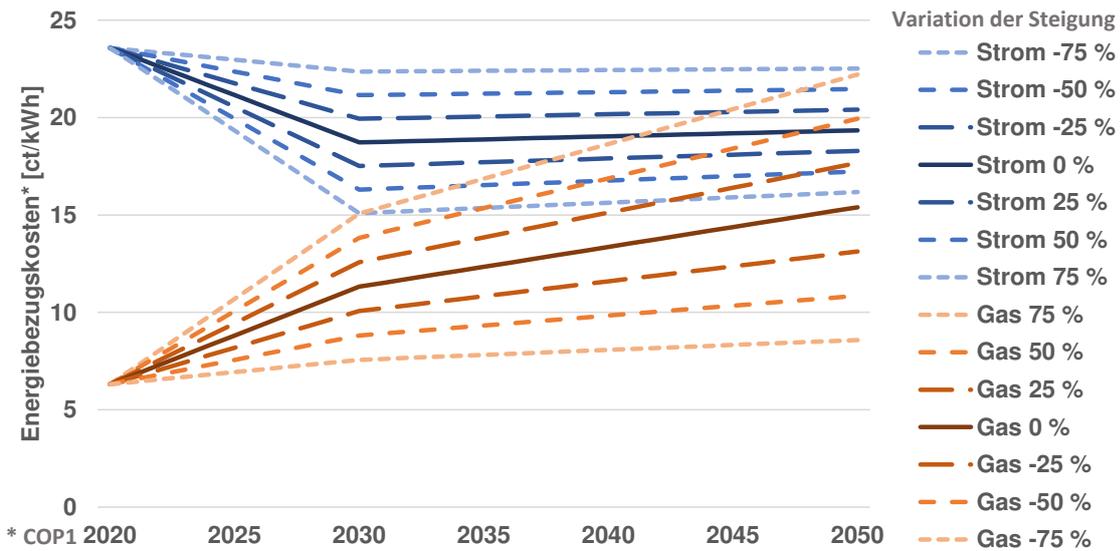


Abbildung 37: Variation der Entwicklung der Energiebezugskosten für Strom und Gas bis ins Jahr 2050.

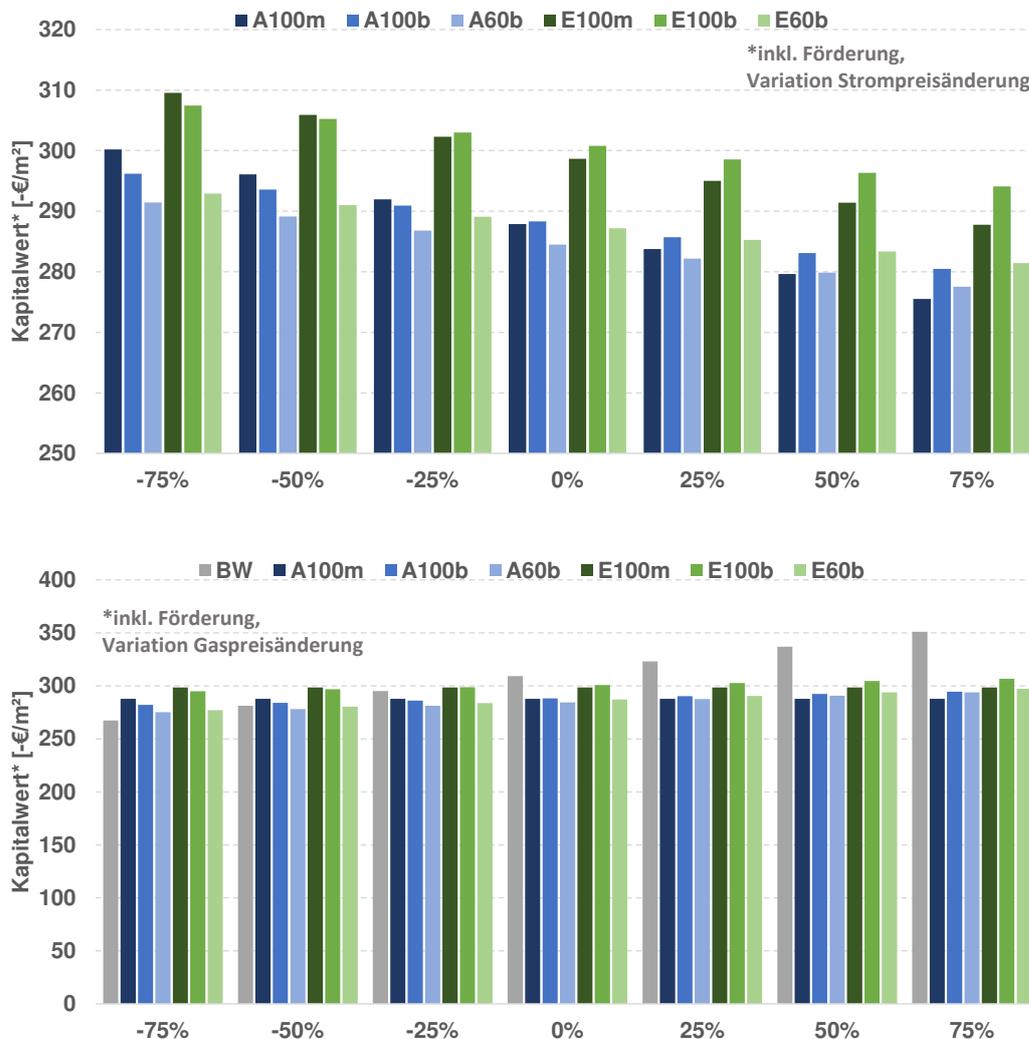


Abbildung 38: Kapitalwert für Ergebnisse der Systemvarianten bei Sanierung S nach GEG. Für die verschiedenen untersuchten Heizsysteme wird der Einfluss einer zukünftigen Variation der Bezugskosten für Strom (oben) und für Gas (unten) auf den sich ergebenden Kapitalwert untersucht.

Eine detailliertere Analyse des Einflusses zukünftiger Preisänderungen auf den sich ergebenden Kapitalwert der Systemvarianten ist in Abbildung 39 dargestellt. Da sich sowohl der Gasbezugspreis als auch die Strombezugskosten ändern werden, ist es sinnvoll eine Kombination der beiden zu untersuchen. Hier ist insbesondere deutlich zu erkennen, dass die monoenergetischen Heizsysteme bei einem Anstieg der Bezugskosten sowohl für Strom und Gas die vorteilhaftesten Kapitalwerte erreichen und für diesen Fall wirtschaftlich zu bevorzugen sind.

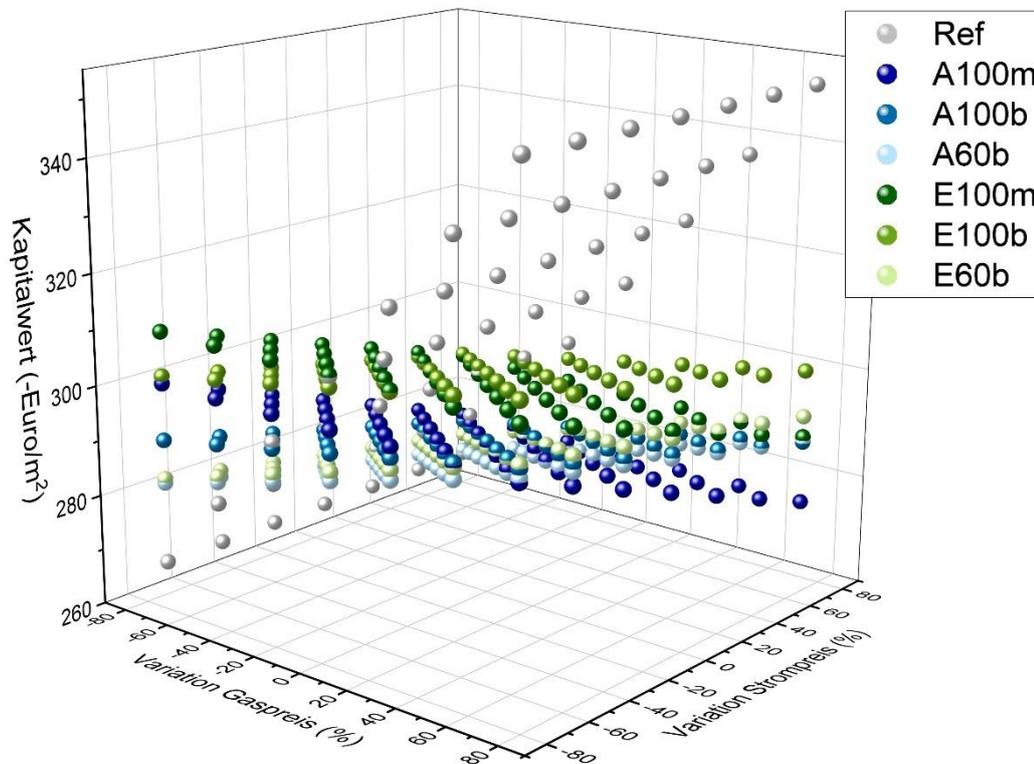


Abbildung 39: Kapitalwert für Ergebnisse der Systemvarianten bei Sanierung S nach GEG. Für die verschiedenen untersuchten Heizsysteme wird der Einfluss einer zukünftigen Variation der Bezugskosten für Strom und für Gas auf den sich ergebenden Kapitalwert untersucht.

Ähnlich zur vorherigen Untersuchung kann die Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen analysiert werden. Die dazugehörige Variation des COP1-Szenarios ist in Abbildung 40 bis ins Jahr 2045 dargestellt. Die sich daraus ergebenden gesamten CO₂-Emissionen für eine Veränderung der spezifischen Emissionen für Strom (oben) und Gas (unten) sind in Abbildung 41 zu sehen. Auch hier ergeben sich die gleichen Trends wie in der vorherigen Analyse. Der Verlauf der spezifischen CO₂-Emissionen für Strom und Gas weisen sehr starke Unterschiede in der Steigung auf. Eine identische Variation der Pfade um 50 % bewirkt also keine äquivalente Änderung der Werte, was bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden muss.

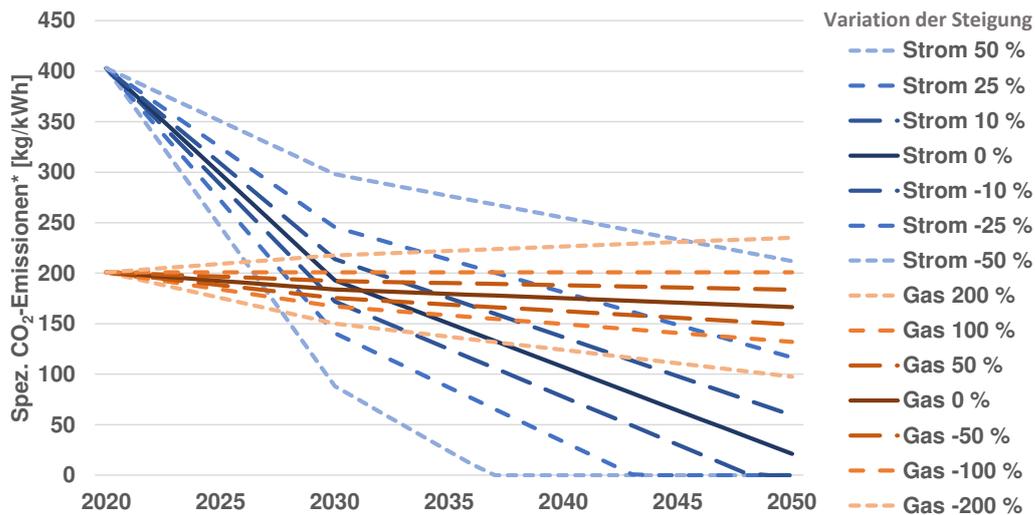


Abbildung 40: Variation der Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen für Strom und Gas bis ins Jahr 2050.

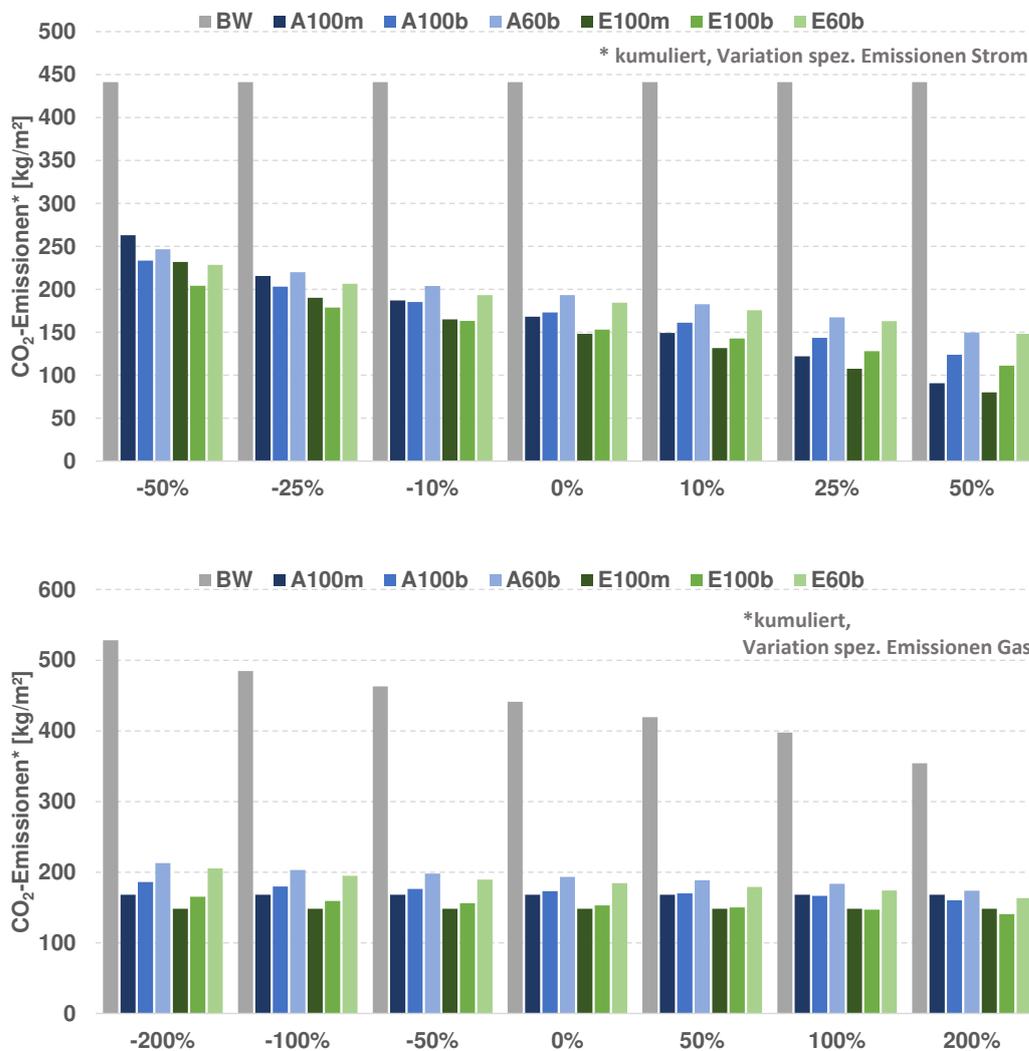


Abbildung 41: Spezifische CO₂-Emissionen für Ergebnisse der Systemvarianten bei Sanierung S nach GEG. Für die verschiedenen untersuchten Heizsysteme wird der Einfluss einer zukünftigen Variation der spezifischen CO₂-Emissionen für Strom (oben) und für Gas (unten) auf die gesamte CO₂-Emission untersucht.

5.3.3 Berücksichtigung von Fördermöglichkeiten

Eine Vielzahl von KfW-Fördermöglichkeiten verringert die Anfangsinvestition der einzelnen Sanierungspakete. Die Förderhöhe bezieht sich in den meisten Fällen auf die Höhe der energetischen Mehrkosten. In diesem Abschnitt wird untersucht, welchen Einfluss die Nichtinanspruchnahme möglicher Fördermaßnahmen auf die Investitionsentscheidung hat. In der Hauptanalyse wird der Fördersatz nach BEG für Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle von 25 % berücksichtigt, sowie 25 % beziehungsweise 40 % für die Förderung eines bivalenten beziehungsweise monoenergetischen Systems. Abbildung 42 zeigt die Anfangsinvestition und den KW_{Mike} jeweils mit und ohne Berücksichtigung von Fördersätzen.

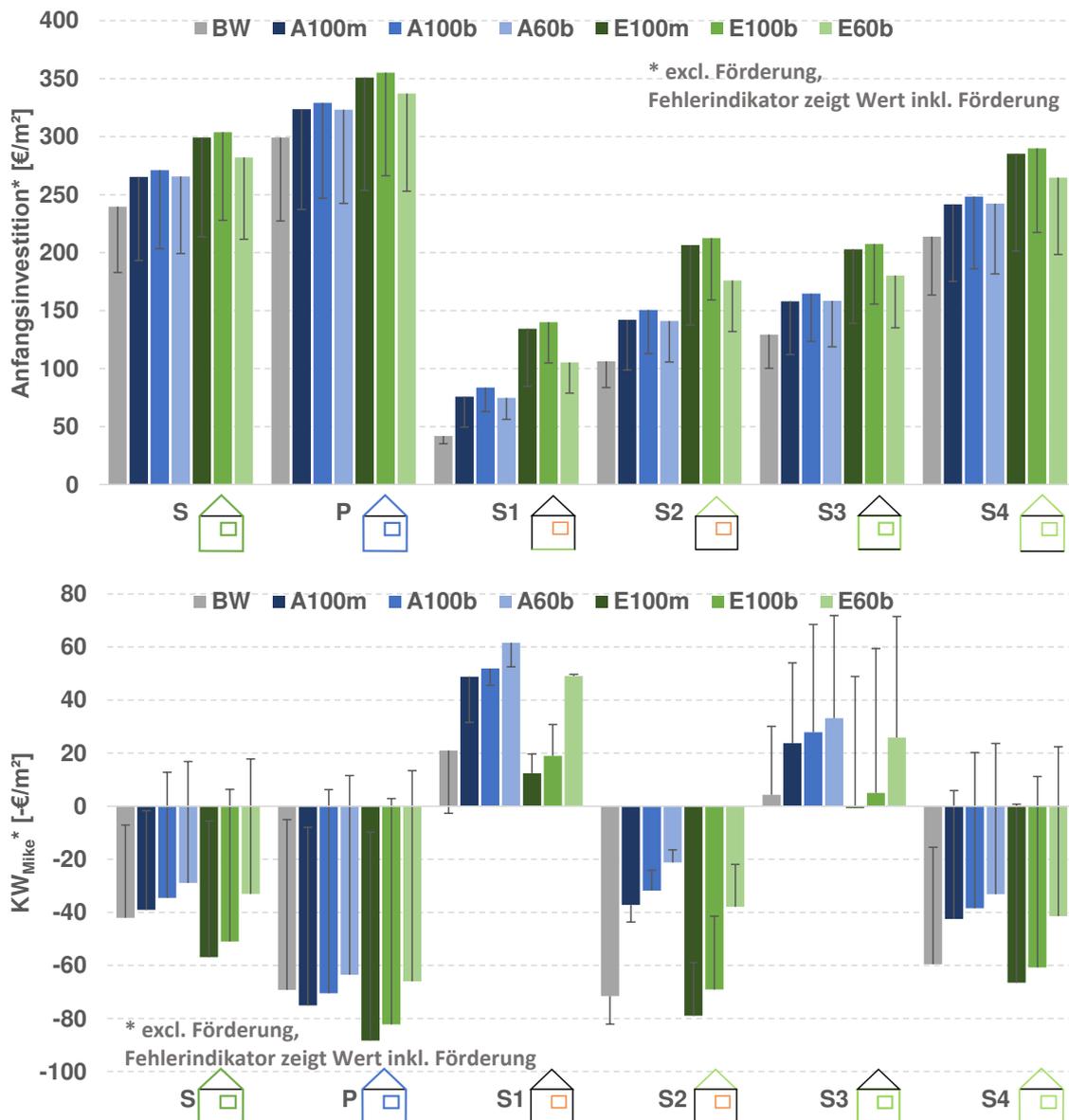


Abbildung 42: Spezifische Anfangsinvestition und spezifischer KW_{Mike} pro Wohnfläche für Sanierungsmaßnahmen (Gebäude MMH 1958-78). Die farbigen Balken stellen die Ergebnisse ohne Berücksichtigung von Fördersätzen dar, die Fehlerbalken den Unterschied zu den Ergebnissen mit Förderung.

