

Gebäudesanierung und hybride Wärmepumpensysteme – Bündel von Modernisierungsmaßnahmen für öffentliche Nichtwohngebäude

Tim Schaffitzel^{1*}, Markus Blesl¹, Christine Widmann²

¹ Universität Stuttgart - Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Heßbrühlstraße 49A, 70565 Stuttgart, Tel: +49 711 685-87863, tim.schaffitzel@ier.uni-stuttgart.de, www.ier.uni-stuttgart.de

² Hochschule Reutlingen - Reutlinger Energiezentrum (REZ), Alteburgstraße 150, 72762 Reutlingen, www.reutlingen-university.de

Kurzfassung: Zur Erreichung von Klimaneutralität im Gebäudesektor ist ein Zusammenspiel aus Verbesserung der Gebäudeenergieeffizienz und Dekarbonisierung der Wärmebereitstellung von hoher Bedeutung. Um ihrer gesetzlich verankerten Vorbildwirkung gerecht zu werden, gilt dies im Besonderen für öffentliche Nichtwohngebäude. Für Gebäude ohne Perspektive auf Fernwärmeanschluss, muss bis zum Zieljahr für Klimaneutralität ein Bündel an Modernisierungsmaßnahmen umgesetzt werden.

In diesem Beitrag wird anhand einer Fallstudie für zwei Szenarien untersucht, welchen Einfluss Umsetzungszeitpunkt und -reihenfolge von Modernisierungsmaßnahmen auf deren wirtschaftliche Bewertung haben. Im Bereich der Wärmebereitstellung besteht die Modernisierungsmaßnahme in der Ergänzung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe zum fossilen Bestandskessel, was als hybrides Wärmepumpensystem bezeichnet wird. Für die Verbesserung der Gebäudeenergieeffizienz wird die Sanierung von Fenstern, Außenwand und Dach betrachtet. Nach ausreichender Sanierung kann der fossile Bestandskessel rückgebaut werden.

Die Betriebskosteneinsparung einer Sanierungsmaßnahme wird durch die jährliche Nutzenergieeinsparung und die Energieträgerpreise der einsparten Endenergie bestimmt. Je höher die Menge an verdrängtem fossilem Brennstoff und je höher dessen Preis, desto besser fällt die wirtschaftliche Bewertung des hybriden Wärmepumpensystems aus. Die verdrängte Menge an fossilem Brennstoff ist dabei vom Deckungsanteil der Luft-Wasser-Wärmepumpe und vom spezifischen Heizwärmebedarf abhängig, die beide von der Umsetzung von Sanierungsmaßnahmen beeinflusst werden. Die Analyse zeigt, dass trotz der Unwirtschaftlichkeit einzelner Modernisierungsmaßnahmen, das Maßnahmenbündel wirtschaftlich sein kann im Sinne einer Amortisation innerhalb der technischen Lebensdauer.

Keywords: Nichtwohngebäude, Gebäudesanierung, hybride Wärmepumpensysteme

1 Motivation

Für den Gebäudesektor bestehen auf verschiedenen institutionellen Ebenen Klimaziele, deren Erreichung mit politischen Vorgaben gewährleistet werden soll. Für deren Einhaltung tragen politische Institutionen auch eine eigene Verantwortung, da die öffentliche Hand selbst Gebäude besitzt. Durch die gesetzliche Verankerung der Vorbildfunktion der öffentlichen Hand

wird die öffentliche Hand dieser Verantwortung auch gerecht. Während § 4 des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) die öffentliche Hand im Allgemeinen adressiert [1], existiert in Baden-Württemberg ein Klimaschutzpakt, bei dem sich Gemeinden und Landkreise auf freiwilliger Basis aktiv zur in § 5 des Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetzes des Landes [2] formulierten Vorbildfunktion bekennen. Öffentliche Gebäude sind in der Regel Nichtwohngebäude (NWG). Die knapp 2 Millionen GEG-relevanten NWG in Deutschland weisen im Verhältnis zu ihrer Anzahl einen höheren Endenergieverbrauch als Wohngebäude auf [3]. Allein kommunale NWG haben einen Anteil von ca. 9 % [4], was die Relevanz der öffentlichen Nichtwohngebäude unterstreicht.

Für die Wärmeversorgung von Gebäuden nehmen in Zukunft Fernwärme und Wärmepumpen eine Schlüsselrolle ein. Für beide Versorgungsoptionen spielt die Gebäudesanierung eine wichtige Rolle, wobei in diesem Beitrag die Wärmepumpe im Fokus steht. Für einzelne Gebäude ohne Perspektive auf Fernwärmeanschluss muss daher häufig ein Bündel an Modernisierungsmaßnahmen¹ ermittelt werden, welches Maßnahmen zur Verbesserung der Gebäudeenergieeffizienz (Sanierungsmaßnahmen) und Maßnahmen zur Dekarbonisierung der Wärmebereitstellung (Wärmeerzeugerwechsel) in Einklang bringt.

2 Problemstellung und Fallstudie

Sowohl der Einsatz einer Wärmepumpe als auch eine Gebäudesanierung ist mit hohen Investitionen verbunden. Auf kommunaler Ebene besteht häufig das Problem, dass diese – wenn überhaupt – in zeitlicher Staffelung finanziell gestemmt werden können. Um dem Zielkonflikt eines schnellen Austauschs des fossilen Wärmeerzeugers bei gleichzeitig möglichst effizientem Betrieb zu begegnen, kann ein hybrides Wärmepumpensystem in Betracht gezogen werden, welches eine Wärmepumpe mit dem fossilen Bestandskessel kombiniert. Mit fortschreitender Gebäudesanierung fungiert der Bestandskessel zunehmend als Spitzenlastkessel und kann schließlich außer Betrieb genommen werden. Die Berücksichtigung der Reihenfolge und des zeitlichen Abstands von Modernisierungsmaßnahmen für Einzelgebäude inklusive einer Lebenszykluskostenbetrachtung wurde in der Literatur bislang nur wenig beleuchtet. Richarz et al. 2021 ermitteln in ihrer Optimierung die optimale Reihenfolge und den optimalen Zeitpunkt der Einzelmaßnahmen mit Hilfe einer Pareto-Front, was als „scheduling“ bezeichnet wird [5]. Wechselwirkungen hybrider Wärmepumpensysteme mit Sanierungsmaßnahmen, die sich in den zeitlich dynamischen Größen Deckungsanteil und Heizkreis-Temperaturniveau ausdrücken, wurden in der Literatur bislang kaum adressiert.

Ziel der Untersuchung ist es, Bündel von Modernisierungsmaßnahmen technoökonomisch in Bezug auf Einfluss von Zeitpunkt und Reihenfolge der Umsetzung sowie wechselseitiger Abhängigkeiten zu bewerten. Dies erfolgt anhand eines Bezirksamtes in der Peripherie der Stadt Reutlingen. Tabelle 1 zeigt einen Steckbrief des Gebäudes.

Tabelle 1: Steckbrief der Fallstudie anhand charakterisierender Merkmale

Merkmal	Beschreibung bzw. Wert, Einheit
Gebäudetyp nach [6]	Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude
Baujahr	1964

¹ Im Folgenden auch als „Maßnahme(n)“ bezeichnet.

Bauweise	Kompakt, Putz- und Stein-Fassade, mehrere Fensterreihen, Ziegel-Steildach
Geschossflächenzahl	3
Energiebezugsfläche	391 m ²
Wärmebereitstellung Status Quo	Öl-Niedertemperaturkessel
Spezifischer Raumwärmeverbrauch	154,5 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$ *
Anteil Raumwärme am Endenergieverbrauch	95 % *

* aus Daten und Annahmen bestimmt

3 Methodik

Ausgangspunkt der Untersuchung ist die Aufnahme der Gebäudedaten. Anschließend wird jede Modernisierungsmaßnahme charakterisiert, sowohl in der zeitlichen als auch der technischen Dimension. Mithilfe von spezifischen Kosten und Kostenkurven sowie Preispfaden für Energieträger und CO₂-Emissionen wird die technoökonomische Analyse je Modernisierungsmaßnahme durchgeführt. Die Bestimmung ökonomischer Bewertungsgrößen erfolgt auf Basis der technoökonomischen Analyse. Am Ende steht die grafische Auswertung der Ergebnisse. Abbildung 1 zeigt die methodische Vorgehensweise inklusive wesentlicher Bestandteile der einzelnen Schritte.

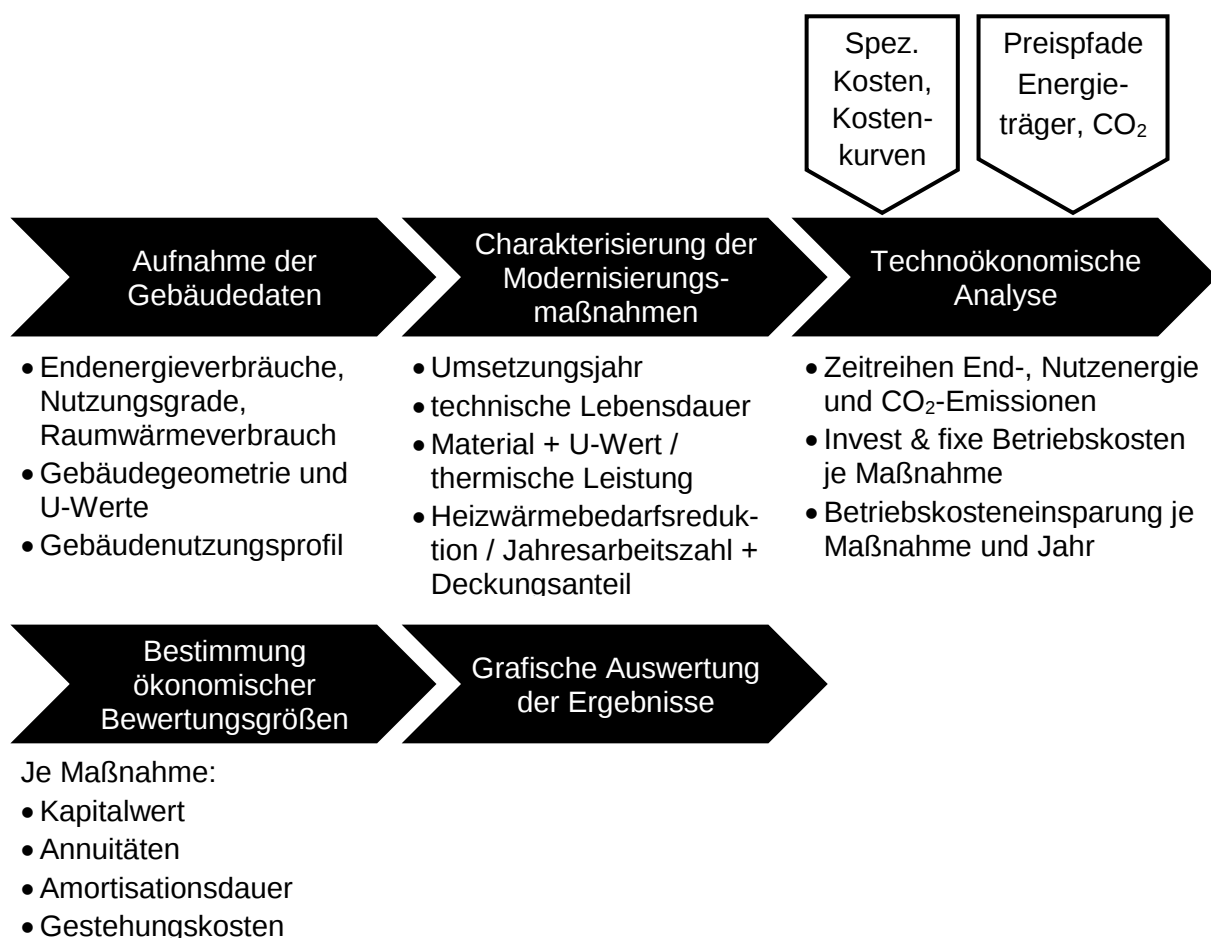


Abbildung 1: Überblick der methodischen Vorgehensweise

Die gesamte Methodik lässt sich für beliebige Nichtwohn- und auch Wohngebäude anwenden, unabhängig vom Typ des bestehenden, des neuen Wärmeerzeugers oder der Sanierungsmaßnahme. Zur besseren Nachvollziehbarkeit erfolgt in Teilen eine Konkretisierung in Bezug auf die Fallstudie. Die folgenden Unterkapitel behandeln ausgewählte Aspekte der Gesamtmethodik.

3.1 Charakterisierung der Modernisierungsmaßnahmen

3.1.1 Nutzenergieeinsparung von Sanierungsmaßnahmen

Die Berechnung der jährlichen Nutzenergieeinsparung von Sanierungsmaßnahmen erfolgt über einen Vorher-Nachher-Vergleich des Heizwärmebedarfs (Nutzenergie Raumwärme). Dieser wird auf Basis der DIN V 18599-2 bestimmt [7], wobei eine Vielzahl an Gebäude- und Klimaparametern einfließen, die bis auf den U-Wert alle konstant bleiben. Die Berechnung des Heizwärmebedarfs des Gebäudes anstatt der reinen Nutzenergieeinsparung der einzelnen Sanierungsmaßnahme ist notwendig, da aufgrund der Senkung des Transmissionswärmeverlusts das Verhältnis zwischen freier Wärme (Summe aus Abwärme und solaren Strahlungsgewinnen) und Wärmeverlusten steigt, was wiederum aufgrund eines sinkenden Ausnutzungsgrades einen geringeren Wärmegegewinn nach sich zieht [7]. Diese gebäudephysikalischen Wechselwirkungen beeinflussen den effektiven Rückgang des Heizwärmebedarfs signifikant, insbesondere bei der zeitgleichen Umsetzung mehrerer Sanierungsmaßnahmen. In Kapitel 5, Tabelle 3 werden die U-Werte für den Status Quo des Gebäudes und je Sanierungsmaßnahme angegeben.

3.1.2 Technische Parameter des hybriden Wärmepumpensystems

Für die technoökonomische Analyse des hybriden Wärmepumpensystems werden die Jahresarbeitszahl und die Deckungsanteile von Luft-Wasser-Wärmepumpe (LWWP) und Öl-Bestandskessel benötigt. Beide hängen von den Heizkreistemperaturen ab, die durch Sanierungsmaßnahmen aufgrund der Reduktion der Heizlast beeinflusst werden. Zur Berechnung der beiden Größen sind die Mengen an benötigter Endenergie zum Betrieb und bereitgestellter Wärme der Wärmeerzeuger notwendig. Dies erfordert eine jährliche Simulation des hybriden Wärmepumpensystems unter Einbeziehung eines Lastprofils der Wärmenachfrage, da sich sowohl in der Jahresarbeitszahl als auch beim Deckungsanteil eine Mittelung und Gewichtung verschiedener Betriebszustände ausdrücken. Neben den beiden Wärmeerzeugern gehört auch ein Wärmespeicher zur Simulationsumgebung. Als Lastprofil wird auf das Standardlastprofil Erdgas für den Anwendungsbereich Gebäude auf Gebietskörperschaften (GKO) zurückgegriffen [8]. Die thermische Leistung der LWWP wird als Eingangsgröße variiert. Zwischen Jahresarbeitszahl und thermischer Leistung besteht eine negative Korrelation. Der Deckungsanteil der LWWP steigt bei zunehmender thermischer Leistung, wobei sich ab einer bestimmten thermischen Leistung eine Sättigung mit Deckungsanteil 1 einstellt. Daher wird die thermische Leistung so gewählt, dass sie möglichst gering ist und durch eine Erhöhung nur eine marginale Verbesserung des Deckungsanteils im unsanierten Gebäudezustand erreicht werden würde. Für die Jahresarbeitszahl wird ein mittlerer, konstanter Wert angenommen.

Die gewählte thermische Leistung und die resultierende Jahresarbeitszahl wird in Tabelle 3 genannt, der Deckungsanteil ist in Abhängigkeit für die in Kapitel 5 charakterisierten Szenarien in Tabelle 4 und Tabelle 5 dargestellt.

3.2 Technoökonomische Analyse

3.2.1 Invest und fixe Betriebskosten von Modernisierungsmaßnahmen

Der spezifische Invest für eine Sanierungsmaßnahme in $\text{€/m}^2_{\text{Bauteil}}$ kann in reine Instandhaltungskosten (auch Sowieso-Kosten) und energiebedingte Mehrkosten aufgeteilt werden. Dafür werden die einzelnen auftretenden Kostenbestandteile je Bauteilkomponente nach bestimmten Kriterien den beiden Kostenarten zugeordnet. In [9] wurde dies für zehn reale Nichtwohngebäude mit einer entsprechenden Kostenanalyse gemacht, welche als Kostendatenbasis verwendet wird. Für die ökonomische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen werden als Investitionsausgaben nur die energiebedingten Mehrkosten herangezogen, da nur aus diesen die Energieeinsparung bei der Raumwärme-Nutzenergie resultiert. Die Möglichkeit für die Amortisation der reinen Instandhaltungskosten besteht in der Werterhaltung bzw. -steigerung des Gebäudes. Fixe Betriebskosten fallen bei Sanierungsmaßnahmen nicht an.