Mit dem Anstieg der initialen Investition von Sanierungsmaßnahmen und der LowEx-Systeme durch die Nichtinanspruchnahme der Fördermaßnahmen sinkt erwartungsgemäß sowohl der zu erwartende Kapitalwert des BW-Sanierungspakets als auch der bivalenten und monoenergetischen Systeme gegenüber dem Ausgangszustand. Die investitionsintensiven Erdsondensysteme profitieren am stärksten von der anteiligen Förderung. Während diese mit Förderung ähnlich attraktiv wie Außenluftsysteme sind, fallen ohne Förderung deutlich höhere Kosten an. Lediglich im Zustand einer Sanierung des Daches, die nur zu geringen Energieeinsparungen führt, ist mit und ohne zusätzliche Förderung der Wirtschaftlichkeit der LowEx-Systeme keine positive Wirtschaftlichkeit der LowEx-Systeme zu erreichen.

6 Zusammenfassung und Fazit

Im Arbeitspaket 5 des Projekt-Verbunds »LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden (LowEx-Bestand)« wurde eine techno-ökonomische und ökologische Untersuchung zum Heizsystem-Wechsel auf Wärmepumpen in Bestands-Mehrfamiliengebäuden mit unterschiedlichem Sanierungsstand durchgeführt. Als Ausgangssituation für die Untersuchungen dienen typische Mehrfamilien-Bestandgebäude in Deutschland, in denen ein älterer Gaskessel mit entsprechend niedrigerem Wirkungsgrad im Vergleich zu modernen Gasbrennwertkesseln verbaut ist. Die zentrale Forschungsfrage dieses Berichts lautet: welche Maßnahmenkombination an Gebäudehülle und Heizsystem am wirtschaftlichsten ist und welche CO₂-Reduktion dadurch erzielt werden kann.

In vorangegangenen Arbeiten (Arbeitspaket 1) wurde hierzu der deutsche Gebäudebestand für Mehrfamilienhäuser erfasst und verschiedene Typgebäude abgeleitet. Anhand dieser Typgebäude wurden ein allgemeiner Bestandszustand sowie eine repräsentative Gebäudegeometrie abgeleitet. Für diese Gebäude wurden Sanierungspakete für die Gebäudehülle abgeleitet, welche nach Sanierungsstufen S1 - S4 sowie Komplettsanierung (S) basierend auf GEG bzw. Passivhaussanierung (P) unterschieden werden. Zur Festlegung der zu betrachtenden Wärmepumpen-Systeme wurden Komponenten und Systemauslegung auf das jeweilige Gebäude und dessen Sanierungsstand abgestimmt (vgl. Arbeitspaket 3). Dafür wurden Wärmebedarf für Raumwärme und Trinkwarmwasser sowie der Strom- und Gasbedarf je nach System, Sanierungsmaßnahme und Gebäude berechnet.

Auf Basis dieser Vorarbeiten wurde in dieser Studie die Wirtschaftlichkeit und die CO₂-Emissionen der Wärmepumpen-Systeme bei unterschiedlichen Sanierungsstufen untersucht. Dazu wurden drei Preisszenarien für (Wärmepumpen-)Strom und Gas basierend auf Wagner et al. (2019a) festgelegt. Zur Bestimmung der technologieseitigen Investitionen wurden Kostendaten aus der BKI-Datenbank herangezogen (BKI 2017), für die Hüllsanierung hauptsächlich der IWU-Datensatz (Hinz 2015). Hieraus konnten die Höhe der Anfangsinvestition und die Ausgaben für Wartung und Energie berechnet werden. Für die Wirtschaftlichkeitsbewertung wurden die energiebedingten Mehrausgaben den Einnahmen durch Energiekosteneinsparungen gegenübergestellt, wofür in diesem Bericht ein Referenzfall definiert wurde. Die wirtschaftliche Bewertung wurde anhand des Kapitalwerts, der Amortisationsdauer und des internen Zinsfußes durchgeführt. Für die Analyse wurde auf das COP1-Preisszenario zurückgegriffen, welches die Entwicklung der Haushaltskundenpreise für Strom und Gas bis 2050 beschreibt. Es wurde in dieser Studie ein Wärmepumpenstromtarif angenommen, welcher 73 % des Haushaltstrompreises entspricht. Das Hauptszenario geht von einer ansteigenden CO₂-Bepreisung von Energieträgern im Endkundenbereich aus. Die Einnahmen aus dieser CO₂-Bepreisung sollen dazu dienen, den Haushaltskundenstrompreis zu senken.

Die Ergebnisse für das mittlere Mehrfamilienhaus, Baualter 1958 - 1978, zeigen, dass ein gleichzeitiger Wechsel des Heizsystems zu einem Wärmepumpen-System mit Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle eine Reduktion der CO₂-Emissionen von bis zu 800 kg/m² über den Betrachtungszeitraum verwirklichen kann (Abbildung 26). Im Hauptszenario wird die Sanierungsmaßnahme S3 mit dem Wärmepumpen-System A60b am wirtschaftlichsten bewertet (vgl. Abbildung 29). Bei der Wärmepumpe A60b handelt es sich um ein bivalentes Außenluft-Wärmepumpensystem mit zusätzlichem Gasbrennwertkessel, in einer Dimensionierung von 60 % bezogen auf die Basisauslegung mit einem Bivalenzpunkt von -5 °C. Die Sanierungsmaßnahme S3 umfasst eine Kombination von Dämmmaßnahmen an Außenwand und Fenster. Auch im Falle anderer Hüllsanierungsmaßnahmen schneidet das A60b-System am wirtschaftlichsten ab mit leicht niedrigeren Werten.

Dieser Trend deutete sich bereits in der Einzeluntersuchung von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle und Sanierung des Heizsystems an. So weist die Investition in Sanierung von Wand und Fenster die höchste Wirtschaftlichkeit auf, da hier der äquivalente Energiepreis (vgl. Abbildung

16) am geringsten ist. Vergleicht man die Ergebnisse für dieselbe Sanierungsstufe miteinander, lässt sich feststellen, dass die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen-Systemen umso größer wird, je größer das System ausgelegt wird bzw. je größer die Gebäudefläche ist (vgl. Abbildung 24).

Die Wirtschaftlichkeit bestätigt sich auch für die Variation der Energiebezugskosten (Abbildung 36). Nach dem Business-As-Usual-Szenario sind die Wärmepumpen-Systeme nach der Kapitalwertmethode weiterhin wirtschaftlich. In diesem Fall erreicht das A60b-System den niedrigsten Kapitalwert. Auch unter der Annahme eines konstanten realen Gaspreises bis zum Jahr 2045 hat sich ergeben, dass das A60b Sanierungspaket in vielen Fällen wirtschaftlich ist, idealerweise in Kombination mit einem Wärmepumpenstromtarif.

Ohne Berücksichtigung der Fördermöglichkeit durch das BEG steigen die Kapitalwerte der Sanierungspakete mit Wärmepumpen im Vergleich zum Gasbrennwertsystemen an (vgl. Abbildung 42). Das Gasbrennwertsystem profitiert im Gegensatz zu den Wärmepumpen-Systemen von geringen Anfangsinvestitionen und einem größeren Skaleneffekt. Die niedrigen Anfangsinvestitionen bringen den Kapitalwert des Brennwertsystems - ohne Inanspruchnahme der Förderung – in manchen Fällen auf ein ähnliches Niveau wie Wärmepumpen-Systeme, besonders bei einem verringerten Wärmebedarf durch Hüllsanierung. Dieser wirtschaftliche Vorteil von fossilen Heizsystemen nimmt durch finanzielle Fördermaßnahmen ab, da ein Brennwertkesselsystem von diesen nicht profitiert und lediglich die Hüllsanierung förderfähig ist.

Die meisten Wärmepumpen-Systeme weisen mit Förderung und nach Bewertung mit der Amortisationsdauer und der Methode des internen Zinsfußes die beste Wirtschaftlichkeit auf. Im Vergleich dazu stellt sich das Brennwertkesselsystem als am wenigsten wirtschaftlich heraus. Hinzu kommt, dass das Brennwertkesselsystem lediglich eine CO₂-Reduktion von 24 kg/m² (nur Dach-Sanierung, S2) bis 575 kg/m² (Sanierung mit U-Werten vergleichbar mit Passivhaus-Standard, P) über den Betrachtungszeitraum erreicht.

In der Beurteilung der Sanierungsmaßnahmenkombinationen werden die Perspektiven unterschiedlicher Akteure, des Vermieters und des Mieters, zusammengefasst. Entsprechend des Mieter-Vermieter-Dilemmas trägt der Vermieter die Ausgaben für die Investition, kann allerdings nicht von der Investition direkt in Form von Energiekosteneinsparungen profitieren. Für die Mieter ist es wiederum entscheidend, wie sich die Warmmiete über den Betrachtungszeitraum verändert. Die Veränderung der Warmmiete setzt sich aus der Modernisierungsumlage auf die Kaltmiete und den Energiekosteneinsparungen zusammen. Die Veränderung der Warmmiete ist in etwa der Hälfte der betrachteten Fälle dieser Studie negativ, was bedeutet, dass die Warmmiete für den Mieter abnimmt. Der Vermieter wiederum profitiert nur über die Modernisierungsumlage, welche 8 % der energiebedingten Mehrinvestition beträgt. Diesen Betrag kann der Vermieter unbefristet auf die Kaltmiete aufschlagen. Allerdings schließt dies explizit nur die energiebedingten Mehrausgaben ein. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass sich über die Modernisierungsumlage die energiebedingte Mehrinvestition kaum kompensieren lassen und die Amortisationsdauer knapp über 25 Jahren liegt. Hier hätte auch die Reduktion der Anfangsinvestition durch Fördermaßnahmen keinen Einfluss, da die Höhe der Investition direkt die Höhe der Modernisierungsumlage betrifft. Nur unter Berücksichtigung geringerer Zinserwartungen lässt sich die Mehrinvestition für den Vermieter über die Modernisierungsumlage refinanzieren. Nichtsdestotrotz ist davon auszugehen, dass durch die Sanierungsmaßnahmen eine Wertsteigerung des Gebäudes für den Vermieter erzielt werden kann.

Der Studienaufbau geht mit größeren Unsicherheiten einher, die zum Abschluss angesprochen werden sollen. So hängt die Prognose von Energiepreisen von vielen Annahmen ab. Der Großhandelsstrompreis macht dabei nur einen geringen Anteil des Haushaltsstrompreises aus, während der größte Teil von Steuern, Abgaben und Umlagen bestimmt wird. Die Entwicklung dieser Komponenten ist mit großer Unsicherheit behaftet, da diese nicht nur von der Entwicklung des deutschen Stromsystems abhängen, sondern auch stark von politischen Entscheidungen beeinflusst werden, die sich nicht im Rahmen der klassischen Energiesystemanalyse abbilden lassen. Gleiches gilt auch für den zukünftigen Gaspreis, der zum einen von der Entwicklung des Weltmarktes, zum anderen aber auch von der nationalen und europäischen CO₂-Bepreisung abhängt. Wie dieser sich

bis 2045 gestalten wird und ob die Einnahmen aus dieser CO₂-Bepreisung für die Senkung des Strompreises eingesetzt werden, kann zum heutigen Zeitpunkt nicht beantwortet werden. Aufgrund dieser Unsicherheiten bei der Entwicklung der Endenergiepreise sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse von großer Relevanz zur Einordnung des Leitszenarios. Die Ergebnisse zeigen, dass bei den angenommenen Preisszenarien Wärmepumpen das wirtschaftlichste Heizsystem ist, bei höheren Strompreisen oder geringeren Gaspreisen sich die Wirtschaftlichkeit zugunsten bivalenter Systeme oder Gasbrennwertkesselsysteme verschiebt.

Des Weiteren basiert die Beurteilung der Systeme auf einer Verallgemeinerung des deutschen Gebäudebestands. Es muss daher darauf hingewiesen werden, dass die Ergebnisse für eine individuelle Beurteilung von Sanierungspaketen in Gebäuden stark von den Ergebnissen dieser Studie abweichen können. So wird die Höhe der anfallenden Investition über Datenbanken bestimmt. Diese bestimmen die spezifische Investition über einen Mittelwert aus einer Vielzahl von Einzelprojekten. Die anfallenden Kosten sind allerdings stark von den örtlichen Gegebenheiten, wie Gebäudegeometrie, Zugänglichkeit und Lohnniveau, abhängig. Die individuellen Gegebenheiten bestimmen auch den Heizenergiebedarf und die Jahresarbeitszahl der Systeme. Es stellt sich zum Beispiel die Frage, ob das Wärmeübergabesystem die Vorlauftemperaturen für einen optimalen Betrieb zulässt oder ob hier zusätzliche LowEx-Maßnahmen zur Temperaturabsenkung mit einhergehenden Investitionen vorgenommen werden müssen. Auch hat das örtliche Klima großen Einfluss auf die Effizienz von Außenluftwärmepumpen, wohingegen Erdsondensysteme weniger witterungsabhängig sind. Nichtsdestotrotz sind nicht an jedem Standort die Bedingungen im Erdreich für einen optimalen Erdsondenbetrieb gegeben.

Abschließend sei noch erwähnt, dass für diese Studie Kostendaten aus dem Jahr 2020 verwendet werden. Die turbulenten globalen Preisentwicklungen von Erdgas und Strom im Frühjahr 2022 konnten zum Zeitpunkt der Studie nicht abgesehen werden und finden somit in den Betrachtungen keine Berücksichtigung. Durch die deutliche Steigerung der Gaspreise profitieren in großem Maße strombasierte Heizsysteme mit Wärmepumpen, sodass sich die wesentlichen Ergebnisse dieser Studie mit der neuen Marktsituation noch mehr in Richtung Wärmepumpen-Systeme mit einem großem Stromanteil verschieben.

7 Anhang

7.1 Ökonomische und ökologische Randbedingungen

Im folgenden Abschnitt werden die verwendeten spezifischen Investitionen der Systemkomponenten (Kapitel 7.1.1) beschrieben. Zusätzlich werden in Kapitel 7.1.2 die verwendeten Szenarien der spezifischen CO₂-Emissionsfaktoren diskutiert.

7.1.1 Kosten der System-Komponenten

In dieser Studie werden mehrere Datenquellen für die Systemsanierung berücksichtigt. Für die Berechnung der resultierenden Kostenkurve werden nur Primärquellen mit eigenen Kostensammlungen berücksichtigt. Studien, die sich auf Kostenwerte aus der Literatur beziehen, sind sekundäre Quellen und werden verwendet, um die resultierende Kostenkurve mit früheren Studien zu vergleichen.

Eine Übersicht der Primär- und Sekundärquellen ist in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Primär- und Sekundärquellen für die Bestimmung der Komponenten-Kosten

Typ	Quelle	Gasboiler	Heizstab	Wärmespeicher	Luftwärmepumpe	Solewärmepumpe	PV	Netto- / Bruttowert	Kurve / Werte	Investition	Installation	Kommentar
Primär	BKI	x		x	x	x	x	Brutto	Werte	x	x	
	MAP	x			x	x		Brutto	Werte	x	x	
	BBSR	x						Netto	Kurve	x	x	
	FfE			x				Netto	Kurve	x		
	IER				x	x		n.a. ^[1]	Kurve	x		Nur WP-Aggregate
	EUPD						x	Netto	Werte	x		
Sekundär	Kotzur	x		x	x	x	x	Brutto	Kurve	x	x	
	BDEW	x			x		x	Brutto	Werte	x	x	
	ISE_HP				x	x		Netto	Werte	x		Nur WP-Aggregate
	sonstige		x					Brutto	Werte	x		
[1] keine Informationen verfügbar, Annahme: Bruttowerte												

Um die Werte der verschiedenen Quellen miteinander vergleichbar zu machen, werden die ursprünglichen Werte modifiziert.

- Die Nettowerte werden in Bruttowerte einschließlich der Mehrwertsteuer von 19 % umgerechnet.
- In einigen Quellen für die Sole-Wärmepumpe sind die Kosten für die Erdsonde nicht enthalten. Um die spezifischen Kosten für Bohrungen in €/m (BKI) mit der

Wärmepumpenleistung (€/kW) in Beziehung setzen zu können, wird eine grobe Dimensionierung der Bohrlochlänge vorgenommen. Die Annahmen und Berechnungen sind in Kapitel 4.5 Wärmepumpe (Sole) beschrieben.

- Bei Quellen, die nur einen Teil der Vollkosten abdecken, d. h. nur die Investitionskosten, wird der Anteil der fehlenden Installationskosten aus der Installationszeit (nach BKI) und den typischen Personalkosten (nach eigener Recherche) abgeleitet und addiert.
- Für Quellen, die Einzelwerte liefern, wird eine Trendlinie angepasst, um eine Kostenkurve pro Quelle zu erhalten. Der Durchschnitt dieser Quellenkostenkurven ergibt die Kostenkurve für jede Komponente. (siehe Kapitel 2.4.1)
- Jede Quelle bezieht sich auf ein anderes Bezugsjahr, so dass die Kosten über den BPI (Baupreisindex) (BKI 2021b) auf das Jahr 2020 bezogen werden (siehe(28)).

$$K_{2020} = K_{alt} \cdot \frac{BPI_{2020}}{BPI_{alt}} \quad (28)$$

Keine der untersuchten Studien deckt die Kosten für eine elektrische Heizung ab, so dass die Kostenkurve aus einer eigenen kurzen Recherche in vier Online-Shops resultiert. Aufgrund der Nichtverfügbarkeit zuverlässigerer Daten und der vergleichsweise geringen Kosten eines Elektroheizers wird dieser Ansatz gewählt.