Der spezifische Invest in €/kW_{th} sowie spezifische fixe Betriebskosten in €/a von Wärmeerzeugern (für die Fallstudie: Luft-Wasser-Wärmepumpe) wird aus [10] abgeleitet, wo eine einheitliche Datenbasis für die kommunale Wärmeplanung in Baden-Württemberg geschaffen wurde.

Die resultierenden konkreten Kostenannahmen werden in Tabelle 3 in Kapitel 5 dargestellt.

3.2.2 Ermittlung der verbrauchsgebundenen Betriebskosteneinsparung von Modernisierungsmaßnahmen

Die verbrauchsgebundenen Betriebskosteneinsparungen von Modernisierungsmaßnahmen ergeben sich für Sanierungsmaßnahmen durch eine Reduktion der Raumwärme-Nutzenergie und damit auch der Endenergie der eingesetzten Energieträger. Beim Wärmeerzeugerwechsel geht die verbrauchsgebundene Betriebskosteneinsparung darauf zurück, dass der kostenmindernde Effekt der Reduktion der Endenergie durch den Energieträgerwechsel aufgrund des deutlich höheren Nutzungsgrads der Luft-Wasser-Wärmepumpe im Vergleich zum fossilen Bestandskessels den kostensteigernden Effekt in Form des Anstiegs des Energieträgerpreises dominiert. Die in den folgenden Gleichungen verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Formelzeichen und Abkürzungen für die Berechnung der verbrauchsgebundenen Betriebskosteneinsparung

Formelzeichen	Größenbezeichnung	Index-Abkürzung	Langform
E	Energie	RW	Raumwärme
K	Kosten	Wärmeerz.	Wärmeerzeuger
p	Preis Energieträger	LWWP	Luft-Wasser-Wärmepumpe
T	techn. Lebensdauer	Wärmevert.	Wärmeverteilung

t_{Start}	Umsetzungsjahr	
ζ	Nutzungsgrad	
α	Deckungsanteil	

Sanierungsmaßnahmen

Aus einer Sanierungsmaßnahme resultiert eine bestimmte Reduktion des Heizwärmebedarfs, die sich in einer jährlich konstanten Nutzenergieeinsparung widerspiegelt. Diese teilt sich in Abhängigkeit des Deckungsanteils α auf die beiden Wärmeerzeuger mit den entsprechenden Energieträgern auf. Werden Sanierungsmaßnahmen vor der Umsetzung des hybriden Wärmepumpensystems durchgeführt, ergibt sich lediglich eine Einsparung des alten Energieträgers. Nach dem Entfernen des Bestandskessels nach ausreichender Sanierung, resultiert eine Einsparung der zum Betrieb der LWWP benötigten Strommenge. Die verbrauchsgebundenen Betriebskosteneinsparungen durch eine Sanierungsmaßnahme für ein Jahr t ergeben sich nach Gleichung G-1.

$$(K_{\text{Einsp,Betrieb}})_t = (K_{\text{Einsp,Betrieb}})_t|_{\text{Wärmeerz. 1}} + (K_{\text{Einsp,Betrieb}})_t|_{\text{Wärmeerz. 2}} \quad (\text{G-1a})$$

$$\text{mit } (K_{\text{Einsp,Betrieb}})_t|_{\text{Wärmeerz. 1/2}} = \frac{(E_{\text{Nutz,RW}})_t}{\zeta_{\text{Wärmevert.}} \cdot \zeta_{\text{Wärmeerz.}}} \cdot (\alpha_{\text{Wärmeerz.}})_t \quad (\text{G-1b})$$

$$\forall t \in \{t_{\text{Start}}; t_{\text{Start}} + T\}$$

Wärmeerzeugerwechsel (hybride Wärmepumpe)

Im Falle eines hybriden Wärmepumpensystems findet der Wärmeerzeugerwechsel über einen Zeitraum von mehreren Jahren statt, wobei am Anfang eine Wärmeerzeugerergänzung im Sinne des Wechsels des Hauptwärmeerzeugers steht und am Ende der Rückbau des fossilen Bestandskessels. Die verbrauchsgebundenen Betriebskosteneinsparungen durch den Wärmeerzeugerwechsel für ein Jahr t werden gemäß Gleichung G-2 berechnet, wobei nur der neue Wärmeerzeuger (Luft-Wasser-Wärmepumpe) einen Beitrag leistet. Für den Bestandskessel ergibt sich für den letzten Faktor in Gleichung G-2 der Wert Null, da kein Energieträgerwechsel vorliegt. Die ersten beiden Faktoren beschreiben die von der LWWP bereitgestellte Wärmemenge. Die oben beschriebenen kostenmindernden und -steigernden Effekte drücken sich durch die Differenz des Energieträgerpreis-Nutzungsgrad-Verhältnisses aus.

$$(K_{\text{Einsp,Betrieb}})_t = \frac{(E_{\text{Nutz,RW}})_t}{\zeta_{\text{Wärmevert.}}} \cdot (\alpha_{\text{LWWP}})_t \cdot \left(\frac{(p_{\text{Strom,LWWP}})_t}{\zeta_{\text{LWWP}}} - \frac{(p_{\text{Heizöl}})_t}{\zeta_{\text{Ölkessel}}} \right); \quad (\text{G-2})$$

$$\forall t \in \{t_{\text{Start}}; t_{\text{Start}} + T\}$$

Der Berechnungsansatz enthält die implizite Annahme, dass der Bestandskessel bis zum Ablauf der technischen Lebensdauer des neuen Wärmeerzeugers (Luft-Wasser-Wärmepumpe) in Betrieb ist, da dessen Energieträgerpreis als Referenz fungiert.

3.3 Ökonomische Bewertungsgrößen

Die technoökonomische Analyse liefert als Zwischenergebnis alle auftretenden Zahlungen, die nach Umsetzung einer Modernisierungsmaßnahme anfallen. Dies ermöglicht eine dynamische wirtschaftliche Bewertung.

3.3.1 Kapitalwert und Annuität

Kapitalwert und Annuitäten werden für jede Maßnahme einzeln berechnet. Um die Summe der Kapitalwerte je Maßnahme als Kapitalwert des Maßnahmenbündels interpretieren zu können, muss ein gemeinsames Bezugsjahr gewählt werden. Dieses Basisjahr t_0 ist das Jahr der Umsetzung der ersten Maßnahme; das Jahr der Maßnahmenumsetzung wird als t_{Start} bezeichnet. Als Zieljahr t_{Ziel} wird das Jahr 2040 gewählt, da dies dem Zieljahr für Klimaneutralität in Baden-Württemberg entspricht [2].

Der Kapitalwert KW einer Maßnahme hängt von den Investitionsausgaben, den fixen Betriebskosten und den verbrauchsgebundenen Betriebskosteneinsparungen sowie dem Kalkulationszinssatz i ab und ergibt sich nach Gleichung G-3.

$$KW = -\frac{\text{Investitionsausgaben}}{(1+i)^{t_{\text{Start}}-t_0}} + \left(\sum_{t=t_0}^{t_{\text{Ziel}}} \frac{(K_{\text{Einsp,Betrieb}})_t - (K_{\text{fix,Betrieb}})_t}{(1+i)^t} \right) + \text{Restwert} \quad (\text{G-3})$$

Fixe Betriebskosten treten bei Sanierungsmaßnahmen nicht auf und nehmen daher in Gleichung G-3 den Wert Null an (vergleiche Kapitel 3.2.1). Die Berechnung des Restwerts ist Gegenstand von Kapitel 3.3.2.