BKI

Das Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (BKI) gibt Kosten für alle Systemkomponenten im Format "von... Mitte... bis" an, die durch eigene Kostensammlungen gewonnen wurden. Die Daten stammen aus der Testversion des "BKI Baukostenplaner 2021" (BKI 2021a), bezogen auf das erste Quartal des Jahres 2020. Die Daten umfassen Investitions- und Installationskosten. Sie werden als Primärquelle für die Berechnung der resultierenden Kostenkurven verwendet.

MAP

Das "Marktanreizprogramm" (MAP) ist ein Marktanreizprogramm der Bundesregierung. Die Bewertung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmesektor liefert Einzelkosten für Gaskessel und Wärmepumpen (Luft- und Sole) aus Förderanträgen und deren Bewilligungen, Umfragen und weiteren eigenen Daten (Stuible et al. 2016). Die Kosten berücksichtigen die Investitionen und die Installation. Als primäre Datenquelle werden sie für die Berechnung der resultierenden Kostenkurven verwendet.

BBSR

Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung gibt eine Kostenkurve für Gaskessel für das Jahr 2013 an (BBSR 2014). Die Primärdaten stammen aus Sanierungsmaßnahmen von Bundesliegenschaften und werden genutzt, um die resultierende Kostenkurve zu errechnen. Die Kosten sind als Netto-Werte angegeben und werden mit 19 % Mehrwertsteuer in Bruttowerte umgerechnet.

FfE

Die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. gibt Kostenkurven für Wärmespeicher für Raumheizung (SH) und Kombispeicher für Raumheizung und Warmwasser (combi) an. Die Daten sind aus Listenpreisen der Hersteller abgeleitet und beziehen sich auf das Jahr 2016. Sie sind als Nettowerte angegeben und beinhalten Investitionen und Transport (FfE 2021). Die Kosten werden in Bruttowerte mit 19 % Mehrwertsteuer umgerechnet. Als primäre Datenquelle werden sie für die Berechnung der resultierenden Kostenkurven verwendet.

IER

Das "Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung" (IER) gibt Kostenkurven für Luft- und Sole-Wärmepumpen aus einer Marktanalyse bezogen auf das Jahr 2012 an (Wolf et al. 2014). Aufgrund der fehlenden Information, ob Brutto- oder Nettowerte verwendet werden, werden Bruttowerte angenommen. Die Daten umfassen nur die Investitionskosten des Aggregats. Als primäre Datenquelle werden sie für die Berechnung der resultierenden Kostenkurven verwendet.

EUPD

"EuPD Research" (EUPD) stellt spezifische Kostendaten für verschiedene Leistungsbereiche zur Verfügung. Die aus der Marktanalyse abgeleiteten Nettokosten beziehen sich auf das Jahr 2013 und umfassen nur die Investition für die Module (EuPD Research 2013). Die Kosten werden in Bruttowerte mit 19 % Mehrwertsteuer umgerechnet. Als primäre Datenquelle werden sie für die Berechnung der resultierenden Kostenkurven verwendet.

Kotzur

Leander Kotzur hat im Rahmen seiner Dissertation eine Analyse der Systeminvestitionskosten durchgeführt (Leander Kotzur 2018). Aus einer Sammlung von Kostendaten aus einer breiten Literaturrecherche stellt er Kostenkurven für verschiedene Systemkomponenten in dem in Gleichung 38 dargestellten Format bezogen auf das Jahr 2017 bereit. Die Daten von Kotzur beinhalten Investitions- und Installationskosten. Da es sich um eine Sekundärquelle handelt, wird sie zum Vergleich der resultierenden Kurven verwendet.

$$K = K_{fix} + K_{spez} \cdot P_{nom} \quad (29)$$

Mit	P_{nom}	[kW]	Nennleistung	K	[€]	Absolute Vollkosten
	K_{fix}	[€]	absolute Fixkosten	K_{spez}	[€/kW]	Spezifische Kosten

BDEW

Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) stellt mit dem Tool "Heizkostenvergleich" Kostendaten für verschiedene Systemkomponenten zur Verfügung. Die Kostenkurven sind aus umfangreichen Recherchen abgeleitet und beinhalten Investition, Lieferung, Installation, Inbetriebnahme und typische Abschläge als Bruttowerte, werden aber nicht veröffentlicht. Einzelne Werte sind daher der Toolbeschreibung (Mailach und Oschatz 2021) entnommen und werden nur zum Vergleich herangezogen, auch wenn es sich um eine Primärquelle handelt.

ISE_HP

Das Fraunhofer ISE (Institut für Solare Energien) hat eine Sammlung von Wärmepumpen-Listenpreisen von verschiedenen Herstellern durchgeführt. Aus den gesammelten Kostenwerten werden Kostenkurven abgeleitet. Da es keine Informationen darüber gibt, ob Brutto- oder Nettowerte verwendet werden, werden Bruttowerte angenommen. Die Daten umfassen nur die Investitionskosten des Aggregats. Da die Daten nicht veröffentlicht werden, wird die Quelle als Sekundärquelle betrachtet und zum Vergleich herangezogen.

Die Investitionskosten für Elektroheizungen in verschiedenen Größen aus vier Online-Shops (Tabelle 20) werden als Ausgangsdaten für den elektrischen Heizstab verwendet.

Tabelle 20: Datenquellen für die elektrischen Heizstab

Quelle	Homepage	Zuletzt besucht
Solarbayer	https://www.solarbayer.de/shop/Suche	29.07.2021
Stabilo Sanitär	https://www.stabilo-sanitaer.de/search/?query=elektro%20heizstab%20pufferspeicher	29.07.2021
Klimaworld	https://www.klimaworld.com/catalogsearch/result/?	29.07.2021
Solarprofi	https://shop.solarprofi-24.de/speicher/zubehoer-speicher/elektroheizstab/426/elektroheizstab-heizpatrone-heizstab-2-3-4-5-6-8-12-kw-pufferspeicher-heizung https://shop.solarprofi-24.de/search?sSearch=Elektroheizstab	29.07.2021

Systemkostenkurven:

Es wird davon ausgegangen, dass die ohnehin anfallenden Kosten (SK) der Installation eines neuen Gasheizkessels entsprechen. Kosten, die für andere Komponenten anfallen, werden als energiebedingte Mehrkosten (EMK) verbucht. Die folgenden Kostenkurven zeigen die Vollkosten (VK).

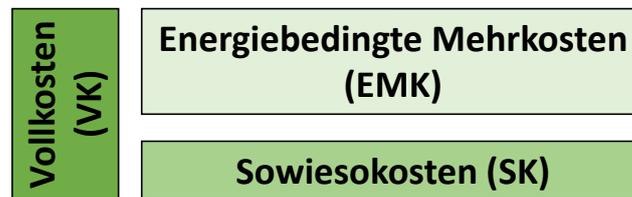


Abbildung 43: Kostenstruktur: Vollkosten = Energiebedingte Mehrkosten+ Sowiesokosten

Bei Quellen, die nur die Investitionskosten berücksichtigen, werden die Installationskosten hinzugerechnet. Mit der vom BKI angegebenen Installationszeit und typischen Personaltarifen wird der durchschnittliche Anteil der Installationskosten aus den BKI-Daten berechnet.

Tätigkeit	Komponenten-einbau	Referenz-Jahr	Ursprungswert [€/h]	Brutto-Stundenlohn 2020 [€/h]
Heizung und Sanitär (SHK 2021)	Gasheizkessel, Wärmespeicherung, Wärmepumpe	2021	68.89	79.54
Dach ^[1]	Photovoltaik	2020	58.87	58.87
^[1] durchschnittlicher Bruttowert der verschiedenen Quellen: https://www.blauarbeit.de/blog/dach/dachdecker-kosten https://www.talu.de/handwerkerpreise-im-ueberblick/ https://www.hausjournal.net/dachdecker-stundenlohn https://dach.live/branchen-news/faktor-35-wie-dachdecker-schwarze-zahlen-schreiben				

$$k_{inst} = \text{Durchschnitt} \left(\frac{t_{inst} \cdot K_{Personal}}{K_{total}} \right) \quad (30)$$

Mit	k_{inst}	[%]	durchschnittlicher Anteil an den Installationskosten
	t_{inst}	[h]	Installationsdauer
	$K_{Personal}$	[€/h]	Gehaltstarif
	K_{total}	[€]	Vollkosten einschließlich Installationskosten (BKI-Daten)

Um aus den unterschiedlichen Datenformaten der Primärquellen eine resultierende Kostenkurve abzuleiten, wird für jede Quelle eine potentielle Trendlinie im Format der Gleichung (31) angepasst. Die Durchschnittswerte der verschiedenen Quellen werden verwendet, um eine resultierende Kostenkurve in demselben Format zu erstellen.

$$K_{spez} = a \cdot x^b \quad (31)$$

Mit	K_{spez}	[€/kW]	spezifischen Kosten
	a	[€/kW]	Variable
	b	[-]	Variable
	x	[-]	Nennleistung geteilt durch ihre Einheit (kW)

7.1.1.1 Gaskessel

Die Kostenkurve des Gaskessels wird aus den Primärdatenquellen BKI (Tabelle 21), MAP (Tabelle 22) und BBSR (Gleichung (32) (BBSR 2014)) abgeleitet und mit den Sekundärquellen Kotzur und BDEW verglichen. Die Daten für jede Quelle bezogen auf das Jahr 2020 sind in Abbildung 44 dargestellt und die abgeleiteten Parameter a und b für die angepasste Trendlinie der Quellen und die resultierende Kurve sind in Tabelle 23 zu finden. Die Kosten beinhalten den Ausbau der alten Gastherme.

Tabelle 21: BKI-Originaldaten für Gasheizkessel, 2020 (BKI 2021a)

Leistung [kW]	Vollkosten [€]		
	von	Durchschnitt	bis
0...15	3927.06	5112.23	6021.92
15...25	4276.71	5423.78	6160.17
25...50	4651.99	5657.44	6953.2
50...150	11276.54	12431.6	15299.95
150...225	14209.44	15315.95	16327.96
225...400	19451.73	21875.99	23300.73

Tabelle 22: MAP-Originaldaten für Gasheizkessel (Stuible et al. 2016)

Referenz-Jahr	Leistung [kW]	Investment [€]	Installation [€]	Vollkosten [€]
2013	19	2683	1603	4286
	32	3791	1664	5455
	199	13262	1904	15166
	329	18654	1975	20629
2014	19	2758	1603	4361
	32	3898	1664	5562
	199	12633	1904	14537
	329	19177	1975	21152

$$K_{abs} = 4300\text{€} + 111 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot P \quad (32)$$

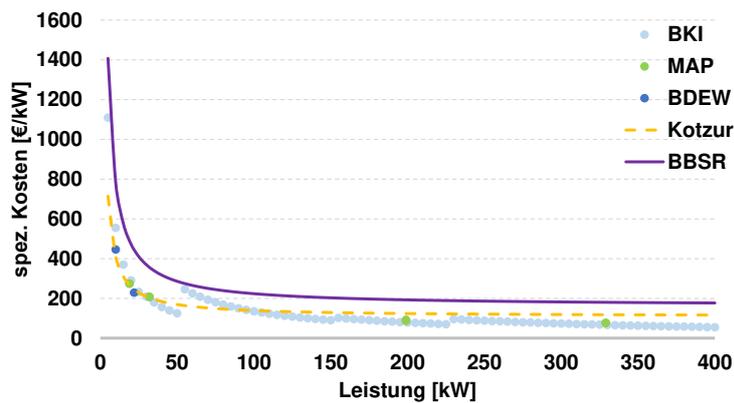


Abbildung 44: Kostendaten für den Gaskessel (Primär- und Sekundärquellen), bezogen auf das Jahr 2020

Tabelle 23: Datenquellen und Kostendaten für den Gaskessel (Primär- und Sekundärquellen), bezogen auf das Jahr 2020

Quelle	Kostenkurve	Parameter a		Parameter b	
		Wert	Einheit	Wert	Einheit
BKI [1]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	1782.3	€/kW	-0.688	-
MAP [1]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	1010.8	€/kW	-0.451	-
BBSR [3]	$K_{abs} = a + b \cdot P$	6234.02	€	160.92	€/kW
Ergebnis [2]	$K_{spec} = a \cdot x^b$	1045.6	€/kW	-0.42	-

Alle Werte bezogen auf 2020 über BPI (BKI 2021b)

[1] potentielle Trendlinie, die durch die Werte der einzelnen Primärquellen angepasst wird

[2] potentielle Trendlinie, die durch den Durchschnitt der Werte der Primärquellen angepasst wird

[3] ursprüngliche Kostenkurve angepasst über BPI und Mehrwertsteuer von 19%

7.1.1.2 Elektrischer Heizstab

Die Kostenkurve für den Elektroerhitzer wurde aus einer kurzen eigenen Recherche in vier Online-Shops abgeleitet, da keine primären Datenquellen zur Verfügung standen. Die Installationskosten werden entsprechend der vom BKI angegebenen Installationszeit für vergleichbare Arbeiten zur Installation eines Durchlauferhitzers addiert. Die angepassten Daten für jede Quelle bezogen auf das Jahr 2020 sind in Abbildung 45 dargestellt und die abgeleiteten Parameter für die angepasste Trendlinie der Quellen und die resultierende Kurve sind in Tabelle 24 zu finden.

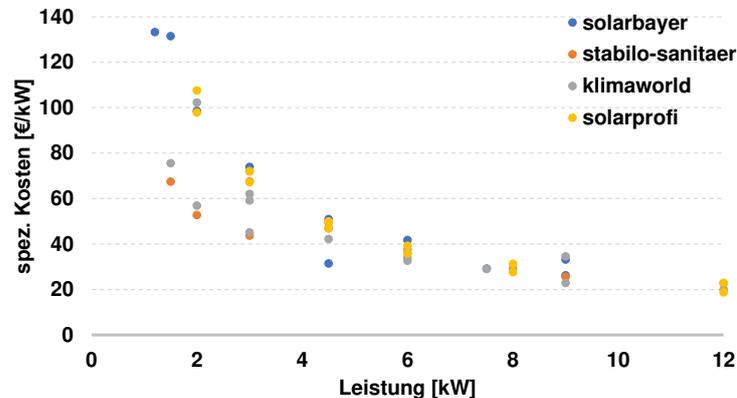


Abbildung 45: Kostendaten für den elektrischen Heizstab, bezogen auf das Jahr 2020

Tabelle 24: Kostenkurven für Quellen und Ergebnis für den elektrischen Heizstab, bezogen auf das Jahr 2020

Quelle	Kostenkurve	Parameter a		Parameter b	
		Wert	Einheit	Wert	Einheit
Solarbayer ^[1] ^[5]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	165.83	€/kW	-0.824	-
Stabilo Sanitär ^[1] ^[5]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	88.2	€/kW	-0.522	-
Klimaworld ^[1] ^[5]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	118.68	€	-0.675	€/kW
Solarprofi ^[1] ^[5]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	186.99		-0.891	
Ergebnis ^[2]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	141.99	€/kW	-0.755	-

Alle Werte bezogen auf 2020 über BPI (BKI 2021b)

^[1] potentielle Trendlinie, die an die Werte jeder Quelle angepasst wird

^[2] potentielle Trendlinie, die durch den Durchschnitt der Quellwerte angepasst wird

^[5] Montagekosten nach BKI Montagezeit und Personalkosten enthalten, $K_{inst} = 31.81$ €

7.1.1.3 Wärmespeicher

Die Kostenkurve der Wärmespeicherung wird aus den Primärdatenquellen BKI (Tabelle 25) und FfE (Gleichung (33) und (34)) abgeleitet und mit der Sekundärquelle Kotzur verglichen. Die Installationskosten werden zur FfE-Kurve addiert. Die angepassten Daten für jede Quelle bezogen auf 2020 sind in Abbildung 46 dargestellt und die abgeleiteten Parameter für die angepasste Trendlinie der Quellen und die resultierende Kurve sind in Tabelle 26 zu finden.

Tabelle 25: BKI-Originaldaten für Wärmespeicher, 2020 (BKI 2021a)

Volumen [l]	Vollkosten [€]			Installationsdauer [h]
	von	Durchschnitt	bis	
0...500	3008.43	3498.18	4085.87	3.4
500...1000	3096.6	3732.51	4354.6	4.6

$$K_{abs} = 3.126 \frac{\text{€}}{\text{l}} \cdot e^{-1.14 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{l}} \cdot V} + 0.7402 \frac{\text{€}}{\text{l}} \cdot e^{-2.22 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{l}} \cdot V} \quad (33)$$

$$K_{abs} = 2.556 \frac{\text{€}}{\text{l}} \cdot e^{-2.48 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{l}} \cdot V} + 0.7348 \frac{\text{€}}{\text{l}} \cdot e^{-1.38 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{l}} \cdot V} \quad (34)$$

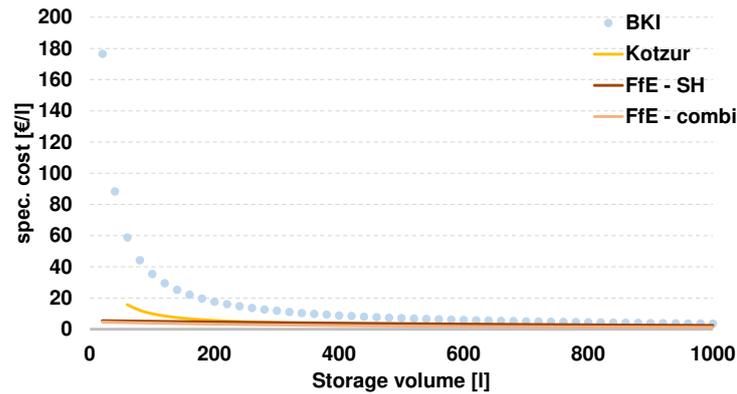


Abbildung 46: Kostendaten für die Wärmespeicherung (primäre und sekundäre Quellen), bezogen auf das Jahr 2020

Tabelle 26: Kostenkurven für Primärquellen und Ergebnis für die Wärmespeicherung, bezogen auf das Jahr 2020

Quelle	Kostenkurve	Parameter a		Parameter b		Parameter c		Parameter d	
		Wert	Einheit	Wert	Einheit	Wert	Einheit	Wert	Einheit
BKI [1]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	3530.8	€/l	-1	-				
FfE RW [3]	$K_{abs} = (a \cdot e^{b \cdot V} + c \cdot e^{d \cdot V}) \cdot (1 + c_{inst})$	4.308	€/l	-	1/l	0.857	€/l	-	1/l
FfE - Kombi [3] [5]		3.523	€/l	-	1/l	0.851	€/l	-	1/l
Ergebnis [2]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	619.79	€/kW	-0.804	-				

Alle Werte bezogen auf 2020 über BPI (BKI 2021b)

[1] potentielle Trendlinie, die an die Werte jeder Quelle angepasst wird

[2] potentielle Trendlinie, die durch den Durchschnitt der Quellwerte angepasst wird

[3] ursprüngliche Kostenkurve angepasst über BPI und Mehrwertsteuer von 19%

[5] Montagekosten nach BKI Montagezeit und Personalkosten enthalten, $K_{inst} = 8.89 \%$

7.1.1.4 Luftwärmepumpe

Die Kostenkurve der Luftwärmepumpe wird aus den Primärdatenquellen BKI (Tabelle 27), MAP (Tabelle 28) und IER (Gleichung (35) (Wolf et al. 2014)) abgeleitet und mit den Sekundärquellen Kotzur, LiB und BDEW verglichen. Die Installationskosten werden zu den IER- und LiB-Kurven addiert. Die Daten für jede Quelle in Bezug auf 2020 sind in Abbildung 47 dargestellt und die abgeleiteten Parameter a und b für die angepasste Trendlinie der Quellen und die resultierende Kurve sind in

Tabelle 29 zu finden.

Tabelle 27: BKI-Originaldaten für die Luftwärmepumpe, 2020 (BKI 2021a)

Leistung [kW]	Vollkosten [€]			Installationsdauer [h]
	von	Durchschnitt	bis	
0...10	16286.2	19160.24	22034.27	6
10...20	19129.83	22505.68	25881.53	6
20...35	24752.44	29120.52	33488.6	6

Tabelle 28: MAP-Originaldaten für die Luftwärmepumpe (Stuible et al. 2016)

Referenzjahr	Leistung [kW]	Vollkosten [€]
2013	19	22198
	32	29449
	199	81951
	329	131781
2014	19	21220
	32	26175
	199	79729
	329	131781

$$K_{abs} = 3468.35 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot x^{-0.53} \quad (35)$$

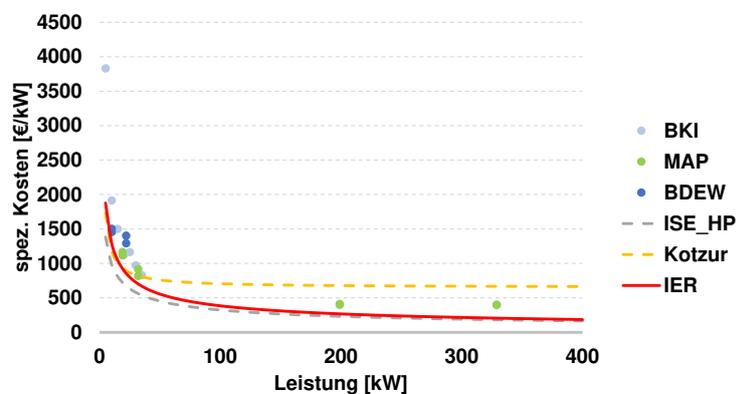


Abbildung 47: Kostendaten für die Luftwärmepumpe (Primär- und Sekundärquellen), bezogen auf das Jahr 2020

Tabelle 29: Kostenkurven für Primärquellen und Ergebnis für die Luftwärmepumpe, bezogen auf das Jahr 2020

Quelle	Kostenkurve	Parameter a		Parameter b	
		Wert	Einheit	Wert	Einheit
BKI ^[1]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	11681	€/kW	-0.745	-
MAP ^[1]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	3364.5	€/kW	-0.382	-
IER ^[5]	$K_{spez} = a \cdot x^b \cdot (1 + c_{inst})$	4315.19	€/kW	-0.53	-
Ergebnis ^[2]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	5670.1	€/kW	-0.537	-

Alle Werte bezogen auf 2020 über BPI (BKI 2021b)

^[1] potentielle Trendlinie, die an die Werte jeder Quelle angepasst wird

^[2] potentielle Trendlinie, die durch den Durchschnitt der Quellwerte angepasst wird

^[5] Montagekosten nach BKI Montagezeit und Personalkosten enthalten, $K_{inst} = 2.12 \%$

7.1.1.5 Solewärmepumpe

Die Kostenkurve der Sole-Wärmepumpe wird aus den Primärdatenquellen BKI (Tabelle 30), MAP (Tabelle 31) und IER (Gleichung (36)) abgeleitet und mit den Sekundärquellen Kotzur und ISE_HP verglichen. Die Installationskosten werden zu den IER- und ISE_HP-Kurven hinzugefügt.

MAP ist die einzige Quelle, die die Kosten für das Bohrloch enthält. BKI liefert spezifische Kosten für das Bohrloch in Abhängigkeit von der Bohrlochlänge (Tabelle 32). Mit den folgenden Annahmen und Berechnungen (Gleichung (37) bis Gleichung (40)) werden die spezifischen Kosten auf die Wärmepumpenleistung bezogen. Gleichung (36) zeigt die allgemeine Definition der Leistungszahl einer Wärmepumpe, die in Gleichung (37) zur Berechnung der erforderlichen Quellenleistung verwendet wird. Die Länge des Bohrlochs ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der Leistung der Quelle und der spezifischen Bodenentnahme (Gleichung (38)). Schließlich werden die für die Wärmepumpenleistung spezifischen Erdsondenkosten in Gleichung (39) angegeben, indem die für die Erdsondenlänge spezifischen Erdsondenkosten mit der Länge multipliziert und durch die Wärmepumpenleistung dividiert werden (Gleichung (40)).

Die Kosten für das Bohrloch werden zu den Kosten aus BKI, IER, Kotzur und ISE_HP addiert, um eine Kostenkurve einschließlich des Bohrlochs zu erhalten. Die Dimensionierung der Bohrung folgt dem in (VDI 4640) beschriebenen Ansatz und führt zu spezifischen Kosten für die Bohrung bezogen auf die Wärmepumpenleistung (Gleichung (41)).

Annahmen:

- COP = 3
- $p_{Boden} = 50 \text{ W/m}$ bei FLH = 2400 h/a

$$COP = \frac{P_{Wärme}}{P_{el}} \quad (36)$$

$$P_{Quelle} = P_{Wärme} - P_{el} = P_{Wärme} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP}\right) \quad (37)$$

$$l_{Bohrloch} = \frac{P_{Quelle}}{p_{Boden}} = \frac{P_{Wärme}}{p_{Boden}} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP}\right) \quad (38)$$

$$\begin{aligned} K_{Bohrloch, spez, kW} &= \frac{K_{Bohrloch, spez, m} \cdot l_{Bohrloch}}{P_{heat}} \\ &= \frac{K_{Bohrloch, spez, m}}{p_{Boden}} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP}\right) \end{aligned} \quad (39)$$

mit	COP	[-]	Leistungszahl	q_{Boden}	[W/m]	Bodenentnahme
	FLH	[h/a]	jährl. Volllaststunden	$P_{Wärme}$	[kW]	thermische WP-Leistung
	P_{el}	[kW]	elektrische WP-Leistung	P_{Quelle}	[kW]	Quelleleistung
	$l_{Bohrloch}$	[m]	Länge Bohrloch			
	$K_{Bohrloch, spez, m}$	[€/m]	spezifische Bohrlochkosten in Abhängigkeit von der Länge (nach BKI)			
	$K_{Bohrloch, spez, kW}$	[€/kW]	spezifische Bohrlochkosten im Zusammenhang mit WP-Leistung			

$$K_{spez, Bohrloch} = 1695.9 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \quad (40)$$

Die Daten für jede Quelle bezogen auf das Jahr 2020 sind in Abbildung 48 dargestellt und die abgeleiteten Parameter a und b für die angepasste Trendlinie der Quellen und die resultierende Kurve einschließlich des Bohrlochs sind in Tabelle 32 zu finden. Gleichung (41) zeigt die ursprüngliche Kostenkurve für Sole-Wärmepumpen von IER (Wolf et al. 2014).

Tabelle 30: BKI-Originaldaten für die Sole-Wärmepumpe, 2020 (BKI 2021a)

Leistung [kW]	Vollkosten [€]			Installationsdauer [h]
	Von	Durchschnitt	bis	
0...15	13145.29	15465.05	17784.81	6
15...25	16692.77	19638.55	22584.34	6
25...35	20680.89	24330.46	27980.03	6
35...50	26626.65	31325.47	36024.29	7
Bohrlochkosten [€/m]	74.08	79.14	84.28	0.2

Tabelle 31: MAP-Originaldaten für die Sole-Wärmepumpe (Stuible et al. 2016)

Referenzjahr	Leistung [kW]	Vollkosten inklusive Bohrung [€]
2013	19	24994
	32	29781
	199	159458
	329	263562
2014	19	31143
	32	42598
	199	159458
	329	263562

$$K_{abs} = 2610.2 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot x^{-0.558} \quad (41)$$

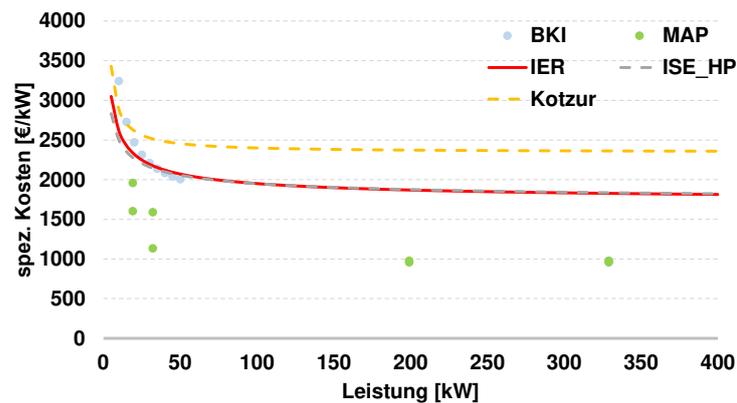


Abbildung 48: Kostendaten für die Sole-Wärmepumpe (primäre und sekundäre Quellen), bezogen auf das Jahr 2020, einschließlich Erdsonde

Tabelle 32: Kostenkurven für Primärquellen und Ergebnis für die Sole-Wärmepumpe inklusive Erdsonde, bezogen auf das Jahr 2020

Quelle	Kostenkurve	Parameter a		Parameter b	
		Wert	Einheit	Wert	Einheit
BKI ^[1] ^[4]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	6132.7	€/kW	-0.394	-
MAP ^[1]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	2970.2	€/kW	-0.203	-
IER ^[4] ^[5]	$K_{spez} = a \cdot x^b \cdot (1 + k_{inst}) + K_{spez, Bohrloch}$	3247.51	€/kW	-0.558	-
Ergebnis ^[2]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	2637.1	€/kW	-0.10	-

Alle Werte bezogen auf 2020 über BPI (BKI 2021b)

^[1] potentielle Trendlinie, die an die Werte jeder Quelle angepasst wird

^[2] potentielle Trendlinie, die durch den Durchschnitt der Quellwerte angepasst wird

^[4] Kosten für das Bohrloch werden nach BKI und eigenen Annahmen addiert

^[5] Montagekosten nach BKI Montagezeit und Personalkosten enthalten, $k_{inst} = 2.35\%$

Die Kostenkurve ohne das Bohrloch wird nur aus den BKI- und IER-Daten ermittelt (Abbildung 49) und die abgeleiteten Parameter a und b für die angepasste Trendlinie der Quellen und die resultierende Kurve ohne das Bohrloch sind in Tabelle 33 zu finden.

Tabelle 33: Kostenkurven für Primärquellen und Ergebnis für die Sole-Wärmepumpe ohne Erdsonde, bezogen auf das Jahr 2020

Quelle	Kostenkurve	Parameter a		Parameter b	
		Wert	Einheit	Wert	Einheit
BKI ^[1]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	15465	€/kW	-1	-
IER ^[5]	$K_{spez} = a \cdot x^b \cdot (1 + k_{inst})$	3247.51	€/kW	-0.558	-
Ergebnis ^[2]	$K_{spez} = a \cdot x^b$	3693.3	€/kW	-0.58	-

Alle Werte bezogen auf 2020 über BPI (BKI 2021b)

^[1] potentielle Trendlinie, die an die Werte jeder Quelle angepasst wird

^[2] potentielle Trendlinie, die durch den Durchschnitt der Quellwerte angepasst wird

^[5] Montagekosten nach BKI Montagezeit und Personalkosten enthalten, $k_{inst} = 2.35\%$

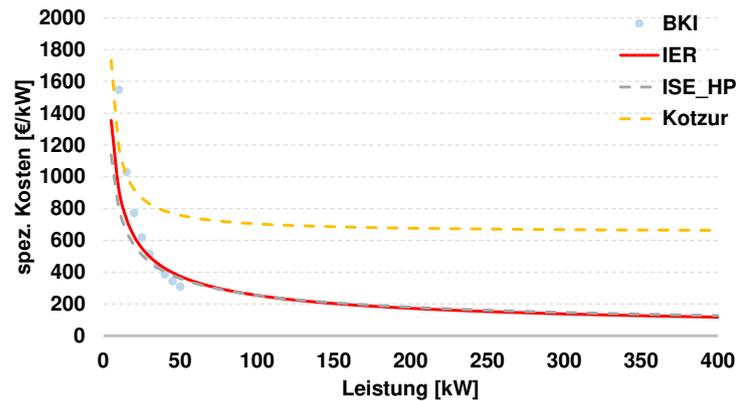


Abbildung 49: Kostendaten für die Sole-Wärmepumpe (primäre und sekundäre Quellen), bezogen auf 2020, Bohrloch exklusiv

7.1.2 Kosten der Hüll-Komponenten

Es wurden Daten aus mehreren Studien gesammelt, um Kurven der spezifischen Kosten pro Nennleistung verschiedener Komponenten für die Wärmeversorgung in Gebäuden zu erhalten. Die Quellen beziehen sich auf unterschiedliche Bezugsjahre, so dass die Kosten für das erste Quartal des Jahres 2020 über den BPI (Baupreisindex) (siehe Gleichung (42)) berechnet werden (BKI 2021b).

$$K_{2020} = K_{alt} \cdot \frac{BPI_{2020}}{BPI_{alt}} \quad (42)$$

IWU

Eine umfassende Analyse der spezifischen Kostenwerte für Gebäudesanierung und Systemkomponenten wird vom IWU (Institut für Wohnen und Umwelt) durchgeführt. Die Kostendaten beziehen sich auf das erste Quartal 2015 über den BPI. (Hinz 2015).

Für die Bewertung werden drei verschiedene Primärdatenquellen verwendet:

- KfW-Förderprogramm "Energieeffizient Sanieren" (896 Gebäude)
- Weitere Förderprogramme von Energieagenturen (232 Gebäude, vor allem im Raum Mannheim und Hannover)
- Private Ingenieurbüros (49 Gebäude, insbesondere für die Sanierung der obersten Geschossdecke)

Bei allen untersuchten Häusern handelt es sich um Wohngebäude, überwiegend um Ein- und Zweifamilienhäuser mit einer Wohnfläche von bis zu 300 m². Nach Angaben des IWU ist das Kostenniveau vergleichsweise hoch, da die meisten der untersuchten Technologien zum Zeitpunkt der Studie bereits auf dem Markt eingeführt waren. Daher sind die Kostendaten nur bedingt auf Sanierungen im Passivhausstandard übertragbar (Hinz 2015).

Eine Aktualisierung der Studie wurde im April 2021 vorgenommen. Da eine Fortführung der empirischen Datenbasis von 2015 nicht möglich war, werden die Kostenkurven über den BPI entsprechend den jeweiligen Gewerken auf das Jahr 2020 angepasst. Die verwendeten BPI-Werte liegen zwischen 1,116 und 1,214 (Koch et al. 2021). Der Ansatz dieser Kostenbewertung verwendet einen allgemeinen BPI von 1,175, der mit den gewerks-spezifischen BPI-Werten vergleichbar ist. Um die Transparenz und einen einfachen Ansatz zu wahren, wird die Aktualisierung der Studie in dieser Bewertung nicht berücksichtigt.

BBSR

Eine weitere umfassende Bewertung wird vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) durchgeführt. Es werden 170 Bundesliegenschaften aus zwei Quellen berücksichtigt:

- Konjunkturprogramm (KP II)
- Energiesparprogramm (EEP "120-Millionen-Programm")

Die Autoren gehen davon aus, dass 20 bis 60 % der Kostendaten in den Programmen nicht erfasst wurden. Dies kann zu vergleichsweise niedrigen Kosten führen. Die Kostendaten beziehen sich auf das erste Quartal 2013 (BBSR 2014).

Hüll-Kostenkurven

Die Gesamtkosten der Investition werden in energieeffizienzbezogene Zusatzkosten (EMK) und ohnehin anfallende Kosten (SK) aufgeteilt. Letztere fallen in jedem Fall an und haben nichts mit der energetischen Gebäudesanierung zu tun, während die EM-Kosten ausschließlich durch Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs entstehen.