Die Annuität A einer Investition ergibt sich durch die Multiplikation des Kapitalwerts mit dem Annuitätenfaktor ANF gemäß Gleichung G-4.

$$A = KW \cdot \text{ANF} = KW \cdot \frac{i \cdot (1+i)^{t_{\text{Ziel}}-t_0}}{(1+i)^{t_{\text{Ziel}}-t_0} - 1} \quad (\text{G-4})$$

3.3.2 Restwert

Die Betrachtung von Restwerten ist notwendig, wenn die technische Lebensdauer einer Modernisierungsmaßnahme bzw. Investition den Betrachtungshorizont des Modells übersteigt. Aufgrund der sehr unterschiedlich langen technischen Lebensdauern von Sanierungsmaßnahmen (40 Jahre, vgl. Tabelle 3) und Wärmeerzeugern (18 Jahre im Falle der Luft-Wasser-Wärmepumpe, vgl. Tabelle 3), ergeben sich sehr große Restwerte für die Sanierungsmaßnahmen und ein relativ kleiner Restwert für die LWWP. Klassischerweise wird der Restwert auf die Investition bezogen und ergibt sich als Differenz zwischen Investitionsausgabe und Abschreibungen zwischen Umsetzungsjahr und dem Betrachtungshorizont. Die Ermittlung des Restwerts in dieser Weise impliziert allerdings, dass die durch die Sanierungsmaßnahmen erfolgten baulichen Veränderungen rückgebaut und verkauft werden, was realitätsfern ist. Aufgrund dessen wird der Restwert als Summe der Zahlungsströme zwischen Betrachtungshorizont und dem Ende der technischen Lebensdauer definiert. Im Falle einer Modernisierungsmaßnahme entspricht die Summe der Zahlungsströme den jährlichen Betriebskosteneinsparungen, die sich aus den verbrauchsgebundenen Betriebskosteneinsparungen und, für den Wärmeerzeugerwechsel, den zusätzlichen fixen Betriebskosten zusammensetzen (Gleichung G-5).

$$\text{Restwert} = \sum_{t=t_{\text{Ziel}}}^{t_{\text{Start}}+T} (K_{\text{Einsp,Betrieb}})_t \quad (\text{G-5})$$

Dies trägt der Lebenszykluskostenbetrachtung für die Einzelmaßnahme Rechnung. Gleichzeitig wird der allgemeine Betrachtungshorizont faktisch überwunden. Eine Ausweitung des

Betrachtungshorizonts würde die Berücksichtigung von Reinvestitionen notwendig machen, die ein Szenario komplexer machen und die Unsicherheit weiter erhöhen, da die Höhe der zukünftigen Investitionsausgaben angenommen werden müsste.

3.3.3 Gestehungskosten von Modernisierungsmaßnahmen

Kapitalwert und Annuitäten, bezogen auf die Energiebezugsfläche, (vgl. Kapitel 3.3.1) können die Wirtschaftlichkeit einer Modernisierungsmaßnahme mit Bezug zum untersuchenden Objekt beschreiben. Um einen Bezug der Wirtschaftlichkeit zur Energiemenge, hier dem Raumwärmeverbrauch, zu erhalten, können Gestehungskosten herangezogen werden. Sie haben die gleiche Einheit wie Energieträgerpreise. Sie ermöglichen damit eine Aussage darüber, in welchem Maße die Umsetzung einer Maßnahme unter Annahme eines bestimmten Preispfades die Kosten für den Verbrauch einer Einheit Raumwärme (z.B. kWh) verändert. Die Ermittlung der Gestehungskosten der eingesparten Raumwärme und der Gestehungskosten des Wärmeerzeugerwechsels unterscheidet sich und wird im Folgenden erläutert.

Gestehungskosten des Wärmeerzeugerwechsels

Zur technoökonomischen Bewertung von Wärmeerzeugern für die Wärmebereitstellung werden häufig Wärmegestehungskosten (engl. levelized cost of heat (LCOH)) ermittelt. Dabei wird der Quotient aus barwertigen Erzeugungskosten und der barwertigen erzeugten Wärmemenge bezüglich der technischen Lebensdauer gebildet [11]. Mit Hilfe von LCOH können damit verschiedene Technologien der Wärmebereitstellung ganzheitlich verglichen werden.

Beim Wechsel des Wärmeerzeugers bzw. des Hauptwärmeerzeugers im Falle eines hybriden Wärmepumpensystems spielen zwei Technologien eine Rolle, weshalb zur Bewertung dieser Modernisierungsmaßnahme M_W die Definition der LCOH adaptiert werden muss. Die Gestehungskosten des Wärmeerzeugerwechsels leiten sich aus der Differenz der Wärmegestehungskosten zwischen neuem und altem Wärmeerzeuger ab. Bei einem ökonomisch sinnvollen Wärmeerzeugerwechsel ist die Summe der barwertigen Betriebskosteneinsparungen höher als der Invest, woraus sich ein positiver Kapitalwert ergibt. Somit wird anstatt des Verhältnisses von Kosten zu Nutzen das Verhältnis von Gewinn zu Nutzen betrachtet. Die Gestehungskosten des Wärmeerzeugerwechsels (M_W) (engl. levelized cost of changing heat supply system (LCCH)) ergeben sich als Quotient aus Kapitalwert und der barwertigen erzeugten Wärmemenge über die technische Lebensdauer (siehe Gleichung G-6). Beim hybriden Wärmepumpensystem teilt sich die erzeugte Wärmemenge auf zwei Wärmeerzeuger auf.

$$LCCH = \frac{KW_{M_W}}{-\sum_{t=t_{\text{start}}}^T \left((E_{\text{Wärmeerz.})_{M_W,t} \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \right)} \quad (G-6)$$

Durch das negative Vorzeichen im Nenner ist die Wirtschaftlichkeit bei negativen Gestehungskosten gegeben.

Gestehungskosten der eingesparten Raumwärme

Da aus einer Sanierungsmaßnahme M_S eine bestimmte, jährlich gleichbleibende Reduktion des Heizwärmebedarfs resultiert, kann zur Bestimmung der Gestehungskosten der eingesparten Raumwärme eine jährliche Betrachtung vorgenommen werden. In Anlehnung an Gleichung G-6 wird statt dem Kapitalwert die Annuität herangezogen. Die Energiemenge im Nenner wird

eingespart statt erzeugt und muss nicht annuisiert werden. Die Gestehungskosten der eingesparten Raumwärme ergeben sich dementsprechend sowie nach [12] gemäß Gleichung G-7.

$$LCSE = \frac{KW_{Ms} \cdot ANF}{-(E_{Nutz,Einsp,p.a.})_{Ms}} \quad (G-7)$$

4 Technoökonomische Rahmenbedingungen und Annahmen

4.1 Modernisierungsmaßnahmen

Die technoökonomischen Rahmenbedingungen wurden teilweise in Kapitel 3.1 behandelt und umfassen je Modernisierungsmaßnahme Investitionsausgaben und fixe Betriebskosten (Kapitel 3.2.1) inklusive Preissteigerungsraten sowie technische Parameter (Kapitel 3.1.2).

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die verwendeten Kostenpositionen, bezogen auf das Jahr 2023, und technischen Parameter der betrachteten Modernisierungsmaßnahmen.

Tabelle 3: Charakterisierung der Modernisierungsmaßnahmen: Kostenpositionen und technische Parameter

	Sanierung Fenster	Sanierung Außenwand	Sanierung Dach	Quelle
Spezifischer Invest (energiebedingt)	168 $\frac{\text{€}_{2023}}{\text{m}^2 \text{Fenster}}$	111 $\frac{\text{€}_{2023}}{\text{m}^2 \text{Außenwand}}$	158 $\frac{\text{€}_{2023}}{\text{m}^2 \text{Dach}}$	[9]
Anteil energiebedingter Invest an Gesamt-Invest	33 %	72 %	59 %	[9]
Preissteigerungsrate	2 % p.a.	2 % p.a.	2 % p.a.	Annahme
technische Lebensdauer	40 Jahre	40 Jahre	40 Jahre	[13]
U-Wert alt neu	2,68 0,8 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$	1,29 0,12 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$	2,2 0,12 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$	[6] [14]
	Luft-Wasser- Wärmepumpe		Quelle	
Spezifischer Invest	1443 $\frac{\text{€}_{2023}}{\text{kW}_{th}}$		[10]	
Fixe Betriebskosten	350 $\frac{\text{€}_{2023}}{\text{a}}$		[10]	
Preissteigerungsrate	Kostenkurve		[10]	
technische Lebensdauer	18 Jahre		[15]	
thermische Leistung	10 kW_{th}	Auslegung nach Kapitel 3.1.2		
Jahresarbeitszahl	3,5			
Spez. CO ₂ -Emissions- faktor Ökostrom	49 $\frac{\text{g CO}_2}{\text{kWh}}$		[16] , [17]	

Zur besseren Vergleichbarkeit der Sanierungsmaßnahmen wurde eine gleiche technische Lebensdauer angenommen, nach [13] bestehen bezüglich der drei Maßnahmen Unterschiede. Der Emissionsfaktor ergibt sich aus dem erneuerbaren Strommix Deutschland nach [16] und Ökobilanzdaten nach [17].