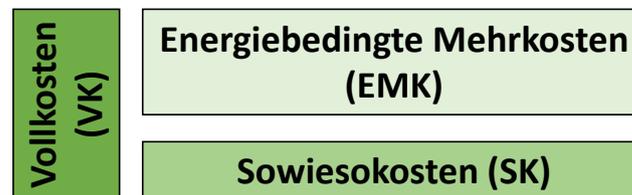


Abbildung 50: Kostenstruktur: Vollkosten = Energiebedingte Mehrkosten+ Sowiesokosten

7.1.2.1 Fassade

Die Kostenkurve für die Fassade bezieht sich auf den Median der IWU- und BBSR-Daten. Beide Kostenkurven folgen einer linearen Funktion (Gleichung (43)). Die Parameter a und b für die Quellen und die daraus resultierende Kurve sind in Tabelle 34 zu finden. Tabelle 35 erläutert die Aufteilung der EMK- und SK. Eine grafische Darstellung der Kostenkurven findet sich in Abbildung 51 und Abbildung 52. Die ohnehin anfallenden Kosten beziehen sich auf eine Sanierung der Fassade ohne zusätzliche Dämmung und sind daher unabhängig von der Dämmstärke.

$$K_{spez} = a \cdot d_{iso} + b \quad (43)$$

Mit	K_{spez}	[€/m ²]	Spezifische Kosten	a	[€/m ² /cm]	Variable
	d_{iso}	[cm]	Dämmstoffdicke	b	[€/m ²]	Variable

Tabelle 34: Kostenparameter a und b für die Fassadensanierung, Originaldaten und resultierende Parameter

	Kosten- aufteilung	Parameter a		Parameter b	
		[€/m ² /cm]		[€/m ²]	
		Original ^{[1],[2]}	Bezogen auf 2020 ^[3]	Original ^{[1],[2]}	Bezogen auf 2020 ^[3]
IWU	VK	2.8102	3.307	96.882	114.002
	EMK	2.81	3.307	19.77	23.263
	SK	-	-	77.112	90.738
BBSR	VK	1.9	2.315	75	91.372
	EMK	1.9	2.315	26	31.676
	SK	-	-	49	59.696
Ergebnis	VK	-	2.811	-	102.687
	EMK	-	2.811	-	27.470
	SK	-	-	-	75.217
^[1] Originaldaten IWU (Hinz 2015) ^[2] Originaldaten BBSR (BBSR 2014) ^[3] Eigene Berechnung über BPI (BKI 2021b)					

Tabelle 35: Umlage der Kosten für die Fassadensanierung (Hinz 2015), (BBSR 2014)

Beschreibung	Umfang
VK	Exklusiv: Baugerüst
EMK	Dämmmaterial, Einbau, Entfernung der bisherigen Dämmung, Brandschutzmaßnahmen, damit verbundene sonstige Zusatzarbeiten
SK	Sanierung der Fassade ohne zusätzliche Dämmung (unabhängig von der Dämmstärke): Altputz entfernen, Reinigung, (De-)Montage / Austausch von Elementen (Briefkasten, Steckdosen, Jalousien, Fallrohre, äußere Fensterbretter, Wärmebrücken vermeiden, Grundputz und Armierung aufbringen

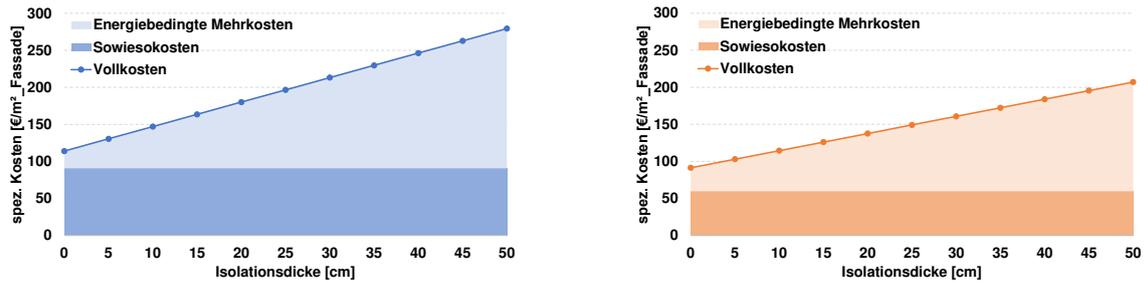


Abbildung 51: Aufteilung der Kosten für IWU (links) und BBSR (rechts) für die Fassade

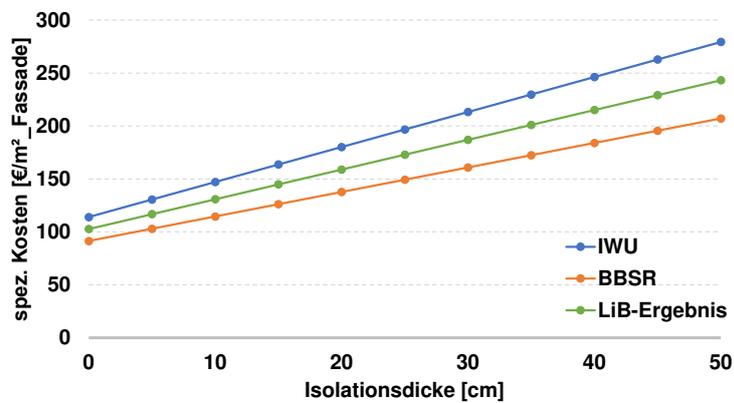


Abbildung 52: Kostenkurven der Vollkosten für die Fassade - Quellen und Ergebnis

7.1.2.2 Kellerdecke

Die Kostenkurve für die Kellerdecke / das unterste Geschoss bezieht sich auf den Median der IWU- und BBSR-Daten. Die Sanierung erfolgt von unten, ohne dass eine Abdeckung für die mechanische Stabilität angebracht wird. Beide Kostenkurven folgen einer linearen Funktion (Gleichung (43)). Die Parameter a und b für die Quellen und die resultierende Kurve sind in Tabelle 36 zu finden. Tabelle 37 erläutert die Aufteilung der Energiebedingten Mehr- und Sowiesokosten. Eine grafische Darstellung der Kostenkurven findet sich in Abbildung 53 und Abbildung 54. Da die Maßnahme ausschließlich aus Gründen der Energieeffizienz durchgeführt wird, werden die vollen Kosten als EM-Kosten zugewiesen, und es fallen keine Sowiesokosten an. Bei der Berechnung der äquivalenten Dämmstärke werden 20 % Holz für die Deckenbalken berücksichtigt.

Tabelle 36: Kostenparameter a und b für die Kellerdeckensanierung, Originaldaten und resultierende Parameter

	Kosten- aufteilung	Parameter a		Parameter b	
		[€/m ² /cm]		[€/m ²]	
		Original ^{[1],[2]}	Bezogen auf 2020 ^[3]	Original ^{[1],[2]}	Bezogen auf 2020 ^[3]
IWU	VK	1.25	1.471	30.75	36.184
	EMK	1.25	1.471	30.75	36.184
	SK	-	-	-	-
BBSR	VK	1.8	2.193	45	54.823
	EMK	1.8	2.193	45	54.823
	SK	-	-	-	-
Ergebnis	VK	-	1.832	-	45.504
	EMK	-	1.832	-	45.504
	SK	-	-	-	-

^[1] Originaldaten IWU (Hinz 2015)
^[2] Originaldaten BBSR (BBSR 2014)
^[3] Eigene Berechnung über BPI (BKI 2021b)

Tabelle 37: Umlage der Kosten für die Kellerdeckensanierung (Hinz 2015), (BBSR 2014)

Beschreibung	Umfang
VK	Reinigung, (De-) & Installation von Möbeln und Beleuchtung, Untergrundvorbereitung, Vermeidung von Wärmebrücken, Dämmmaterial, Installation von Isolierung
EMK	Siehe Vollkosten
SK	-

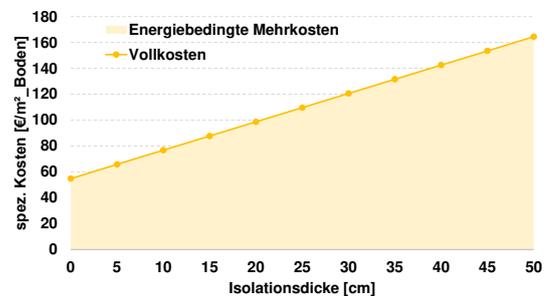
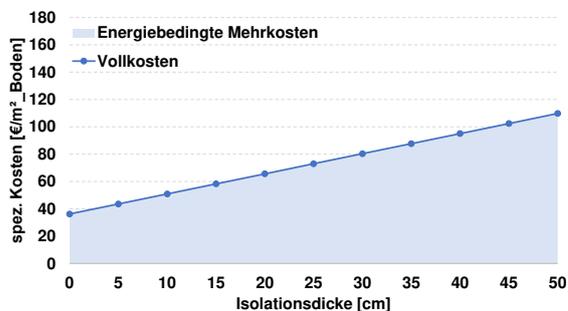


Abbildung 53: Aufteilung der Kosten für IWU (links) und BBSR (rechts) für die Kellerdecke

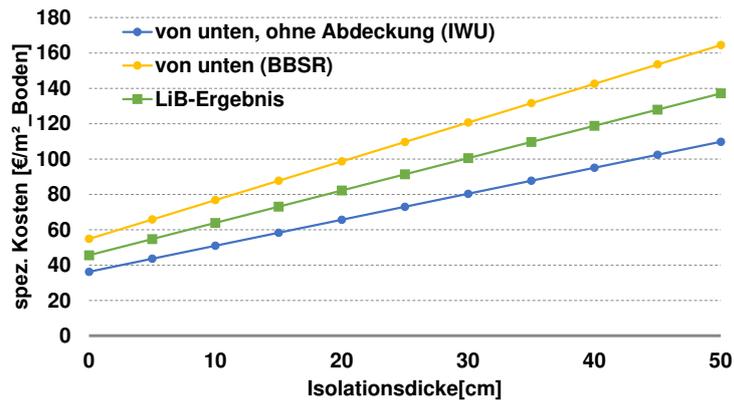


Abbildung 54: Kostenkurven der Vollkosten des Fußbodens - Quellen und Ergebnis

7.1.2.3 Fenster

Die Kostenkurve für die Fenster bezieht sich nur auf die IWU-Daten. Die Kostenkurven werden für doppelt verglaste ($U = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$), dreifach verglaste ($U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$) und passive Standardfenster ($U < 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$) angegeben. Sie sind abhängig von der Fensterfläche A_{window} . Die BBSR-Daten werden aufgrund ihres ungeeigneten Kostenformats, das sich sowohl auf den Umfang als auch auf die Fläche der Fenster bezieht, nicht berücksichtigt.

Die resultierenden Kurven sind daher identisch mit den IWU-Kurven und folgen einer Potenzialfunktion (Gleichung (44)). Die entsprechenden Parameter a und b finden sich in Tabelle 38. Die Sowiekosten beziehen sich auf einen Austausch von doppelt verglasten Fenstern, da Fenster mit einem niedrigeren U -Wert nicht mehr auf dem Markt erhältlich sind (Hinz 2015). Tabelle 39 erläutert die Aufteilung der Energiebedingten Mehr- und Sowiekosten. Eine grafische Darstellung der Kostenkurven findet sich in Abbildung 55.

$$K_{\text{spez}} = a \cdot \frac{A_{\text{Fenster}}^b}{m^2} \quad (44)$$

mit	K_{spez}	[€/m ²]	Spezifische Kosten	a	[€/m ²]	Variable
	A_{Fenster}	[m ²]	Fensterfläche	b	[-]	Variable

Tabelle 38: Kostenparameter a und b für den Fenstertausch, Originaldaten und resultierende Parameter

IWU = Ergebnis	Kosten-aufteilung	Parameter a		Parameter b
		[€/m ²]		[-]
		Original ^[1]	Bezogen auf 2020 ^[3]	Original = bezogen auf 2020 ^[1]
Zweifach verglast	VK	397.07	462.23	-0.232
	EMK	-	-	-
	SK	397.07	462.23	-0.232
Dreifach verglast	VK	459.99	541.27	-0.231
	EMK	62.891	74.00	-0.225
	SK	397.07	462.23	-0.232
Passiv-Standard	VK	631.21	742.75	-0.208
	EMK	224.06	263.65	-0.136
	SK	397.07	462.23	-0.232

^[1] Originaldaten IWU (Hinz 2015)
^[3] Eigene Berechnung über BPI (BKI 2021b)

Tabelle 39: Umlage der Kosten für den Fensteraustausch (Hinz 2015)

Beschreibung	Umfang
VK	Exklusiv: Außenfensterbrett (in den Kosten für die Fassade enthalten)
EMK	Exklusiv: Außenfensterbrett (in den Kosten für die Fassade enthalten)
SK	Einbau Fenster mit Doppelverglasung

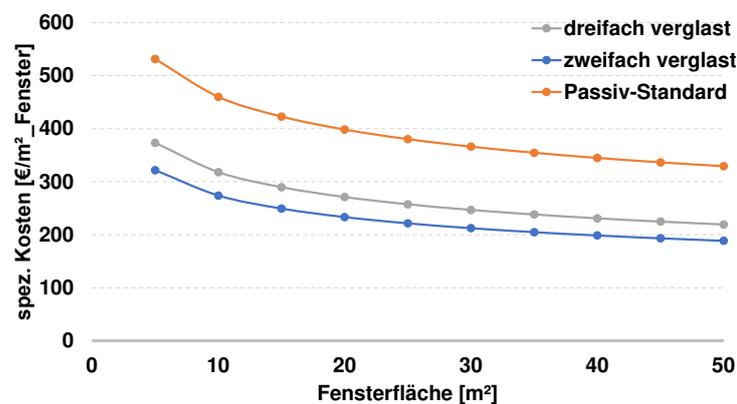


Abbildung 55: Kostenkurven der Vollkosten für den Austausch von Fenstern

7.1.2.4 Dach

Die Kostenkurve für die Dachsanierung von außen bezieht sich auf Daten des BBSR und IWU. Die Sanierung erfolgt von außen mit Austausch der Dachhaut. Die resultierende Kurve folgt einer linearen Funktion (Gleichung (43)). Die entsprechenden Parameter a und b sind in Tabelle 40 zu finden. Tabelle 41 erläutert die Aufteilung der Energiebedingten Mehr- und Sowiesokosten. Eine grafische Darstellung der Kostenkurven findet sich in Abbildung 56. Für die Bewertung im LowEx-Bestand wird die Dachsanierung von außen betrachtet, da die Dachhaut ausgetauscht werden muss.

Tabelle 40: Kostenparameter a und b für die Dachsanierung von außen, Originaldaten und resultierende Parameter

	Kosten- aufteilung	Parameter a		Parameter b	
		[€/m ² /cm]		[€/m ²]	
		Original ^{[1],[2]}	Bezogen auf 2020 ^[3]	Original ^{[1],[2]}	Bezogen auf 2020 ^[3]
IWU	VK	2.7738	3.26	151.01	177.69
	EMK	2.37	2.79	11.31	13.31
	SK	0.4038	0.48	139.7	164.39
BBSR	VK	1.9	2.31	115	140.10
	EMK	1.9	2.31	0	0.00
	SK	0	0.00	115	140.10
Ergebnis	VK	-	2.79	-	158.90
	EMK	-	2.55	-	6.65
	SK	-	0.24	-	152.24
^[1] Originaldaten IWU (Hinz 2015) ^[2] Originaldaten BBSR (BBSR 2014) ^[3] Eigene Berechnung über BPI (BKI 2021b)					

Tabelle 41: Umlage der Kosten für die Dachsanierung von außen (BBSR 2014)

Beschreibung	Umfang
VK	Exklusiv: Gerüst, Fenster, Fallrohre
EMK	Dämmung, Dampfsperre, Verfestigung unter der Konstruktion
SK	Kosten im Zusammenhang mit der Erneuerung der Dachhaut, dem Entfernen und Anbringen von Dachziegeln, Arbeiten an der Regenrinne, Treppen, Blitzschutz

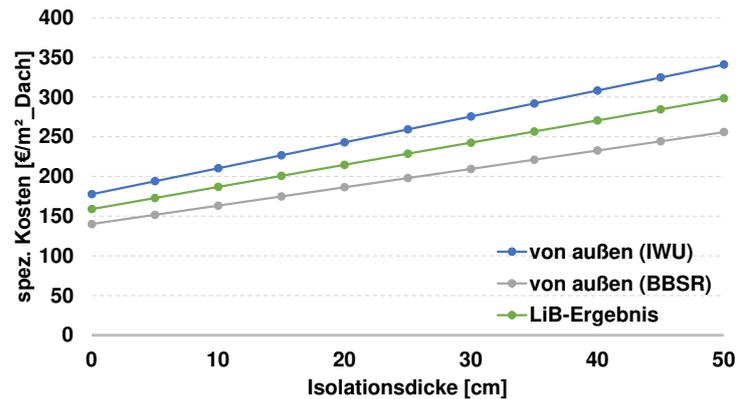


Abbildung 56: Kostenkurven der Vollkosten des Daches von außen - Quellen und Ergebnis

7.1.2.5 Oberste Geschossdecke

Die Kostenkurve für die oberste Geschossdecke bezieht sich auf den Median der IWU- und BBSR-Daten. Die Sanierung erfolgt von oben, wobei eine Abdeckung zur mechanischen Stabilität angebracht wird, so dass die Oberfläche zugänglich ist. Beide Kostenkurven folgen einer linearen Funktion (Gleichung (43)). Die Parameter a und b für die Quellen und die resultierende Kurve sind in Tabelle 42 zu finden.

Tabelle 43 erläutert die Aufteilung der Energiebedingten Mehr- und Sowiesokosten. Eine grafische Darstellung der Kostenkurven findet sich in Abbildung 57 und Abbildung 58. Da die Maßnahme ausschließlich aus Gründen der Energieeffizienz durchgeführt wird, werden die vollen Kosten als EMz-Kosten zugewiesen, und es fallen keine AI-Kosten an. Für die Berechnung der äquivalenten Dämmstärke werden 20 % Holz für die Deckenbalken berücksichtigt (Hinz 2015).

Tabelle 42: Kostenparameter a und b für die Sanierung der obersten Geschossdecke, ursprüngliche Daten und resultierende Parameter

	Kosten-aufteilung	Parameter a		Parameter b	
		[€/m²/cm]		[€/m²]	
		Original ^{[1],[2]}	Bezogen auf 2020 ^[3]	Original ^{[1],[2]}	Bezogen auf 2020 ^[3]
IWU	VK	1.78	2.09	28.03	32.98
	EMK	1.78	2.09	28.03	32.98
	SK	-	-	-	-
BBSR	VK	1.8	2.19	20	24.37
	EMK	1.8	2.19	20	24.37
	SK	-	-	-	-
Ergebnis	VK	-	2.14	-	28.67
	EMK	-	2.14	-	28.67
	SK	-	-	-	-

^[1] Originaldaten IWU (Hinz 2015)

^[2] Originaldaten BBSR (BBSR 2014)

^[3] Eigene Berechnung über BPI (BKI 2021b)

Tabelle 43: Umlage der Kosten für die Sanierung der obersten Geschossdecke (Hinz 2015), (BBSR 2014)

Beschreibung	Umfang
VK	Reinigung, Vorbereitung, Isoliermaterial, Einbau, Dampfsperre, Abdeckung, Brandschutzmaßnahmen
EMK	Siehe Vollkosten
SK	-

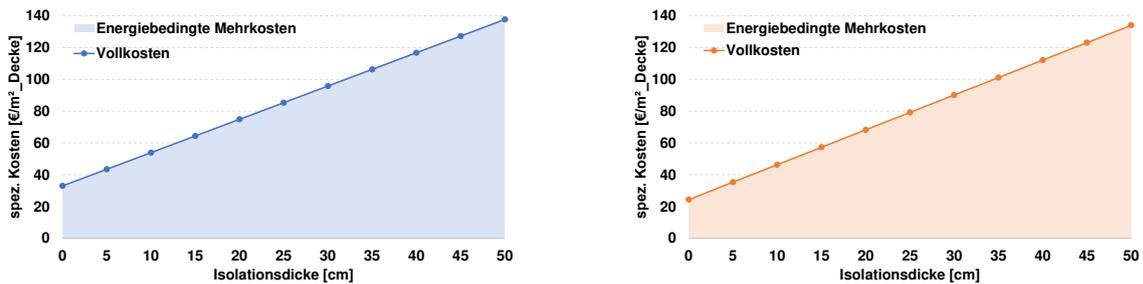


Abbildung 57: Aufteilung der Kosten für IWU (links) und BBSR (rechts) für die oberste Geschossdecke

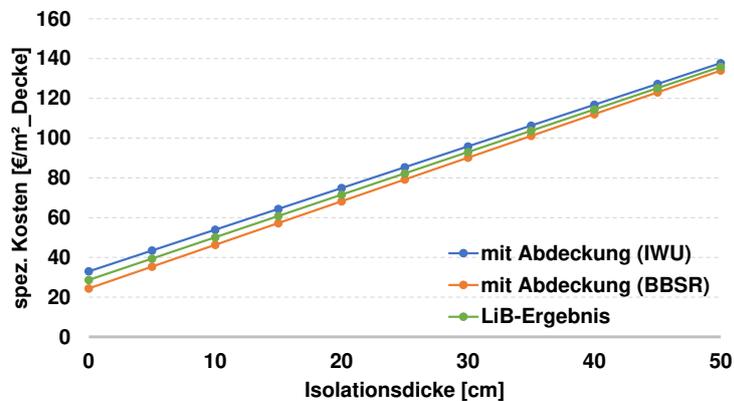


Abbildung 58: Kostenkurven der Vollkosten der obersten Geschossdecke - Quellen und Ergebnis

7.1.2.6 Gerüst

Die Kostenkurve für das Gerüst bezieht sich nur auf die Daten des BBSR. Die IWU-Daten werden nicht berücksichtigt, da ihr Kostenformat, das sich auf die Wohnfläche des Gebäudes bezieht, ungeeignet ist.

Die spezifischen Kosten für das Gerüst hängen ursprünglich von der Nutzungszeit der Fassadenfläche ab. Als Basiszeit wird eine Zeit von vier Wochen angesetzt und für jede Woche, die den Basiszeittext verlängert, fallen zusätzliche Kosten an (Gleichung (45)). Im Rahmen dieser Studie wird angenommen, dass es keine Zeitverlängerung gibt, d. h. $t_{\text{ext}} = 0$ und die Kostenkurve vereinfacht sich zu Gleichung (46). Die entsprechenden Parameter a und c sind in Tabelle 44 zu finden. Da eine

generelle Aufteilung der Kosten nicht möglich ist, werden die Vollkosten als AI-Kosten aufgeteilt, was in Tabelle 45 dargestellt ist.

$$K_{abs} = A_{Fassade} \cdot (a + b \cdot t_{ext}) + c \quad (45)$$

$$K_{spez} = a + \frac{c}{A_{Fassade}} \quad (46)$$

mit	K_{abs}	[€]	Absolutkosten	a	[€/m ²]	Variable
	$A_{Fassade}$	[m ²]	Fassadenfläche	b	[€/m ² /Woche]	Variable
	t_{ext}	[Wochen]	Fristverlängerung um 4 Wochen			
	c	[€]	Variable	K_{spez}	[€/m ²]	Spezifische Kosten

Tabelle 44: Kostenparameter a und b für das Gerüst, Originaldaten und resultierende Parameter

	Kosten-aufteilung	Parameter a		Parameter c	
		[€/m ²]		[€]	
		Original	Bezogen auf 2020 ^[3]	Original	Bezogen auf 2020 ^[3]
BBSR = Ergebnis	VK	7.6 ^[2]	9.26	326 ^[2]	397.16
	EMK	3.8 ^[4]	4.63	163 ^[4]	198.58
	SK	3.8 ^[4]	4.63	163 ^[4]	198.58
^[2] Originaldaten BBSR (BBSR 2014) ^[3] Eigene Berechnung über BPI (BKI 2021b) ^[4] Standort der vom IWU abgeleiteten Kosten (Hinz 2015)					

Tabelle 45: Umlage der Kosten für das Gerüst (BBSR 2014)

Beschreibung	Umfang
CK	Kosten für Gerüstmiete, (De-) & Montage, Abdeckungen, Genehmigungen, verkehrstechnische Belange, Baukran, Materialaufzüge
EMK	-
SK	Siehe Vollkosten

7.1.3 Energiepreisszenarien

Die Energiepreise basieren auf der Kurzstudie des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln gGmbH (EWI) und des E.ON Energy Research Center (E.ON ERC) der RWTH Aachen (Wagner et al. 2019a). Die Studie wurde im Auftrag der E.ON SE angefertigt. In dieser Studie wurden drei Szenarien für eine CO₂-Bepreisung definiert, welche eine mögliche Entwicklung von

2017 bis 2050 darstellen. Die CO₂-Bepreisung gilt für alle Bereiche außerhalb des existierenden CO₂-Zertifikatehandels. So gibt es zum einem das „Business-as-usual“ Szenario (BAU) ohne CO₂-Bepreisung (in der EWI-Studie REF genannt) sowie das COP1 und COP2 Szenario mit unterschiedlichem CO₂-Bepreisungspfad. Die Preispfade sind in Tabelle 46 dargestellt. Die Autoren gehen davon aus, dass die Einnahmen durch die CO₂-Bepreisung dafür eingesetzt werden, den Haushaltsstrompreis zu senken. Anhand dieser drei Szenarien wird in der Kurzstudie die Energienachfrage in den unterschiedlichen Sektoren bestimmt. Anhand der neuen Nachfrage wird über ein Energiesystemmodell der Kraftwerksausbau und -einsatz optimiert. Hieraus resultieren neue Endverbraucherpreise. Diese Preise haben wiederum Einfluss auf die Nachfrage in den unterschiedlichen Sektoren, so dass das Vorgehen iteriert wird, bis sich ein stabiles Ergebnis einstellt. Ein Teil des Ergebnisses ist die Bestimmung von Endverbraucherpreisen für Haushalte in den Jahren 2017, 2030 und 2050 (Tabelle 47).

Tabelle 46: CO₂-Preisfad der EWI-Kurzstudie (Wagner et al. 2019a, S. 4)

CO ₂ -Preis in €/t _{CO₂äq}	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
REF	-						
COP1	30	55	80	105	130	155	180
COP2	30	55	96	137	178	219	260

Tabelle 47: Endverbraucherpreise für Strom und Erdgas für die drei Preisszenarien der EWI-Kurzstudie (Wagner et al. 2019b, S. 4)

Jahr	Einheit	Strompreis			Erdgaspreis		
		REF	COP1	COP2	REF	COP1	COP2
2017	ct/kWh	29,8	29,8	29,8	6,6	6,6	6,6
2030	ct/kWh	28,8	24,3	24,3	8,7	10,8	11,2
2050	ct/kWh	25,7	25,1	25,2	9,4	14,7	16,6

Es ist zu erkennen, dass die Strompreise bis zum Jahr 2050 fallen. Dieser Effekt wird von den Autoren der Kurzstudie anhand des Wegfalls der EEG-Umlage erklärt. In den CO₂-Bepreisungsszenarien, COP1 und COP2, wird angenommen, dass die Einnahmen durch die CO₂-Besteuerung dafür verwendet werden, die EEG-Umlage zu reduzieren. Hierdurch ist die starke Absenkung im Vergleich zum REF-Szenario im Jahr 2030 zu erklären. Im Jahr 2050 befinden sich alle drei Szenarien auf einem ähnlichen Niveau, da die EEG-Umlage bis dahin in allen Szenarien wegfällt. Es ist allerdings zu erkennen, dass der Strompreisfad für COP1 und COP2 beinahe deckungsgleich ist. Der starke Anstieg des Gaspreises wird auf einen Anstieg im Welthandelsmarkt und die hohe CO₂-Bepreisung zurückgeführt.

7.1.4 CO₂-Emissionsfaktoren von Strom und Erdgas

Die CO₂- und Primärenergie-Faktoren des deutschen Strommixes (Strom lokal) werden von der IINAS-Studie „Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2018 sowie Ausblicke auf 2020 bis 2050“ übernommen (Fritsche et al. 2019). Die Bilanzierungen erfolgten mit dem Computermodell GEMIS Version 5.0 (IINAS 2019).

Nachfolgend sind die jährlichen Werte der CO₂- und Primärenergiefaktoren für den Netzstrom sowie Erdgas tabellarisch angegeben.

Tabelle 48: CO₂- und Primärenergiefaktoren der Jahre 2020, 2030 und 2050 von Strom nach IINAS (Fritsche et. al. 2019) (Strom lokal), und von Erdgas nach (IINAS 2019) (Erdgas lokal, mit PtG, auf Brennwert bezogen) sowie lineare Interpolation der zwischenliegenden Jahre.

Jahr	Strom lokal nach (Fritsche et. al. 2019) (Szenario KS95)		Erdgas lokal nach GEMIS 5.0 (IINAS 2019) mit PtG (auf Brennwert bezogen)	
	Spezifische CO ₂ Emissionen [g/kWh]	Primärenergie- faktor []	Spezifische CO ₂ Emissionen [g/kWh]	Primärenergie- faktor []
2020	402,9	1,47	200,8	1,07
2021	381,9	1,39	199,1	1,06
2022	360,9	1,31	197,4	1,05
2023	339,9	1,22	195,7	1,04
2024	318,9	1,14	194,0	1,03
2025	298,0	1,06	192,4	1,02
2026	277,0	0,98	190,7	1,01
2027	256,0	0,90	189,0	1,00
2028	235,0	0,81	187,3	0,99
2029	214,0	0,73	185,6	0,98
2030	193,0	0,65	183,9	0,97
2031	184,4	0,62	183,1	0,96
2032	175,8	0,59	182,2	0,96
2033	167,2	0,56	181,3	0,95
2034	158,6	0,53	180,4	0,95
2035	150,0	0,50	179,5	0,94
2036	141,4	0,47	178,7	0,94
2037	132,8	0,44	177,8	0,93
2038	124,2	0,41	176,9	0,93
2039	115,6	0,38	176,0	0,92
2040	107,1	0,35	175,2	0,92
2041	98,5	0,32	174,3	0,91
2042	89,9	0,29	173,4	0,91
2043	81,3	0,26	172,5	0,90
2044	72,7	0,23	171,6	0,90
2045	64,1	0,20	170,8	0,89
2046	55,5	0,17	169,9	0,89
2047	46,9	0,14	169,0	0,88
2048	38,3	0,11	168,1	0,88
2049	29,7	0,08	167,2	0,87
2050	21,1	0,05	166,4	0,87

Als Grundlage der Arbeiten wurden die zur Bilanzierung des nichterneuerbaren Energieverbrauchs notwendigen Basisdaten zum deutschen nationalen Stromerzeugungsmix des Jahres 2018 auf Basis von Statistiken recherchiert und Anteile der Kraftwerkstypen (nach Brennstoffen), die Entwicklung der Nutzungsgrade sowie der Vorketten ermittelt. Dabei wurden aktualisierte statistische Grundlagen verwendet (u.a. AGEBA 2019a; BAFA 2019; BMWi 2019).

Die Zukunftswerte 2020 bis 2050 beruhen auf dem Szenario „KS95“ der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ vom Öko-Institut und Fraunhofer ISI, welches das ambitionierte 95 % THG-Reduktionsziel (95 % bis 2050 ggü. 1990) verfolgt (Öko und ISI 2015). Hierbei wurden jedoch die Werte für 2020 angepasst, um einerseits den realen Entwicklungen Rechnung zu tragen und andererseits die „Anschlussfähigkeit“ an die übernommenen - KS95-Szenariojahre 2030 und 2050 sicherzustellen.

Die CO₂- und Primärenergiefaktoren von Erdgas werden in der IINAS-Studie nicht erwähnt. Daher wurden die Werte selbst mithilfe des GEMIS 5.0-Tools adaptiert (IINAS 2019). Die Werte entsprechen dem Erdgas lokal beim Verbraucher und beziehen sich auf den Heizwert. Der Materialaufwand, die Verteilung, und der Hilfsstrom für die Verbrennung im Gaskessel, sind nicht enthalten.

Die Zukunftswerte 2020 bis 2050 beruhen auf der Studie „Erneuerbare Gase - ein Systemupdate der Energiewende“ (Klein 2017), welche annimmt, dass zunehmend Windgas (PtG) im Gasnetz zum Einsatz kommt (2020: 3,4 %, 2030: 14,1 %, 2050: 25,0 %), was zu einer Reduktion der CO₂- und Primärenergiefaktoren führt.

Nach EnEV 2014 beträgt der Umrechnungsfaktor Heizwert nach Brennwert 1,11. Um auf den Brennwert-bezogene CO₂-Emissionen herzuleiten, wurde folglich der Literaturwert durch 1,11 geteilt. Diese auf den Brennwert-bezogene Werte werden in dieser Studie verwendet.

7.2 Technische und energetische Angaben

Die Ergebnisse aus Kapitel 3 repräsentieren eine Vorstudie zu den Untersuchungen von Sanierungspaketen in Kapitel 4. Daher werden an manchen Stellen unterschiedliche technische Eingangsparameter verwendet. Daher sind die Gebäudedaten, welche in der Heizsystemanalyse verwendet wurden, von den Gebäudedaten für Kapitel 3.1 und Kapitel 4 gesondert aufgeführt.

7.2.1 Gebäudedaten im Detail, Sanierung des Heizsystems

Tabelle 49: Gebäudedaten I, Gebäudebeschreibung und Gebäudeflächen/-volumina, für die Untersuchung der Sanierung des Heizsystems

Gebäudegröße		KMH	MMH	GMH
Gebäudebeschreibung				
Anzahl der Vollgeschosse	-	2	3	5
Anzahl der Wohneinheiten	-	4	12	30
Anzahl der Treppenhäuser	-	1	2	3
Wohnfläche pro Person	m ² /Pers.	43,1	45,4	44,5
Anzahl Bewohner pro Wohneinheit	-	1,75	1,67	1,70
Anzahl Bewohner pro Gebäude	-	7	20	51
Gebäudeflächen /-volumina				
Bruttogrundfläche (Energiebezugsfläche)	m ²	766	1908	4002
Nettogrundfläche / Nutzungsfläche konditioniert (Wohnfläche)	m ²	655	1633	3419
konditioniertes Bruttogebäudevolumen	m ³	2036	5106	10793
Konditionierter Wohnraum (netto)	m ³	824	2472	7860
Fläche oberste Geschossdecke (gegen unbeheizt)	m ²	192	382	572
Wandfläche (gegen Außenluft; exklusive Fensterflächen)	m ²	248	566	1264
Bodenfläche (gegen unbeheizt)	m ²	192	382	572
Gesamtfensterfläche (brutto)	m ²	44	128	316
Fensterfläche horizontal (brutto)	m ²	0	0	0
Fensterfläche Nord (brutto)	m ²	1,6	2,4	3,9
Fensterfläche Ost (brutto)	m ²	19,2	60,6	157,9
Fensterfläche Süd (brutto)	m ²	1,6	2,4	3,9
Fensterfläche West (brutto)	m ²	25,0	75,1	187,8

Tabelle 50: Gebäudedaten II, Aufbau und U-Werte der Bauteile, für die Untersuchung der Sanierung des Heizsystems für die Gebäude der BAP 1958-78

Gebäudealter		1958-78	1958-78	1958-78	1958-78
Sanierungsstufe		E	B	S	P
Aufbau und U-Werte der Bauteile					
U-Wert Fenster	W/(m ² K)	5,16	1,76	1,26	0,71
g- Wert Fenster	-	0,682	0,597	0,709	0,567
U-Wert oberste Geschossdecke	W/(m ² K)	0,584	0,251	0,584	0,584
U-Wert Dach	W/(m ² K)	1,487	1,487	0,189	0,127
U-Wert Außenwand	W/(m ² K)	1,14	0,299	0,216	0,129
U-Wert Boden gegen unbeheizt	W/(m ² K)	1,355	0,389	0,278	0,199
U-Wert Bodenplatte	W/(m ² K)	2.775	2.775	2.775	2.775
Wärmebrückenzuschlag	W/(m ² K)	0,10	0,10	0,10	0,05

Tabelle 51: Gebäudedaten II, Aufbau und U-Werte der Bauteile, für die Untersuchung der Sanierung des Heizsystems für die Gebäude der BAP 1979-94

Gebäudealter		1979-94	1979-94	1979-94	1979-94
Sanierungsstufe		E	B	S	P
Aufbau und U-Werte der Bauteile					
U-Wert Fenster	W/(m ² K)	3,2	1,76	1,26	0,71
g- Wert Fenster	-	0,7	0,597	0,709	0,567
U-Wert oberste Geschossdecke	W/(m ² K)	0,47	0,47	0,27	0,11
U-Wert Dach	W/(m ² K)	1,49	1,49	1,420	1,420
U-Wert Außenwand	W/(m ² K)	0,71	0,71	0,21	0,129
U-Wert Boden gegen unbeheizt	W/(m ² K)	0,672	0,627	0,230	0,199
U-Wert Bodenplatte	W/(m ² K)	2.775	2.775	2.775	2.775
Wärmebrückenzuschlag	W/(m ² K)	0,10	0,10	0,10	0,05

7.2.2 Gebäudedaten, Sanierungsgrade und Sanierungspakete im Detail

Im Folgenden können die Eingangsparameter für die Untersuchungen zur Gebäudehülle und zu den Sanierungspaketen zusammen aufgeführt werden. Die Werte unterscheiden sich von den Werten zur Systemanalyse in Abschnitt 7.2.1 in der Anzahl der Vollgeschosse im mittleren Mehrfamilienhaus und der Fläche der obersten Geschossdecke und Kellerdecke im großen Mehrfamilienhaus.

Tabelle 52: Gebäudedaten I, Gebäudebeschreibung und Gebäudeflächen/-volumina, für die Untersuchung der Sanierung der Gebäudehülle und Sanierungspakete

Gebäudegröße		KMH	KMH	MMH	MMH	GMH	GMH
Gebäudealter		1958-78	1978-94	1958-78	1978-94	1958-78	1978-94
Sanierungsstufe		0, original	0, original	0, original	0, original	0, original	0, original
Gebäudebeschreibung							
Anzahl der Vollgeschosse	-	2	3	3	3	5	5
Anzahl der Wohneinheiten	-	4	4	9	9	32	32
Anzahl der Treppenhäuser	-	1	1	1	1	2	2
Wohnfläche pro Person	m ² / Pers.	49,34	49,34	45,38	45,38	45,54	45,54
Anzahl Bewohner pro Wohneinheit	-	1,63	1,74	1,42	1,56	1,26	1,45
Anzahl Bewohner pro Gebäude	-	7	7	13	14	40	46
Gebäudeflächen /-volumina							
Bruttogrundfläche (Energiebezugsfläche)	m ²	353,41	378,55	639,17	701,83	2013,98	2324,16
Nettogrundfläche / Nutzungsfläche konditioniert (Wohnfläche)	m ²	321,28	344,13	581,07	638,03	1830,89	2112,87
konditioniertes Bruttogebäudevolumen	m ³	1140,92	1176,05	2123,79	2176,64	6286,02	7598,71
Konditionierter Wohnraum (netto)	m ³	803,21	860,33	1452,67	1595,06	4577,24	5282,18
Fläche oberste Geschossdecke (gegen unbeheizt)	m ²	129,17	128,29	232,22	238,07	593,23	447,51
Wandfläche (gegen Außenluft; exklusive Fensterflächen)	m ²	238,67	340,18	416,51	487,25	1443,85	1251,82
Bodenfläche (gegen unbeheizt)	m ²	129,17	128,29	232,22	238,07	585,02	447,51
Gesamtfensterfläche (brutto)	m ²	58,77	71,85	106,18	133,01	340,36	289,44
Fensterfläche horizontal (brutto)	m ²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fensterfläche Nord (brutto)	m ²	13,50	16,50	24,38	30,54	52,10	44,31
Fensterfläche Ost (brutto)	m ²	13,94	17,04	25,18	31,54	99,47	84,59
Fensterfläche Süd (brutto)	m ²	17,44	21,32	31,50	39,46	89,33	75,97
Fensterfläche West (brutto)	m ²	13,90	16,99	25,11	31,46	99,47	84,59
Außentüre	m ²	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

Tabelle 53: Gebäudedaten II, Aufbau und U-Werte der Bauteile, für die Untersuchung der Sanierung der Gebäudehülle und von Sanierungspakete für die Baualtersperiode 1958-1978.