Als Kalkulationszinssatz werden 3 % angenommen. Die etwaige Inanspruchnahme von Förderprogrammen in Bezug auf die Minderung der effektiven Investitionsausgaben wird nicht berücksichtigt. Mögliche weitere Modernisierungsmaßnahmen wie der Einbau oder Austausch eines Wärmespeichers oder eine PV-Anlage sind nicht Gegenstand der Analysen. Die Trinkwarmwasserbereitung wird bei den Analysen ausgeblendet. Eine Verbrauchsänderung ist aufgrund der betrachteten Modernisierungsmaßnahmen nicht zu erwarten. Bei vielen Nichtwohngebäuden und auch bei der Fallstudie ist der Warmwasseranteil sehr gering, weshalb perspektivisch eine elektrische Trinkwarmwasserbereitung eine adäquate Ergänzung zur Luft-Wasser-Wärmepumpe wäre.

4.2 Energieträger- und CO₂-Preise

Die Entwicklung der Energieträgerpreise im Sinne des Endverbraucherpreises ist abhängig vom Typ des Endverbrauchers. Nichtwohngebäude sind in der Regel in gewerblichem oder öffentlichem Besitz. Die Energieträgerpreise für Heizöl und Wärmepumpenstrom sind im Mittel niedriger als bei Wohngebäuden. Ausgehend von den Preisen für Wohngebäude liegt der Preisabschlag nach [18] bei Nichtwohngebäuden für Heizöl bei 7 % und für Wärmepumpenstrom bei 14 %. Nach der Hochphase der Energieträgerpreise zwischen 2021 und 2023 wird nach [18] eine jährliche Preissteigerung von 1 % (Heizöl) bzw. 0,5 % (Wärmepumpenstrom) angesetzt. Die resultierenden Preispfade sind in Abbildung 2 dargestellt. Der CO₂-Preis für im Gebäudesektor verbrauchte fossile Energieträger ist im Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) bis 2026 festgelegt. Danach soll sich der CO₂-Preis marktbasiert im Rahmen des europäischen ETS 2 einstellen. Der in Abbildung 2 dargestellte Preispfad entspricht dem Szenario „Mit weiteren Maßnahmen“ des Projektionsberichts 2023 für Deutschland [19].

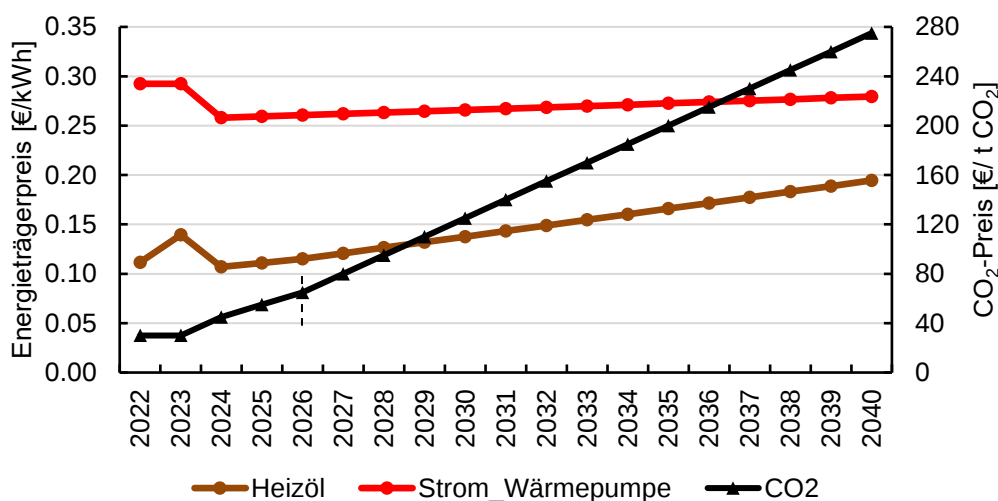


Abbildung 2: Preisentwicklung für die relevanten Energieträger und CO₂ zwischen 2022 und 2040 nach [18, 19]

5 Charakterisierung von Szenarien der Fallstudie

Zur Untersuchung des Einflusses von Zeitpunkt und Reihenfolge der Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen im Maßnahmenbündel sowie wechselseitiger Abhängigkeiten, werden Szenarien definiert. Jedes Szenario enthält alle Modernisierungsmaßnahmen, die Unterschiede bestehen im Umsetzungsfahrplan. Dies zieht auch Unterschiede in der Entwicklung des Deckungsanteils der Luft-Wasser-Wärmepumpe und des Vor-/Rücklauf-temperaturniveaus nach sich. Tabelle 4 und 5 charakterisieren die beiden betrachteten Szenarien.

Tabelle 4: Umsetzungsfahrplan des Maßnahmenbündels für Szenario 1

Szenario 1	2025	2026	2027	2028	2029	2030	...	2040
Luft-Wasser-Wärmepumpe								
Bestands-Ölkessel								
Sanierung Fenster								
Sanierung Außenwand								
Sanierung Dach								
Deckungsanteil LWWP	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00
Vorlauf-/Rücklauf-temperatur	56/46	38/28						

Tabelle 5 : Umsetzungsfahrplan des Maßnahmenbündels für Szenario 2

Szenario 2	2025	2026	2027	2028	2029	2030	...	2040
Luft-Wasser-Wärmepumpe								
Bestands-Ölkessel								
Sanierung Fenster								
Sanierung Außenwand								
Sanierung Dach								
Deckungsanteil LWWP	0,62	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00
Vorlauf-/Rücklauf-temperatur	75/65	58/48	46/36	38/28				

Zentraler Unterschied der beiden Szenarien ist, dass einmal mit Sanierungsmaßnahmen (Szenario 1) und einmal mit dem hybriden Wärmepumpensystem (Szenario 2) begonnen wird, wobei in Szenario 1 aufgrund des Deckungsanteils von 1 der LWWP ab Umsetzung kein hybrides Wärmepumpensystem vorliegt.

6 Ergebnisse

6.1 Entwicklung von Gebäudekennwerten

Die Wirksamkeit von Modernisierungsmaßen drückt sich aus Gebäudesicht im spezifischen Heizwärmebedarf und den spezifischen CO₂-Emissionen aus. Abbildung 3 zeigt deren Verlauf für den Zeitraum von 2025 bis 2030, in dem die Gebäudetransformation stattfindet, für Szenario 1 (links) und Szenario 2 (rechts). Nach 2030 verändern sich die Gebäudekennwerte aufgrund der abgeschlossenen Gebäudetransformation nicht mehr.

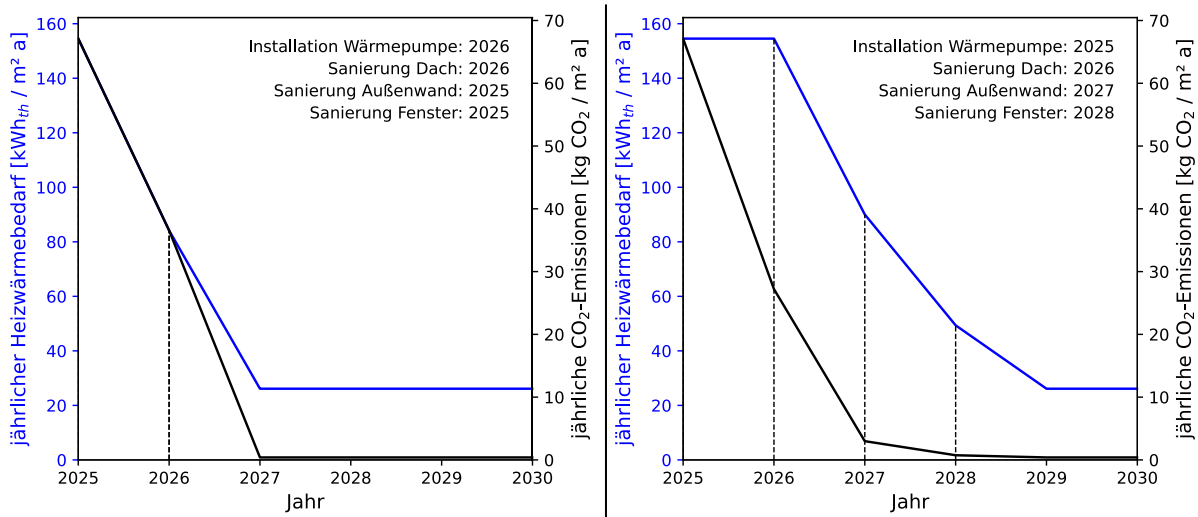


Abbildung 3: Entwicklung des spez. Heizwärmebedarfs und der spez. CO₂-Emissionen zwischen 2025 und 2030 für Szenario 1 (links) und Szenario 2 (rechts)

Grundsätzlich gilt, dass in Folge von Sanierungsmaßnahmen sowohl der Heizwärmebedarf als auch die CO₂-Emissionen zurückgehen und nach einem Wärmeerzeugerwechsel (in der Fallstudie dem Einsatz des hybriden Wärmepumpensystems) der Heizwärmebedarf unverändert bleibt bei sinkenden CO₂-Emissionen. Anfangs- und Endwerte sind bei beiden Szenarien gleich. Die CO₂-Emissionen gehen nicht auf Null zurück, da als Emissionsfaktor für den Wärmepumpenstrom 49 g CO₂/kWh (vgl. Tabelle 3) angesetzt wurden. In Szenario 2 zeigt sich, dass mit jeder weiteren Sanierungsmaßnahme die CO₂-Emissionen zunehmend weniger gemindert werden können.

6.2 Technoökonomische Auswertung

Zur technoökonomischen Auswertung der Modernisierungsmaßnahmen werden Annuitäten, Amortisationsdauer und Gestehungskosten herangezogen.

In Abbildung 4 werden je Maßnahme die Annuität des Invests sowie der fixen Betriebskosten (Ausgaben) der Annuität der Betriebskosteneinsparung (Einnahmen), bezogen auf die Energiebezugsfläche, gegenübergestellt und nach Ausgabenannuität sortiert. Eine Maßnahme ist wirtschaftlich, wenn die Ausgabenannuität geringer ist als die Einnahmenannuität bzw. der Balken in Abbildung 4 breiter als hoch ist.

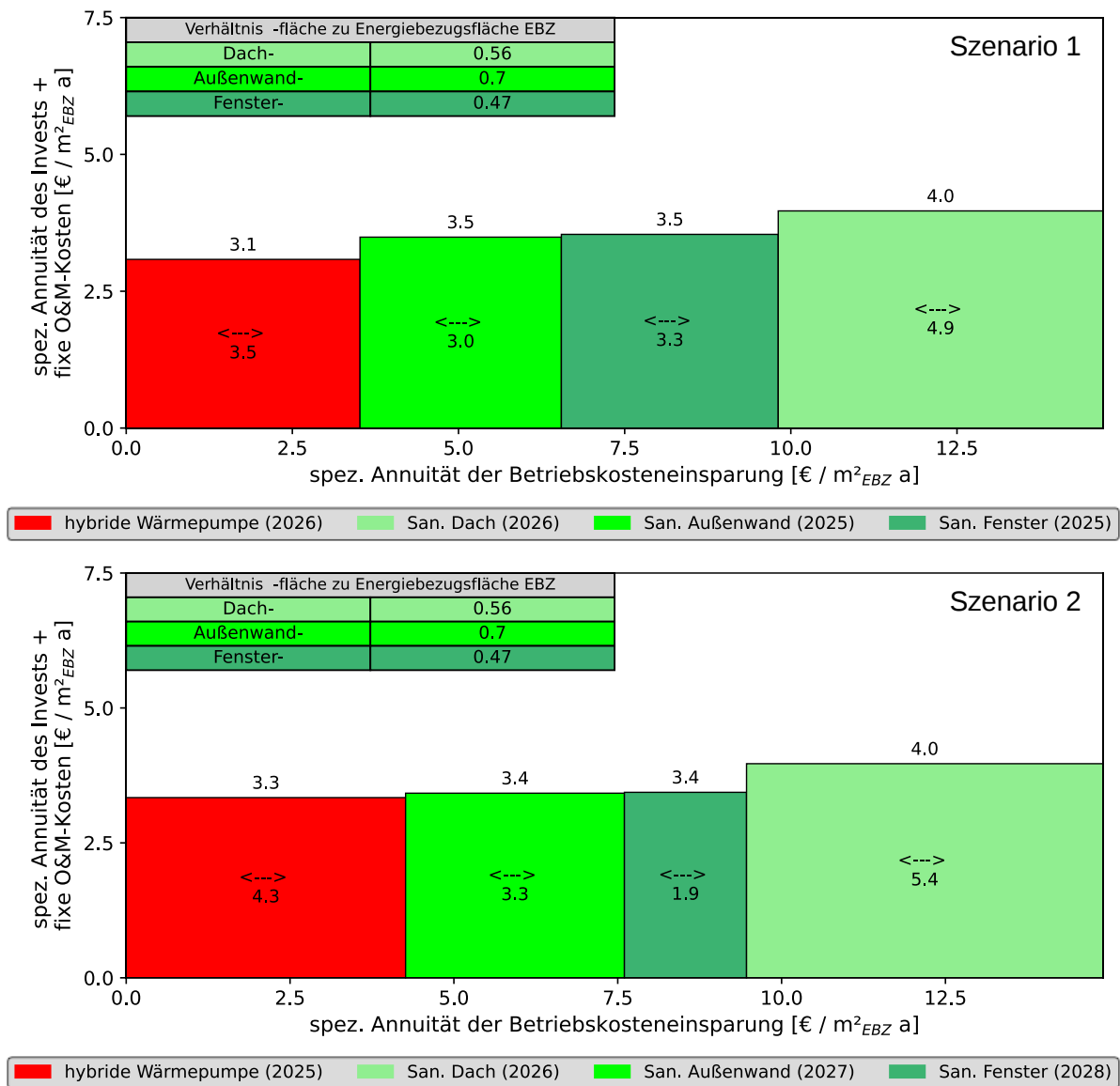


Abbildung 4: Annuitäten der Ausgaben über Annuitäten der Einnahmen je Modernisierungsmaßnahme

In beiden Szenarien ist die Ausgabenannuität der hybriden Wärmepumpe trotz kürzerer technischer Lebensdauer am geringsten, da die absoluten Investitionsausgaben im Vergleich zu den Sanierungsmaßnahmen geringer ausfallen. Sowohl Ausgaben- als auch Einnahmeannuität sind bei der Dachsanierung am höchsten. Die hohe Einnahmeannuität ist auf den hohen Rückgang beim U-Wert und die daraus resultierende größte absolute Nutzeneinsparung der drei Sanierungsmaßnahmen zurückzuführen. Die Ausgabenannuitäten der Sanierungsmaßnahmen korrelieren nicht mit dem spezifischen Invest je Maßnahme (siehe Tabelle 3). Hintergrund sind verschiedene Verhältnisse von Komponentenfläche zu Energiebezugsfläche (siehe Abbildung 4). Je größer dieses Verhältnis, desto größer die absoluten bzw. die auf die Energiebezugsfläche bezogenen Ausgabenannuitäten.

Die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen anhand der Gegenüberstellung von Ausgaben- und Einnahmenannuität geht auf den Kapitalwert zurück. Wird dieser auf die eingesparte oder erzeugte Energiemenge bezogen, erhält man Gestehungskosten (vgl. Kapitel 3.3.3). Eine weitere Bedingung für die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme ist, dass die Amortisationsdauer

kleiner als die technische Lebensdauer sein muss. Abbildung 5 stellt die Amortisationsdauern und Gestehungskosten gegenüber. Die Größe der Kreise spiegelt die Höhe des absoluten Invests dar. Kreise im grünen Bereich entsprechen wirtschaftlichen Maßnahmen.