Gebäudegröße		KMH	KMH	KMH	MMH	MMH	MMH	GMH	GMH	GMH
Gebäudealter		1958-78	1958-78	1958-78	1958-78	1958-78	1958-78	1958-78	1958-78	1958-78
Sanierungsstufe		0, original	1, EnEV	2, Passivha	0, original	1, EnEV	2, Passivha	0, original	1, EnEV	2, Passivha
Aufbau und U-Werte der Bauteile										
U-Wert Fenster	W/ m ² K	3,25	1,30	0,70	3,25	1,30	0,70	3,26	1,30	0,70
g- Wert Fenster	-	0,75	0,75	0,47	0,75	0,75	0,47	0,75	0,75	0,47
U-Wert Fensterrahmen	W/ m ² K	2,30	1,80	1,60	2,30	1,80	1,60	2,30	1,80	1,60
U-Wert Außenwand	W/ m ² K	1,12	0,23	0,13	1,13	0,23	0,13	1,15	0,23	0,13
U-Wert oberste Geschossdecke	W/ m ² K	0,60	0,19	0,13	0,60	0,19	0,13	0,60	0,19	0,13
U-Wert Bodenplatte / Boden gegen unbeheizt	W/ m ² K	1,32	0,30	0,20	1,33	0,30	0,20	1,19	0,29	0,20
U-Wert Dach (Steildach)	W/ m ² K	0,55	0,19	0,16	0,55	0,19	0,16	x	x	x
Wärmebrücken- zuschlag	W/ m ² K	0,10	0,10	0,05	0,10	0,10	0,05	0,10	0,10	0,05

Tabelle 54: Gebäudedaten II, Aufbau und U-Werte der Bauteile, für die Untersuchung der Sanierung der Gebäudehülle und von Sanierungspakete für die Baualtersperiode 1979-1994.

Gebäudegröße		KMH	KMH	KMH	MMH	MMH	MMH	GMH	GMH	GMH
Gebäudealter		1978-94	1978-94	1978-94	1978-94	1978-94	1978-94	1978-94	1978-94	1978-94
Sanierungsstufe		0, original	1, EnEV	2, Passivha	0, original	1, EnEV	2, Passivha	0, original	1, EnEV	2, Passivha
Aufbau und U-Werte der Bauteile										
U-Wert Fenster	W/m ² K	3,50	1,30	0,70	3,50	1,30	0,70	3,30	1,30	0,70
g- Wert Fenster	-	0,75	0,75	0,47	0,75	0,75	0,47	0,75	0,75	0,47
U-Wert Fensterrahmen	W/m ² K	2,30	1,80	1,60	2,30	1,80	1,60	2,30	1,80	1,60
U-Wert Außenwand	W/m ² K	0,65	0,20	0,13	0,67	0,20	0,13	0,67	0,20	0,13
U-Wert oberste Geschossdecke	W/m ² K	0,43	0,16	0,13	0,44	0,16	0,13	0,42	0,16	0,13
U-Wert Bodenplatte / Boden gegen unbeheizt	W/m ² K	0,67	0,25	0,20	0,67	0,25	0,20	0,65	0,24	0,20
U-Wert Dach (Steildach)	W/m ² K	0,55	0,19	0,16	0,55	0,19	0,16	x	x	x
Wärmebrückenzuschlag	W/m ² K	0,10	0,10	0,05	0,10	0,10	0,05	0,10	0,10	0,05

7.2.3 Technische Auslegung der Systeme, Sanierung der Gebäudehülle

Nachfolgende Tabellen zeigen die technische Auslegung zu Kapitel 3.1.

Tabelle 55: Ergebnisse der Gebäudesimulation für die Sanierung der Gebäudehülle, unsaniert.

	Baualterperiode	1958-78	1978-94	1958-78	1978-94	1958-78	1978-94
	Gebäude	KMH	KMH	MMH	MMH	GMH	GMH
	Sanierungsstufe	unsaniert	unsaniert	unsaniert	unsaniert	unsaniert	unsaniert
spez. jährlicher Heizenergiebedarf	kWh/(m ² a)	163,0	151,8	169,1	128,9	177,2	102,3
spez. Normheizlast Potsdam	KW/m ²	27	35	2	40	27	19

Tabelle 56: Ergebnisse der Gebäudesimulation für die Sanierung der Gebäudehülle, Baualterperiode 1958-1978, Sanierungsstufe S1.

Baualterperiode	1958-78	1958-78	1958-78	1958-78	1958-78	1958-78
Gebäude	KMH	KMH	MMH	MMH	GMH	GMH
Sanierungsstufe	S1	S1	S1	S1	S1	S1
	spez. jährlicher Heizenergiebedarf [kWh/(m ² a)]	spez. Normheizlast Potsdam [KW/m ²]	spez. jährlicher Heizenergiebedarf [kWh/(m ² a)]	spez. Normheizlast Potsdam [KW/m ²]	spez. jährlicher Heizenergiebedarf [kWh/(m ² a)]	spez. Normheizlast Potsdam [KW/m ²]
D-Dach	160,9	20	167,1	10	167,8	25
K-Keller	151,1	37	157,9	5	169,3	38
WF-WandFens	73,7	12	75,3	20	78,2	17
WFD-WandFensDach	70,5	26	72,2	37	69,0	39
voll	61,5	28	63,5	0	62,7	35

Tabelle 57: Ergebnisse der Gebäudesimulation für die Sanierung der Gebäudehülle, Baualtersperiode 1958-1978, Sanierungsstufe S2.

Baualtersperiode	1958-78	1958-78	1958-78	1958-78	1958-78	1958-78
Gebäude	KMH	KMH	MMH	MMH	GMH	GMH
Sanierungsstufe	S2	S2	S2	S2	S2	S2
	spez. jährlicher Heizendenergieiebedarf	spez. Normheizlast Potsdam	spez. jährlicher Heizendenergieiebedarf	spez. Normheizlast Potsdam	spez. jährlicher Heizendenergieiebedarf	spez. Normheizlast Potsdam
D-Dach	160,6	2	166,9	23	166,4	5
K-Keller	149,2	24	156,1	5	168,0	21
WF-WandFens	60,7	35	62,1	11	64,4	20
WFD-WandFensDach	56,7	14	58,1	8	53,9	14
voll	46,9	5	48,4	23	47,0	13

Tabelle 58: Ergebnisse der Gebäudesimulation für die Sanierung der Gebäudehülle, Baualtersperiode 1979-1994, Sanierungsstufe S1.

Baualtersperiode	1979-94	1978-94	1978-94	1978-94	1978-94	1978-94
Gebäude	KMH	KMH	MMH	MMH	GMH	GMH
Sanierungsstufe	S1	S1	S1	S1	S1	S1
	spez. jährlicher Heizendenergieiebedarf	spez. Normheizlast Potsdam	spez. jährlicher Heizendenergieiebedarf	spez. Normheizlast Potsdam	spez. jährlicher Heizendenergieiebedarf	spez. Normheizlast Potsdam
D-Dach	140,6	1	127,6	4	98,4	27
K-Keller	137,1	24	124,5	22	99,8	24
WF-WandFens	68,8	10	64,0	30	52,6	19
WFD-WandFensDach	66,9	7	62,0	15	48,8	34
voll	63,3	30	58,4	2	46,8	31

Tabelle 59: Ergebnisse der Gebäudesimulation für die Sanierung der Gebäudehülle, Baualtersperiode 1978-1994, Sanierungsstufe S2.

Baualtersperiode	1978-94	1978-94	1978-94	1978-94	1978-94	1978-94
Gebäude	KMH	KMH	MMH	MMH	GMH	GMH
Sanierungsstufe	S2	S2	S2	S2	S2	S2
	spez. jährlicher Heizendenergieiebedarf	spez. Normheizlast Potsdam	spez. jährlicher Heizendenergieiebedarf	spez. Normheizlast Potsdam	spez. jährlicher Heizendenergieiebedarf	spez. Normheizlast Potsdam
D-Dach	140,4	24	127,3	30	97,9	28
K-Keller	136,3	31	123,7	35	99,5	37
WF-WandFens	56,0	2	52,3	26	43,2	7
WFD-WandFensDach	53,4	3	49,6	17	39,0	22
voll	49,5	20	45,7	24	36,9	18

7.2.4 Technische Auslegung der Systeme, Sanierung des Heizsystems

Nachfolgende Tabellen zeigen die technische Auslegung zu Kapitel 3.

Tabelle 60: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierung des Heizsystems, BW

Systemvarianten		BW				
Gebäudetyp		MMH	MMH	MMH	KMH	GMH
Systemauslegung						
Gasbrennwertkessel	kW	54	26	19	13	79
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	200	1400
Endenergiebezug						
Elektrische Energie	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gas	MWh/a	121,4	45,7	36,0	20,6	167,5
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	100	35	26	15	134
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	3,8	21,1

Tabelle 61: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierung des Heizsystems, A100m

Systemvarianten		AUL/W WP monoenergetisch (Bivalenzpunkt -5°C)				
Gebäudetyp		MMH0	MMH1	MMH2	KMH1	GMH1
Systemauslegung						
Außenluftwärmepumpe	kW	51	23	17	12	70
elektrischer Durchlauferhitzer	kW	22	12	9	6	38
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	200	1400
Heizungspufferspeicher	l	1030	460	340	240	1400
Endenergiebezug						
Strom Wärmepumpe	MWh/a	43,2	13,7	11,0	6,6	47,1
Strom Durchlauferhitzer	MWh/a	4,4	4,1	4,2	3,3	8,7
Elektrische Energie	MWh/a	47,6	17,8	15,2	9,9	55,7
Gas	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	100	35	26	15	134
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	3,8	21,1

Tabelle 62: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierung des Heizsystems, A100b

Systemvarianten		AUL/W WP bivalent (Bivalenzpunkt -5°C)				
Gebäudetyp		MMH0	MMH1	MMH2	KMH1	GMH1
Systemauslegung						
Außenluftwärmepumpe	kW	51	23	17	12	70
Gasbrennwertkessel	kW	22	12	9	6	38
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	200	1400
Heizungspufferspeicher	l	1030	460	340	240	1400
Endenergiebezug						
Strom Wärmepumpe	MWh/a	43,2	13,7	11,0	6,6	47,1
Strom Durchlauferhitzer	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elektrische Energie	MWh/a	43,2	13,7	11,0	6,6	47,1
Gas	MWh/a	5,0	4,6	4,7	3,7	9,6
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	100	35	26	15	134
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	3,8	21,1

Tabelle 63: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierung des Heizsystems, A60b

Systemvarianten		AUL/W WP bivalent (Bivalenzpunkt 2°C)				
Gebäudetyp		MMH0	MMH1	MMH2	KMH1	GMH1
Systemauslegung						
Außenluftwärmepumpe	kW	28	12	9	6	36
Gasbrennwertkessel	kW	36	19	13	10	58
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	200	1400
Heizungspufferspeicher	l	560	240	180	120	730
Endenergiebezug						
Strom Wärmepumpe	MWh/a	37,2	11,9	9,4	5,7	39,2
Strom Durchlauferhitzer	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elektrische Energie	MWh/a	37,2	11,9	9,4	5,7	39,2
Gas	MWh/a	18,0	9,1	8,7	6,0	31,5
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	100	35	26	15	134
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	3,8	21,1

Tabelle 64: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierung des Heizsystems, E100m

Systemvarianten		Sole/W WP monoenergetisch (Bivalenzpunkt -5°C)				
Gebäudetyp		MMF0	MMF1	MMH2	KMH1	GMH1
Systemauslegung						
Erdsonde	m	693	334	246	168	1048
Solewärmepumpe	kW	37	16	12	8	51
elektrischer Durchlauferhitzer	kW	18	9	6	5	27
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	200	1400
Heizungspufferspeicher	l	740	330	250	170	1030
Endenergiebezug						
Strom Wärmepumpe	MWh/a	32,8	10,5	8,5	5,1	35,5
Strom Durchlauferhitzer	MWh/a	4,3	4,0	4,2	3,3	8,1
Elektrische Energie	MWh/a	37,1	14,5	12,7	8,4	43,7
Gas	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	100	35	26	15	134
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	3,8	21,1

Tabelle 65: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierung des Heizsystems, E100b

Systemvarianten		Sole/W WP bivalent (Bivalenzpunkt -5°C)				
Gebäudetyp		MMH0	MMH1	MMH2	KMH1	GMH1
Systemauslegung						
Erdsonde	m	693	334	246	168	1048
Solewärmepumpe	kW	37	16	12	8	51
Gasbrennwertkessel	kW	18	9	6	5	27
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	200	1400
Heizungspufferspeicher	l	740	330	250	170	1030
Endenergiebezug						
Strom Wärmepumpe	MWh/a	32,8	10,5	8,5	5,1	35,5
Strom Durchlauferhitzer	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elektrische Energie	MWh/a	32,8	10,5	8,5	5,1	35,5
Gas	MWh/a	4,8	4,5	4,7	3,7	9,1
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	100	35	26	15	134
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	3,8	21,1

Tabelle 66: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierung des Heizsystems, E60b

Systemvarianten		Sole/W WP bivalent (Bivalenzpunkt 2°C)				
Gebäudetyp		MMH0	MMH1	MMH2	KMH1	GMH1
Systemauslegung						
Erdsonde	m	447	210	160	105	664
Solewärmepumpe	kW	24	10	8	5	32
Gasbrennwertkessel	kW	31	15	11	8	46
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	200	1400
Heizungspufferspeicher	l	480	210	160	110	650
Endenergiebezug						
Strom Wärmepumpe	MWh/a	29,5	9,6	7,6	4,6	31,2
Strom Durchlauferhitzer	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elektrische Energie	MWh/a	29,5	9,6	7,6	4,6	31,2
Gas	MWh/a	14,8	7,5	7,6	5,4	25,8
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	100	35	26	15	134
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	3,8	21,1

7.2.5 Technische Auslegung der Systeme, Sanierungspakete

Nachfolgende Tabellen zeigen die technische Auslegung zu Kapitel 4.

Tabelle 67: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierungspakete für MMH 1958-78, BW

Systemvarianten		BW			
Gebäudetyp		unsaniert	WF	WFD	voll
Systemauslegung					
Gasbrennwertkessel	kW	55	31	28	26
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	400
Endenergiebezug					
Elektrische Energie	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0
Gas	MWh/a	141,8	70,7	64,0	54,6
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	114	53	47	38
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	7,0

Tabelle 68: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierungspakete für MMH 1958-78, A100m

Systemvarianten		Am-5			
Gebäudetyp		unsaniert	WF	WFD	voll
Systemauslegung					
Außenluftwärmepumpe	kW	52	27	24	23
elektrischer Durchlauferhitzer	kW	22	15	13	12
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	400
Heizungspufferspeicher	l	1050	540	490	460
Endenergiebezug					
Strom Wärmepumpe	MWh/a	47,6	19,3	17,0	14,6
Strom Durchlauferhitzer	MWh/a	4,7	4,5	4,5	4,3
Elektrische Energie	MWh/a	52,3	23,8	21,4	18,9
Gas	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	114	53	47	38
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	7,0

Tabelle 69: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierungspakete für MMH 1958-78, A100b

Systemvarianten		Ab-5			
Gebäudetyp		unsaniert	WF	WFD	voll
Systemauslegung					
Außenluftwärmepumpe	kW	52	27	24	22
Gasbrennwertkessel	kW	22	15	13	12
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	400
Heizungspufferspeicher	l	1040	540	490	450
Endenergiebezug					
Strom Wärmepumpe	MWh/a	47,6	19,3	17,0	14,6
Strom Durchlauferhitzer	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0
Elektrische Energie	MWh/a	47,6	19,3	17,0	14,6
Gas	MWh/a	5,3	5,0	5,0	4,8
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	114	53	47	38
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	7,0

Tabelle 70: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierungspakete für MMH 1958-78, A60b

Systemvarianten		Ab+2			
Gebäudetyp		unsaniert	WF	WFD	voll
Systemauslegung					
Außenluftwärmepumpe	kW	28	14	12	12
Gasbrennwertkessel	kW	37	23	20	19
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	400
Heizungspufferspeicher	l	570	280	250	240
Endenergiebezug					
Strom Wärmepumpe	MWh/a	40,3	15,8	13,9	12,2
Strom Durchlauferhitzer	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0
Elektrische Energie	MWh/a	40,3	15,8	13,9	12,2
Gas	MWh/a	21,2	14,5	13,4	11,0
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	114	53	47	38
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	7,0

Tabelle 71: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierungspakete für MMH 1958-78, E100m

Systemvarianten		Em-5			
Gebäudetyp		unsaniert	WF	WFD	voll
Systemauslegung					
Erdsonde	m	696	393	356	330
Solewärmepumpe	kW	38	20	18	16
elektrischer Durchlauferhitzer	kW	18	11	9	9
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	400
Heizungspufferspeicher	l	760	400	360	330
Endenergiebezug					
Strom Wärmepumpe	MWh/a	36,3	14,6	12,9	11,1
Strom Durchlauferhitzer	MWh/a	4,5	4,3	4,3	4,2
Elektrische Energie	MWh/a	40,9	19,0	17,3	15,3
Gas	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	114	53	47	38
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	7,0

Tabelle 72: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierungspakete für MMH 1958-78, E100b

Systemvarianten		Eb-5			
Gebäudetyp		unsaniert	WF	WFD	voll
Systemauslegung					
Erdsonde	m	696	393	356	330
Solewärmepumpe	kW	38	20	18	16
Gasbrennwertkessel	kW	18	11	9	9
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	400
Heizungspufferspeicher	l	760	400	360	330
Endenergiebezug					
Strom Wärmepumpe	MWh/a	36,3	14,6	12,9	11,1
Strom Durchlauferhitzer	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0
Elektrische Energie	MWh/a	36,3	14,6	12,9	11,1
Gas	MWh/a	5,1	4,8	4,8	4,7
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	114	53	47	38
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	7,0

Tabelle 73: Ergebnisse technische Auslegung für Sanierungspakete für MMH 1958-78, E60b

Systemvarianten	Gebäudetyp	Eb-5			
		unsaniert	WF	WFD	voll
Systemauslegung					
Erdsonde	m	450	243	223	209
Solewärmepumpe	kW	24	12	11	10
Gasbrennwertkessel	kW	31	18	16	15
Warmwasserspeicher	l	400	400	400	400
Heizungspufferspeicher	l	490	250	220	210
Endenergiebezug					
Strom Wärmepumpe	MWh/a	32,1	12,7	11,2	9,9
Strom Durchlauferhitzer	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0
Elektrische Energie	MWh/a	32,1	12,7	11,2	9,9
Gas	MWh/a	17,9	12,3	11,4	9,1
Nutzwärme Raumheizung	MWh/a	114	53	47	38
Nutzwärme Trinkwasser	MWh/a	7,0	7,0	7,0	7,0