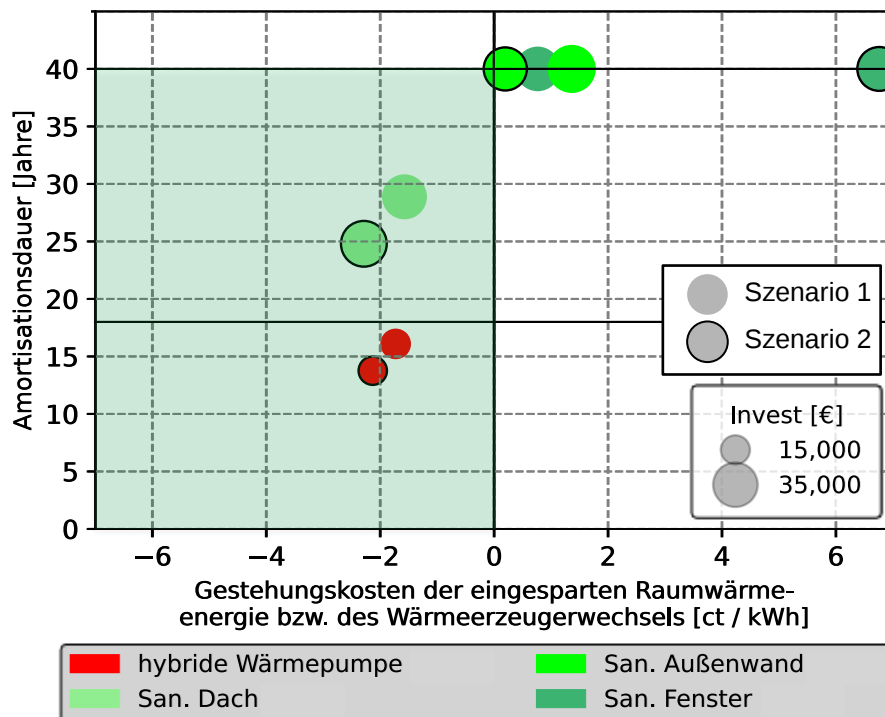


Abbildung 5: Amortisationsdauer über den Gestehungskosten der eingesparten Raumwärme bzw. des Wärmeerzeugerwechsels

Wie auch Abbildung 4 zu entnehmen ist, sind Außenwand- und Fenstersanierung in beiden Szenarien knapp oder deutlich unwirtschaftlich. Die Dachsanierung ist in beiden Szenarien wirtschaftlich. Die Verbesserung in Szenario 2 ist darauf zurückzuführen, dass die Dachsanierung hier als erstes und alleine umgesetzt wird. Wie Abbildung 3 gezeigt hat, erreicht die erste Sanierungsmaßnahme die höchste Minderung des spezifischen Heizwärmebedarfs. Weiterhin ist die Nutzenergieeinsparung einer Sanierungsmaßnahme bei einzelner Umsetzung höher als im Maßnahmenbündel, wozu die Hintergründe in Kapitel 3.1.1 erläutert wurden. Die Amortisationsdauer des hybriden Wärmepumpensystems ist in Szenario 2 trotz etwas höherem Invest niedriger als in Szenario 1, da die Betriebskosteneinsparungen in Szenario 2 höher sind. Die Gestehungskosten des hybriden Wärmepumpensystems scheinen sich nur geringfügig zu unterscheiden, sie sind in Szenario 2 aber um knapp 30 % niedriger als in Szenario 1. Sowohl der Kapitalwert als auch die barwertige erzeugte Wärmemenge sind in Szenario 2 höher, wobei der relative Unterschied beim Kapitalwert größer ist, woraus sich die niedrigeren Gestehungskosten in Szenario 2 ergeben.

Bei einer Mischung aus wirtschaftlichen und unwirtschaftlichen Modernisierungsmaßnahmen stellt sich die Frage, ob die Umsetzung des Maßnahmenbündels wirtschaftlich ist bzw. in welchem Szenario der Kapitalwert des Maßnahmenbündels höher ist. Daher sind in Abbildung 6 die spezifischen Kapitalwerte der Einzelmaßnahmen gestapelt dargestellt. Zum Vergleich des Wärmeerzeugerwechsels mit allen Sanierungsmaßnahmen sind die entsprechenden Flächen fett umrandet. Der spezifische Kapitalwert des Maßnahmenbündels ist der beschriftete schwarze Punkt.

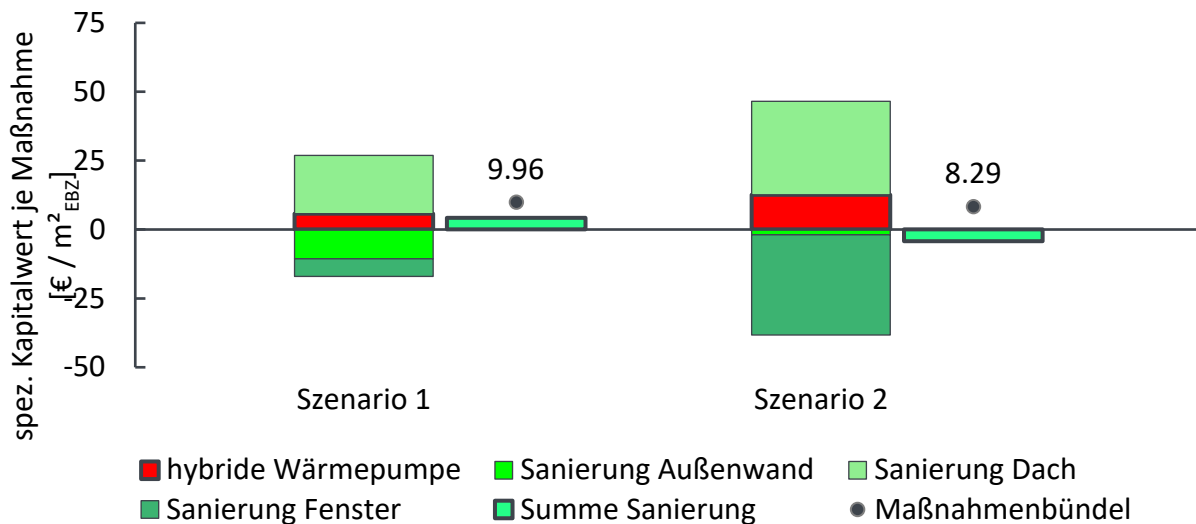


Abbildung 6: Szenarienvergleich in Bezug auf den Kapitalwert je Modernisierungsmaßnahme und das Maßnahmenbündel

Betrachtet man die Summe der Sanierungsmaßnahmen, so ist trotz der höheren Wirksamkeit der Einzelmaßnahme bezüglich der Nutzenergieeinsparung bei schrittweiser Maßnahmenumsetzung (Szenario 2) eine Gebäudesanierung mit wenig zeitlicher Streckung und kombinierter Maßnahmenumsetzung (Szenario 1) leicht wirtschaftlicher. Die Wirtschaftlichkeit eines hybriden Wärmepumpensystems ist umso höher, je mehr Heizöl verdrängt werden kann. Trotz niedrigerem Deckungsanteil kann im un- und teilsanierten Zustand über ein paar Jahre mehr Heizöl verdrängt werden (Szenario 2) als bei maximalem Deckungsanteil im voll und fast vollsanierten Zustand (Szenario 1). Wird wie in Szenario 2 bei der Umsetzung des Maßnahmenbündels mit einem hybriden Wärmepumpensystem begonnen, ist die Wirtschaftlichkeit der letzten Sanierungsmaßnahme bei einzelner Umsetzung sehr schlecht, da sich durch sie nur noch geringe Mengen an elektrischer Energie einsparen lassen. Der höhere Kapitalwert des hybriden Wärmepumpensystems in Szenario 2 kann deshalb den deutlich negativen Kapitalwert der Fenstersanierung nicht kompensieren, was der Hauptgrund für den etwas höheren spezifischen Kapitalwert des Maßnahmenbündels von Szenario 1 ist.

7 Fazit und Diskussion

Die Auswertung der exemplarischen Szenarien zeigt, dass eine gekoppelte Betrachtung von Modernisierungsmaßnahmen wichtige Wechselwirkungen berücksichtigen kann und Umsetzungszeitpunkt und -reihenfolge der Einzelmaßnahmen einen starken Einfluss auf die technoökonomische Bewertung des Maßnahmenbündels haben.

Was die Sanierungsmaßnahmen betrifft, ist festzustellen, dass die erste(n) Sanierungsmaßnahme(n) die größte Energie- und Kosteneinsparung nach sich ziehen, da das Einsparpotenzial im unsanierten Zustand größer ist. Daraus resultiert in der Regel auch, dass die Wirtschaftlichkeit sinkt, je später eine Sanierungsmaßnahme umgesetzt wird bzw. je besser die Gebäudeenergieeffizienz vor der Sanierung. Weiterhin hat eine Sanierungsmaßnahme ein höheres Energie- und Kosteneinsparpotenzial, wenn sie allein umgesetzt wird, was auf die gebäudephysikalischen Wechselwirkungen von Wärmeverlusten und -gewinnen zurückzuführen ist. Sanierungsmaßnahmen, die nach der Umstellung auf eine hybride Wärmepumpe umgesetzt werden, haben ein deutlich geringeres Emissionseinsparpotenzial, da

die flächenspezifischen Emissionen des Gebäudes v.a. durch den Energieträgerwechsel reduziert werden.

In den beiden Szenarien wurde die zeitgleiche Umsetzung von hybridem Wärmepumpensystem und einer/mehrerer Sanierungsmaßnahmen nicht betrachtet. Diese Maßnahmenkombination hat den Vorteil, dass neben der Minderung von spezifischem Heizwärmebedarf und CO₂-Emissionen die LWWP von Beginn an einen sehr hohen Deckungsanteil aufweist. Damit ist insbesondere ein starker Rückgang der CO₂-Emissionen innerhalb eines Jahres erreichbar.

Ein Vorteil des hybriden Wärmepumpensystems ist, dass die Wärmepumpe auf den Zielgebäudezustand ausgelegt werden kann, was den Invest aufgrund einer geringeren thermischen Leistung senkt. Bei einem klassischen Wärmeerzeugerwechsel wird die LWWP auf den Status Quo ausgelegt und ist nach Umsetzung von Sanierungsmaßnahmen überdimensioniert. Ein Nachteil und Hemmnis kann der Platzbedarf sein, da für einige Jahre ein Bestandskessel und eine Wärmepumpe parallel betrieben werden müssen. Außerdem entstehen doppelte Wartungskosten, die aber gemessen am neuen Invest und den Betriebskosteneinsparungen relativ gering sind.

Zukünftige Kostenbestandteile werden durch die Preissteigerungsrate und den Kalkulationszinssatz beeinflusst, die gegensätzlich wirken. Bei einer Preissteigerungsrate von in der Regel 2 % und einem Kalkulationszinssatz von 3 % ergibt sich eine effektive Abzinsung von 1 %, was zukünftige Investitionen und auch Betriebskosteneinsparungen wertmäßig verringert. Liegen die erwarteten Preissteigerungen für Sanierungsinvestitionen höher als für die relevanten Energieträgerpreise, sollten Investitionen möglichst früh getätigt werden. Eine höhere Preissteigerungsrate des alten gegenüber dem neuen Energieträger beschleunigt die Amortisation. In Bezug auf die angenommenen Preispfade gilt, dass ein möglichst geringes Verhältnis zwischen neuem und altem Energieträger und stark steigende CO₂-Preise die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe erhöhen. Die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen steigt unter anderem bei einem hohen Niveau der Energieträgerpreise und bei größeren Preissteigerungsraten aufgrund höherer vermiedener Energieträgerkosten.

Die beiden vorgestellten Szenarien zeigen beispielhaft die Vor- und Nachteile bestimmter Umsetzungsfahrpläne von Modernisierungsmaßnahmen auf. In der Praxis bestehen hinsichtlich der ersten Maßnahme häufig gebäudeindividuelle Zwänge aufgrund von baulichen Schäden oder Betriebsstörungen. Zeitpunkt, Abfolge und zeitliche Abstände der weiteren Maßnahmen können stark von den finanziellen Möglichkeiten der Kommune geprägt werden. Eine technoökonomische Bewertung des für die Klimaneutralität des Gebäudes notwendigen Maßnahmenbündels kann somit unter Berücksichtigung finanzieller Hemmnisse und technischer/baulicher Notwendigkeiten in Form eines Szenariovergleichs einen möglichst effizienten Transformationspfad für kommunale Nichtwohngebäude hin zur Klimaneutralität aufzeigen.

Förderhinweis:

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Projekts „Klima-RT-Lab“, gefördert vom Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst (MWK) des Landes Baden-Württemberg, entstanden.

8 Referenzen

- [1] BMWK, BMWStB, *Gebäudeenergiegesetz GEG*, 20.07.2023, verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/>
- [2] Land Baden-Württemberg, *Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg KlimaG BW*, 01.02.2023, verfügbar unter: https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP17/Drucksachen/4000/17_4015_D.pdf
- [3] Deutsche Energie-Agentur (dena), „DENA-GEBÄUDEREPORT 2023. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand“, Berlin, 2022, verfügbar unter: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-gebaeudereport-2023/>
- [4] Deutsche Energie-Agentur (dena), „dena-Analyse: Kommunale Nichtwohngebäude: Rahmenbedingungen und Ausblick für klimafreundliche Gebäude in Städten und Gemeinden“, Berlin, 2018, verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9277_dena-Analyse_Kommunale_Nichtwohngebaeude.pdf
- [5] J. Richarz, S. Henn, T. Osterhage und D. Müller, „Optimal scheduling of modernization measures for typical non-residential buildings“, *Energy*, vol. 238, 2021, DOI: 10.1016/j.energy.2021.121871.
- [6] Institut Wohnen und Umwelt (IWU), *Nichtwohngebaeude-Typologie-Deutschland (Github)*, 2022, verfügbar unter: <https://github.com/IWUGERMANY/Nichtwohngebaeude-Typologie-Deutschland>
- [7] DIN V 18599-2: "Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen", Deutsches Institut für Normung e.V., Sep. 2018.
- [8] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU), and Groupement Européen des entreprises et Organismes de Distribution d'Énergie (GEODE), „BDEW/VKU/GEODE-Leitfaden: Abwicklung von Standardlastprofilen Gas“, Berlin, 2016, verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/Leitfaden_20160630_Abwicklung-Standardlastprofile-Gas.pdf
- [9] C. Jedek, M. Hörner und B. Stein, „Kosten für Modernisierungsmaßnahmen von zehn Nichtwohngebäuden“, Darmstadt, 2015. zuletzt geprüft: Sep. 19 2023, verfügbar unter: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/typo_nwg/2015_IWU_JedekEtAl_Kosten-f%C3%BCr-Modernisierungsmassnahmen-von-zehn-Nichtwohngeb%C3%A4uden.pdf
- [10] Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg (KEA BW), „Technikkatalog zur kommunalen Wärmeplanung v1.1“, Karlsruhe, 2023. zuletzt geprüft: Jan. 15 2024, verfügbar unter: <https://www.kea-bw.de/waermewende/wissensportal/technikkatalog?mdrv=www.kea-bw.de&cHash=9c267447407a5387bfa9d570a970771e>

- [11] Y. Louvet, S. Fischer, S. Furbo, F. Giovannetti und F. Mauthner, „Entwicklung eines Verfahrens für die Wirtschaftlichkeitsberechnung solarthermischer Anlagen: Die LCOH-Methode" in *27th Symposium Thermische Solarenergie*, Bad Staffelstein. zuletzt geprüft: Jan. 19 2024, verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/318948195_Entwicklung_eines_Verfahrens_fur_die_Wirtschaftlichkeitsberechnung_solarthermischer_Anlagen_die_LCOH_Methode
- [12] U. Filippi Oberegger, R. Perneti und R. Lollini, „Bottom-up building stock retrofit based on levelized cost of saved energy", *Energy and Buildings*, vol. 210, p. 109757, 2020, DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109757.
- [13] BBSR, „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)", 2017. zuletzt geprüft: Nov. 11 2022, verfügbar unter: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf
- [14] B. Stein and M. Hörner, *Typologie-gestützte Kennwerte für die energetische Bewertung bestehender Nichtwohngebäude Am Beispiel von 10 Gerichts-, Verwaltungs- und Polizeidienstgebäuden*. Endbericht, 1st ed. Darmstadt, 2015. zuletzt geprüft: Jan. 21 2024, verfügbar unter: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/typo_nwg/2015_IWU_SteinEtAl_Typologie-gest%C3%BCtzte-Kennwerte-f%C3%BCr-die-energetische-Bewertung-bestehender-Nichtwohngeb%C3%A4ude.pdf
- [15] VDI 2067-1: "Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen" *Grundlagen und Kostenberechnung*, Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI), Sep. 2012.
- [16] B. Burger, „Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2022", Freiburg, 2023. zuletzt geprüft: Jan. 24 2024, verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2023/Stromerzeugung_2022.pdf
- [17] T. Lauf, M. Memmler und S. Schneider, „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger: Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2021", Dessau-Roßlau, 2022. zuletzt geprüft: Jan. 24 2024, verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-12-09_climate-change_50-2022_emissionsbilanz_erneuerbarer_energien_2021_bf.pdf
- [18] M. Pehnt *et al.*, „Heizen mit 65 % erneuerbaren Energien - Begleitende Analysen zur Ausgestaltung der Regelung aus dem Koalitionsvertrag 2021", 2023. zuletzt geprüft: Jan. 17 2024, verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/heizen-mit-65-prozent-erneuerbaren-energien.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- [19] Umweltbundesamt, „Projektionsbericht 2023 für Deutschland: Gemäß Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie §10 (2) des Bundes-Klimaschutzgesetzes", Dessau-Roßlau, 2023. zuletzt geprüft: Jan. 17 2024, verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/39_2023_cc_projektionsbericht_2023.pdf