7.3 Ergebnisse MMH_70haupt_S im Detail

Tabelle 74: Detaillierte Ergebnisse für das MMH im Szenario 70haupt **ohne Investitionszuschuss**

	Ohne Investitionszuschuss					Wartung
	Ref	A100m	A60b	E100m	E60b	% p. a.
Förderung [%]	-	-	-	-	-	
Anfangs-Investition [€]	11.062	34.254	34.620	65.234	49.606	
Kessel	8.748 (39 kW)	-	7.065 (27 kW)	-	6.403 (23 kW)	3
Wärmepumpe	-	29.410 (35 kW)	23.216 (21 kW)	14.743 (27 kW)	11.834 (16 kW))	2,5
Sonde	-	-	-	45.789 (579 m)	27.134 (343 m)	2,5
TWW-Speicher	2.314 (1 x 830 l)	2.314 (1 x 830 l)	2.314 (1 x 830 l)	2.314 (1 x 830 l)	2.314 (1 x 830 l)	0
Heizungs- speicher	-	2.238 (1 x 700 l)	2.025 (2 x 420 l)	2.127 (1 x 540 l)	1.920 (1 x 320 l)	0
Heizstab	-	292 (19 kW)	-	261 (12 kW)	-	1
Annuität [€/a]	-12.780	-12.529	-11.709	-13.987	-12.042	
Anteil Invest [%]	9	30	32	37	35	
Wärmegestehungskosten [ct/kWh]	18,4	18,0	16,8	20,1	17,3	
Emissionen kumuliert [kg/m²]	441	168 (-61 %)	193 (-56 %)	148 (-66 %)	185 (-58 %)	

Tabelle 75: Detaillierte Ergebnisse für das MMH im Szenario 70haupt **mit Investitionszuschuss**

	Mit Investitionszuschuss					Wartung
	Ref	A100m	A60b	E100m	E60b	% p. a.
Förderung [%]	-	40	25	40	25	
Anfangs-Investition [€]	11.062	20.552	25.965	39.141	37.205	
Kessel	8.748 (39 kW)	-	5.299 (27 kW)	-	4.803 (23 kW)	3
Wärmepumpe	-	17.646 (35 kW)	17.412 (21 kW)	8.846 (27 kW)	8.876 (16 kW))	2,5
Sonde	-	-	-	27.474 (579 m)	20.351 (343 m)	2,5
TWW-Speicher	2.314 (1 x 830 l)	1.388 (1 x 830 l)	1.736 (1 x 830 l)	1.388 (1 x 830 l)	1.736 (1 x 830 l)	0
Heizungs- speicher	-	1.343 (1 x 700 l)	1.519 (2 x 420 l)	1.276 (1 x 540 l)	1.440 (1 x 320 l)	0
Heizstab	-	157 (19 kW)	-	156 (12 kW)	-	1
Annuität [€/a]	-12.780	-11.040	-10.765	-11.919	-12.042	
Anteil Invest [%]	9	20	26	20	35	
Wärmegestehungskosten [ct/kWh]	18,4	15,9	15,5	17,1	17,3	
Emissionen kumuliert [kg/m²]	441	168 (-61 %)	193 (-56 %)	148 (-66 %)	185 (-58 %)	

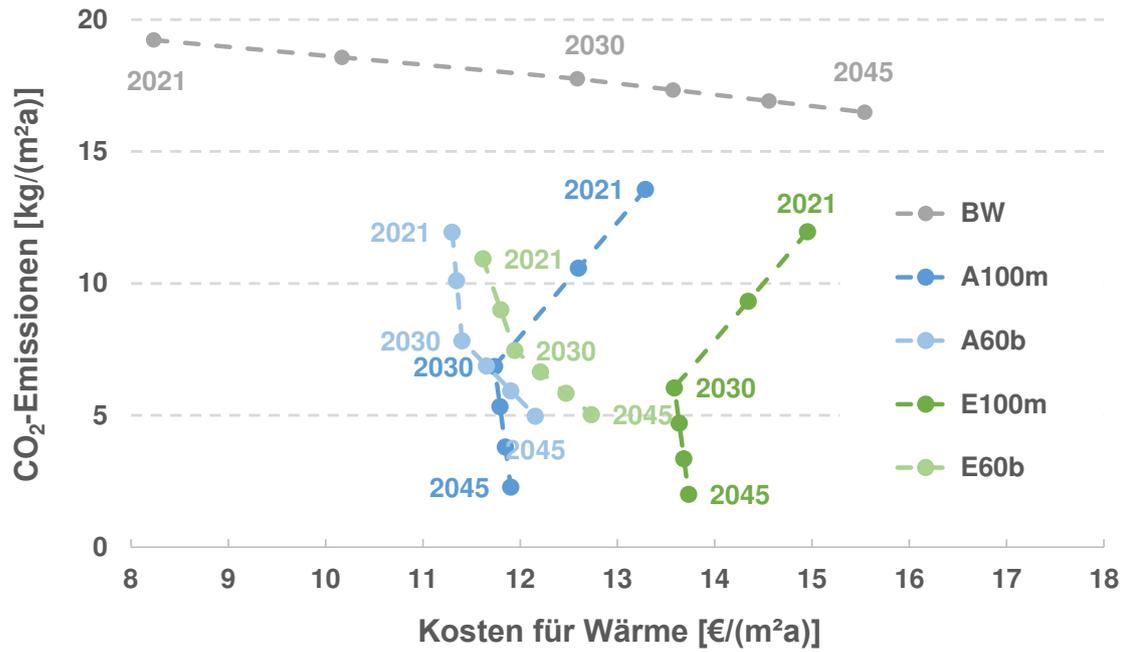


Abbildung 59: Zeitlicher Verlauf von spezifischen CO₂-Emissionen und spezifischen Kosten für Wärme des GEG-sanierten MMH der BAP 1958-78 für den Brennwertkessel und monoenergetische und 60 % bivalente Wärmepumpensysteme. **Die Ergebnisse sind ohne Berücksichtigung von Fördersätzen.**

8 Literaturverzeichnis

- Auerswald, Sven (2021): Dezentrale Fassaden-Integrierte Wohnungs­lüftungs­geräte. Kombinierte Bewertung des erzielten Luftaustausches und der Energieeffizienz. Dissertation zur Abgabe (BMW FKZ.: 03ET1540B). Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg im Breisgau.
- BAFA (2021a): Anlagen zur Wärmeerzeugung (Heizungstechnik). Bundesförderung für effiziente Gebäude. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente_Gebaeude/Sanierung_Wohngebaeude/Anlagen_zur_Waermeerzeugung/anlagen_zur_waermeerzeugung_node.html, zuletzt aktualisiert am 28.07.2021, zuletzt geprüft am 28.07.2021.
- BAFA (2021b): Einzelmaßnahmen an der Gebäudehülle. Bundesförderung für effiziente Gebäude. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente_Gebaeude/Sanierung_Wohngebaeude/Gebaeudehuelle/gebaeudehuelle_node.html, zuletzt aktualisiert am 28.07.2021, zuletzt geprüft am 28.07.2021.
- BBSR (2014): Kosten energierelevanter Bau- und technischer Anlagenteile bei der energetischen Sanierung von Nichtwohngebäuden/Bundesliegenschaften. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2014/DL_ON062014.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 16.05.2021.
- BKI (2017): Booklet zu "BKI Position 5". Hg. v. BKI- Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH. Online verfügbar unter www.bki.de/positionen-software.
- BKI (2021a): BKI Kostenplaner 2021. Statistik Plus, zuletzt geprüft am 15.06.2021.
- BKI (2021b): BPI. Aktueller Baupreisindex & Daten aus vorherigen Jahren. Hg. v. BKI- Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH. Online verfügbar unter <https://bki.de/baupreisindex.html>, zuletzt aktualisiert am 17.05.2021, zuletzt geprüft am 17.05.2021.
- BMI (2017): Nutzungsdauern von Bauteilen. Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Hg. v. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. Online verfügbar unter <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen/>, zuletzt geprüft am 02.12.2020.
- Bundesministerium für Justiz (31.01.2019): Mieterhöhung nach Modernisierungsmaßnahmen. BGB 559, vom 400-2. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/bgb/_559.html.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (16.11.2011): Gesetz über die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. EVPG, zuletzt geprüft am 21.08.2019.
- Bundesnetzagentur (2020): Monitoringbericht 2019. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Monitoringbericht_Energie2019.pdf?__blob=publicationFile&v=5.
- Bundesnetzagentur (2021): Monitoringbericht 2020. Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB, Stand: 01. März 2021. Hg. v. Bundesnetzagentur. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Monitoringbericht_Energie2020.pdf?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt geprüft am 02.04.2021.
- Capros, P.; De Vita, A.; Tasios, P.; Siskos, P.; Kannavou M.; Petropoulos, A. et al. (2016): EU Reference Scenario 2016. Energy, transport and GHG emissions, Trends to 2050. Hg. v. European Commission. Luxembourg.
- Ebert, B. (2019): Zwischenbericht zu AP 1.1. Systematische Analyse des Gebäudebestandes.

Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau, Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.

- Enseling, Andreas; Diefenbach, Nikolaus; Hinz, Eberhard; Loga, Tobias (2011): Evaluierung und Fortentwicklung der EnEV 2009: Untersuchung zu ökonomischen Rahmenbedingungen im Wohnungsbau. Endbericht. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt, zuletzt geprüft am 28.11.2018.
- EuPD Research (2013): Photovoltaik Preismonitor Deutschland. Online verfügbar unter https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/130218_EuPD_Preismonitor_q1_13.pdf, zuletzt geprüft am 15.06.2021.
- Europäische Union (31.10.2009): Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter ProdukteText von Bedeutung für den EWR. Ökodesignrichtlinie, ErP-Richtlinie, zuletzt geprüft am 21.08.2019.
- FfE (2021): Kostenanalyse Wärmespeicher bis 10.000 l Speichergröße - Stand Dezember 2016 - Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. Online verfügbar unter <https://www.ffe.de/publikationen/veroeffentlichungen/659-kostenanalyse-waermespeicher-bis-10-000-l-speichergroesse>, zuletzt aktualisiert am 14.06.2021, zuletzt geprüft am 14.06.2021.
- Fritsche et. al. (2019): Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2018 sowie Ausblicke auf 2020 bis 2050. Kurzstudie. Hg. v. IINAS - Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien. Darmstadt. Online verfügbar unter http://iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2019_KEV_THG_Strom-2018_2020-2050.pdf.
- Hess et al. (2021): Techno-ökonomische und ökologische Perspektiven für Wärmepumpen im Mehrfamilienhaus-Bestand. In: *47. DKV-Tagungsbericht, Deutschen Kälte- und Klimatagung 2021, Dresden*. Online verfügbar unter https://www.lowex-bestand.de/wp-content/uploads/2021/12/2021-12-22_DKV_LiB_Techno-%C3%B6konom_Hess.pdf.
- Hinz, Eberhard (2015): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten. Endbericht. 1. Auflage. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt, zuletzt geprüft am 23.11.2018.
- IINAS (2019): GEMIS (Globales Emissions-Modell integrierter Systeme). Version 5.0. Hg. v. IINAS - Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien. Online verfügbar unter <http://iinas.org/gemis-de.html>.
- Klein, Sebastian et al. (2017): Erneuerbare Gase - ein Systemupdate der Energiewende. Studie i. A. v. Initiative Erdgasspeicher & Bundesverband Windenergie. Hg. v. Enervis energy advisors GmbH. Online verfügbar unter https://vng.de/sites/default/files/ines_enervis_erneuerbare_gase_-_systemupdate_der_energiewende_.pdf.
- Koch, Thilo; Achenbach, Samuel; Müller, A. (2021): Werkstattbericht. Anpassung der Kostenfunktionen energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten auf das Preisniveau 2020. IWU - Institut Wohnen und Umwelt. Online verfügbar unter https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/werkstattbericht/2021_IWU_KochEtAl_Werkstattbericht-Anpassung-Kostenfunktionen-2020.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2021.
- Köhler, Benjamin; Carbonare, Nicolas; Kleinstück, Martin; Wapler, Jeannette; Vollmer, Raphael (2017): LowEx Bestand Meilensteinbericht AP 1.3. Technische Anforderung an die Energieversorgung von MFH. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und Universität Freiburg. Freiburg.
- Leander Kotzur (2018): Future Grid Load of the Residential Building Sector. RWTH Aachen. Online verfügbar unter <http://publications.rwth-aachen.de/record/752116/files/752116.pdf>, zuletzt geprüft am 11.05.2021.
- Lützkendorf (2017): Wirtschaftlichkeit energieoptimierter Gebäude. Berechnungsmethoden und

- Benchmarks für Wohnungsbau und Immobilienwirtschaft. Hg. v. Bine Informationsdienst, zuletzt geprüft am 12.06.2018.
- Mailach, Bettina; Oschatz, Bert (2021): BDEW-Heizkostenvergleich Altbau 2021. Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung in Altbauten. ITG - Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/BDEW-HKV_Altbau.pdf, zuletzt geprüft am 19.05.2021.
- Naber, Elias; Lützkendorf, T. (2017): Daten zur energetischen Modernisierung. Ergebnisse der Eigentümerbefragung in der Karlsruher Oststadt. Projektbericht zum Reallabor 131, 25.04.2017. Online verfügbar unter https://www.iip.kit.edu/1064_2827.php.pdf, zuletzt geprüft am 07.08.2018.
- Öko; ISI (Hg.) (2015): Klimaschutzszenario 2050. Zusammenfassung des 2. Endberichts. Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI. Berlin.
- Rehkuigel, Heinz; Jandl, Jan-Otto; Wölfle, Marco (2016): Energetische Sanierung von Mehrfamilienhäusern. Handlungsoptionen der Vermieter zwischen Klimaschutz, Mietrecht und Wohnungsmarkt. In: *Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis* 2016, 2016 (6), S. 567–589.
- Schlobach, Martin (2015): ErP Energielabel für Heizungsanlagen. Haustechnik Verstehen. Online verfügbar unter https://www.haustechnikverstehen.de/erp-energielabel-fuer-heizungsanlagen/#Anforderungen_an_die_jahreszeitbedingte_Raumheizungs-Energieeffizienz, zuletzt aktualisiert am 21.08.2019, zuletzt geprüft am 21.08.2019.
- Schnaidt, Silke (2020): Akteure und Prozesse in der Gebäudesanierung & nichttechnische Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren des Sanierungsprozesses. Abschlussbericht zu AP 1.2 & 1.4. Unter Mitarbeit von A. Wagner. Hg. v. KIT Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft.
- Schuster, Thomas; Rüdts von Collenberg, Leona (2017): Investitionsrechnung: Kapitalwert, Zinsfuß, Annuität, Amortisation. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- SHK (2021): Stundenverrechnungssätze – Innung Sanitär, Heizung und Klima Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <https://shk-frankfurt.de/stundenverrechnungssaetze/>, zuletzt aktualisiert am 16.06.2021, zuletzt geprüft am 16.06.2021.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2020): Verbraucherpreisindex Deutschland. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=previous&levelindex=1&step=1&titel=Ergebnis&levelid=1605275486235&acceptscookies=false#abreadcrumb>, zuletzt geprüft am 13.11.2020.
- Stuible, Achim; Zech, Daniel; Wülbeck, Hans-Friedrich (2016): Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt(Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2012 bis 2014. Evaluierung des Förderjahres 2014. Online verfügbar unter https://elib.dlr.de/107618/1/FICHT-%231747735-v1-Revidierter_finaler_Bericht_mit_Appendices.pdf, zuletzt geprüft am 18.05.2021.
- VDI 4640, 2019: Thermische Nutzung des Untergrunds.
- Vollmer et al. (2021): LowEx-Bestand Referenzgebäude: Geometrie, Bauphysik, Last-Zeitreihen und Sanierungsszenarien. Projekt LowEx-Bestand Analyse - Bericht zu AP 3.1. Unter Mitarbeit von Vollmer R, Köhler B, Ebert B, Wapler J, Koch L, Bongs C, Hess S, Scharf K. INATECH; KIT; Fraunhofer ISE. Online verfügbar unter https://www.lowex-bestand.de/wp-content/uploads/2022/01/2022-01-27_LiB_Bericht_AP_3.1_Referenzgeb%C3%A4ude_Parameter_FINAL_sh.pdf.
- Wagner, Johannes; Hennes, Oliver; Zinke, Jonas; Jeddi, Samir; Madlener, R.; Schmitz, Hendrik; Wolff, Stefanie (2019a): Auswirkungen von CO₂-Preisen auf den Gebäude-, Verkehrs- und Energiesektor. Kurzstudie im Auftrag der E.ON SE. Hg. v. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH und Lehrstuhl für Wirtschaftswissenschaften, insb. Energieökonomik.

Online verfügbar unter
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjvtqSNwcbRAhXK_qQKHIVB4MQFjAAegQIBBAB&url=https%3A%2F%2Fwww.eon.com%2Fcontent%2Fdam%2Feon%2Feon-com%2FDocuments%2Fde%2Fneue-energy%2F191011_Executive%2520Summary_Auswirkungen%2520von%2520CO2%2520Preise%2520auf%2520den%2520Geb%25C3%25A4ude-%2C%2520Verkehrs-%2C%2520und%2520Energiesektor_v3.pdf&usg=AOvVaw3CpLnHXA0dvnllMtxot-Gd, zuletzt geprüft am 01.09.2020.

Wagner et al. (2019b): Auswirkungen von CO₂-Preisen auf den Gebäude-, Verkehrs- und Energiesektor. Kurzstudie im Auftrag der E.ON SE. Hg. v. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH (EWI). RWTH Aachen; EWI; Eon. Online verfügbar unter https://www.eon.com/content/dam/eon/eon-com/Documents/de/neue-energy/191011_Executive%20Summary_Auswirkungen%20von%20CO2%20Preise%20auf%20den%20Geb%C3%A4ude-,%20Verkehrs-,%20und%20Energiesektor_v3.pdf.

Wagner et al. (2019c): Auswirkungen von CO₂-Preisen auf den Gebäude-, Verkehrs- und Energiesektor. Kurzstudie im Auftrag der E.ON SE. RWTH Aachen University; EWI. Köln. Online verfügbar unter https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2019/11/Auswirkungen-von-CO2-Preisen_Executive-Summary.pdf, zuletzt geprüft am 11.03.2021.

Wapler, J. (2018): LowEx-Bestand: Analyse -Zwischenbericht AP 2.4. Technische Analyse von Systemkonzepten. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg.

VDI 2067, 09/2012: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen.

Wolf, S.; Fahl, U.; Blesl, M.; A. Voß (2014): Analyse des Potenzials von Industrierärmepumpen in Deutschland. Forschungsbericht. Hg. v. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER).