

Partner:



LANDES-
HAUPTSTADT
STUTTART



Universität Stuttgart



überlingen



Projektgruppe
Wirtschaftsinformatik



energieagentur
Ravensburg



Assoziierte Partner:



Deliverable D3.3.1/ D3.3.2

Wirtschaftlichkeitsbericht zu dem Energiekonzept Stuttgart und Überlingen

Erstellt im Verbundvorhaben STADTQUARTIER 2050
im Rahmen der Förderinitiative „Solares Bauen/
Energieeffiziente Stadt“ aus dem
6. Energieforschungsprogramm

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Autoren: Fraunhofer FIT

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Augsburg, 09.07.2021; **Version 1.1**

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1	Einführung	3
2	Vergleich verschiedener Methoden zur Wirtschaftlichkeitsbewertung	4
2.1	Methoden zur wirtschaftlichen Bewertung von Energieeffizienz	4
2.1.1	Amortisationsdauer	4
2.1.2	Kapitalwertmethode	5
2.2	Methoden zur wirtschaftlichen Bewertung von Energieflexibilität	6
2.2.1	Real-Options Ansatz	6
3	Vorgehen zur Wirtschaftlichkeitsbewertung	8
3.1	Bewertungsmethodik unter Berücksichtigung unterschiedlicher Perspektiven	8
3.2	Ökonomische Prognosen	9
3.2.1	Energiepreise: Datengrundlage	9
3.2.2	Energiepreise: Prognosemethodik	10
3.2.3	Inflation	11
3.3	Risikobewertung	12
3.3.1	Risikokennzahlen	12
3.3.2	Monte Carlo Simulation	13
4	Wirtschaftlichkeitsbericht	16
4.1	Datengrundlage allgemein	16
4.2	Wirtschaftlichkeitsbericht Stuttgart	17
4.2.1	Datengrundlage Kosten und Energieversorgung	17
4.2.2	Ergebnisse	18
4.2.1	Sensitivitätsanalysen	24
4.3	Wirtschaftlichkeitsbericht Überlingen	27
4.3.1	Datengrundlage Kosten und Energieversorgung	27
4.3.2	Ergebnisse	28
4.3.3	Sensitivitätsanalysen	32
5	Mögliche Schlussfolgerungen für klimaneutrale Stadtquartiere	34
6	Literatur	36

1 Einführung

Seit März 2018 fördern die Bundesministerien für Bildung und Forschung sowie Wirtschaft und Energie das Projekt „STADTQUARTIER 2050 - Herausforderungen gemeinsam lösen: Beispielgebende Sanierung und Nachverdichtung von Stadtquartieren zu klimaneutralen Wohnsiedlungen mit Leuchtturmanwendungen in Stuttgart und Überlingen“. Das Projektkonsortium besteht auf der Seite der Wissenschaft aus zwei Instituten der Fraunhofer Gesellschaft, der Universität Stuttgart, dem Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien GmbH sowie dem Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München, auf der Seite der Kommunen aus der Landeshauptstadt Stuttgart sowie der Stadt Überlingen und auf der Seite der Wirtschaft aus der Baugenossenschaft Überlingen eG, der Energiedienste der Landeshauptstadt Stuttgart GmbH, der Stadtwerk am See GmbH & Co. KG, der Energieagentur Ravensburg gGmbH, sowie der puren GmbH.

In Deutschland ist trotz starker Industrie der Immobiliensektor für über ein Drittel des Endenergieverbrauchs und der CO₂-Emissionen verantwortlich, davon ca. 75% allein für Raumwärme (Umweltbundesamt 2020). Die bisher primär auf private Einzelobjekte zielenden Maßnahmen reichen bei weitem noch nicht aus, um die international gegebenen Reduktionszusagen im Immobiliensektor bis 2030 erfüllen zu können. Hierfür wären von 2019 bis 2030 jährliche CO₂-Reduktionen von 4,68% erforderlich, weit mehr als in allen anderen Sektoren (European Environment Agency 2015; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V 2017). Daher ist in diesem Sektor eine drastische Reduktion der Treibhausgasemissionen von zentraler Bedeutung. Da sich viele Reduktionen in privaten Einzelobjekten trotz der Anreize nicht rechnen bzw. bei einigen Eigentümern auf Umsetzungshemmnisse stoßen, kommt allen Arten von Quartieren eine erhebliche Bedeutung zu. Dies gilt sowohl für den Gebäudebestand als auch für Neubauten. Dabei muss auf eine konsequente hohe bauliche Energieeffizienz und zudem auf eine emissionsarme Energieversorgung gesetzt werden.

Im Rahmen dieses Projektes wird im Arbeitspaket 3.3 eine Wirtschaftlichkeitsbewertung klimaneutraler Quartiere durchgeführt. Ziel hiervon ist zusätzlichen Anforderungen und Kosten in Zusammenhang mit klimaneutralem Wohnen in Quartieren monetär zu bewerten. Einem höheren Energie- und Emissionsstandard stehen höhere Anfangsinvestitionen gegenüber. Als Folge daraus entstehen durch höhere Effizienz über die Nutzungsdauer hinweg geringere Energiekosten. Dieser Trade Off ist die Basis für die wirtschaftliche Bewertung klimaneutraler Wohnquartiere. Die wirtschaftliche Bewertung besteht aus State-of-the-Art Methoden des Finanz- und Risikomanagements. In diesem Zusammenhang wird zusätzlich aus der Perspektive unterschiedlicher Stakeholder (Investierende, Mietende) und einer Quartierssicht bewertet.

2 Vergleich verschiedener Methoden zur Wirtschaftlichkeitsbewertung

2.1 Methoden zur wirtschaftlichen Bewertung von Energieeffizienz

Grundsätzlich ergibt sich die Wirtschaftlichkeit von klimaneutralen Quartieren aus einer höheren Energieeffizienz, welche geringere Kosten für die Energieversorgung zur Folge hat.

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit der beiden Quartiere stehen verschiedene Methoden zur Auswahl. In diesem Kapitel werden die prominentesten Verfahren vorgestellt und verglichen, um darauf aufbauend eines der Verfahren zu wählen. Allgemein ist die Grundlage der Berechnung der Wirtschaftlichkeit die Gegenüberstellung von Investitionen in Klimaneutralität und Rückflüsse dieser Investitionen, durch geringere Kosten für Energie.

Um die Wirtschaftlichkeit von Klimaneutralität allgemein berechnen zu können, wird in dieser Arbeit das Delta zwischen einem klimaneutralen Energiekonzept und einem „Standard“ Energiekonzept betrachtet. Dieser Unterschied zwischen einer *klimaneutralen Variante* und einer *Basisvariante* ist die Grundlage aller folgenden Bewertungen.

2.1.1 Amortisationsdauer

In der Berechnung der Amortisationsdauer ist das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbewertung der Zeitraum, den es dauert, bis sich die getätigte Investition lohnt. Formal kann diese wie folgt ausgedrückt werden:

$$\text{Amortisationsdauer} = \frac{I}{EK_t^{KN} - EK_t^B}$$

I	EK_t^{KN}	EK_t^B
Mehrinvestition für Klimaneutralität	Durchschnittliche Energiekosten der klimaneutralen Variante pro Zeiteinheit	Durchschnittliche Energiekosten der Basisvariante pro Zeiteinheit

Die Amortisationsdauer hat den Vorteil, dass sie intuitiv sehr verständlich und somit einfach zu kommunizieren ist. Außerdem bräuchte es mit Bezug auf die beiden Quartiere für die Berechnung der Amortisationsdauer keine Annahme zum betrachteten Zeitraum.

Nachteile der Berechnung der Amortisationsdauer liegen in den durchschnittlichen jährlichen Rückflüssen. Ein Grundsatz im Finanzmanagement liegt im sogenannten „Zeitwert des Geldes“. 1.000 €, die ich heute besitze, sind mehr wert als 1.000 €, die ich erst morgen besitze, da ich zwischen heute und morgen Zinserträge hätte erzielen können. Diesen Zeitwert in die Berechnung der durchschnittlichen jährlichen Rückflüsse miteinzubeziehen

ist nur sehr schwer möglich. Eine zweite Herausforderung bei der Bestimmung der durchschnittlichen jährlichen Rückflüsse sind schwankende Energiepreise. Ganz speziell im Zusammenhang mit diesem Projekt gibt es noch einen weiteren Nachteil der Berechnung der Amortisationsdauer. In der folgenden Arbeit wird die Wirtschaftlichkeit aus verschiedenen Perspektiven bewertet. Die Wirtschaftlichkeit des Mietenden hängt allerdings nicht von Investitionskosten, sondern von Mietausgaben und Energieeinsparungen ab. Auf Grund dessen wäre die Methode der Amortisationsdauer auf den Mietenden nicht übertragbar und die Ergebnisse der einzelnen Perspektiven nur schwer vergleichbar.

2.1.2 Kapitalwertmethode

Die Kapitalwertmethode berechnet die Wirtschaftlichkeit einer Investition über einen bestimmten Zeitraum. Hierbei wird der Zeitwert des Geldes durch einen entsprechenden Diskontierungsfaktor berücksichtigt (siehe Formel). Im Rahmen der Kapitalwertmethode werden alle zukünftigen Rückflüsse einer Investition und alle Investitionskosten über den Betrachtungszeitraum hinweg zusammengerechnet und verglichen. Der Kapitalwert einer Investition stellt dadurch den Geldbetrag dar, den die Investition heute wert ist. Formal wird der Kapitalwert im Kontext dieses Projekts wie folgt berechnet:

$$\text{Kapitalwert} = \sum_{t=1}^T \frac{-I_t - EK_t^{KN} + EK_t^B}{(1+i)^t}$$

I_t	EK_t^{KN}	EK_t^B	i	t
Mehrinvestition für Klimaneutralität in Periode t	Energiekosten der klimaneutralen Variante pro Zeiteinheit	Energiekosten der Basisvariante pro Zeiteinheit	Kalkulationszins	Zeitintervall

Im Rahmen der Kapitalwertmethode wird häufig auch die Annuität einer Investition angegeben. Diese kann mit Hilfe des Kapitalwertes einfach über den Kalkulationszins (in Form des Annuitätenfaktors) berechnet werden. Die Annuität teilt den Kapitalwert einfach gesprochen über den Betrachtungszeitraum hinweg gleichmäßig auf die verschiedenen Perioden auf und gibt den Zahlungsstrom an, der aus der Investition regelmäßig gezogen werden kann.

Der Vorteil der Kapitalwertmethode liegt in der Berücksichtigung des Zeitwertes des Geldes sowie unterschiedlicher Kosten zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Außerdem ist es für den Kapitalwert, im Gegensatz zur Amortisationsdauer, nicht entscheidend dass die Kosten nur in der ersten Periode des Betrachtungszeitraums anfallen. Auch in seiner Interpretierbarkeit ist der Kapitalwert intuitiv verständlich, so bedeutet ein positiver Kapitalwert, dass

sich die entsprechende Investition lohnt und ein negativer Wert, dass der/die Investierende diese nicht tätigen sollte.

Ein Nachteil der Kapitalwertmethode gegenüber der Berechnung der Amortisationsdauer liegt in der Annahme bezüglich des Betrachtungszeitraums. Besonders im Zusammenhang dieses Projekt spielt der Betrachtungszeitraum eine entscheidende Rolle.

2.2 Methoden zur wirtschaftlichen Bewertung von Energieflexibilität

In klimaneutralen Wohnquartieren resultiert nicht nur Energieeffizienz in wirtschaftlichen Vorteilen, sondern unter bestimmten Voraussetzungen kann sich auch ein flexibler Energieverbrauch wirtschaftlich lohnen. Grundlage hierfür sind flexible Energiepreise, die ein Verschieben von Lasten aus Zeiten mit hohen Energiekosten in Zeiten mit geringen Energiekosten attraktiv gestalten.

2.2.1 Real-Options Ansatz

Die Auswahl an Methoden zur Bewertung von Energieflexibilität in Wissenschaft und Praxis sind begrenzt. Der Grund hierfür ist, dass flexible Energiepreise im privaten Wohnbereich in Deutschland noch unüblich sind. Nichtsdestotrotz wird im Folgenden ein theoretischer Ansatz zur allgemeinen wirtschaftlichen Bewertung von Energieflexibilität genauer vorgestellt: der Real-Options Ansatz. Der Ansatz folgt der Arbeit von (Fridgen et al. 2016).

Grundsätzlich basiert der Real-Options Ansatz darauf, Energieflexibilität als eine Put-Option zu sehen. Put-Optionen sind eine bestimmte Art finanzieller Termingeschäfte. Sie garantieren dem Käufer der Option das Recht, in Zukunft ein bestimmtes Asset zu einem bestimmten Preis zu verkaufen. Diese Verkaufsoption muss allerdings nicht wahrgenommen werden. Der zuvor bestimmte Preis wird als „Strike“ oder auch Ausübungspreis bezeichnet. Der Wert der Option besteht somit im Unterschied zwischen diesem Ausübungspreis und dem tatsächlichen Preis des Assets (auch Underlying genannt). Ist der tatsächliche Preis des Assets niedriger als der Ausübungspreis, so wird die Option ausgeübt und der Wert der Option entspricht $K - P_t$, mit K als Strike und P_t als Preis zum vereinbarten Zeitpunkt t . Ist der Preis höher als der Strike, so wird die Option nicht ausgeübt und der Wert der Option entspricht 0. Zusammengefasst lässt sich der Wert einer Put-Option somit wie folgt darstellen:

$$\text{Wert (Put Option}_t) = \max\{K - P_t; 0\}$$

Dieses Konzept wird nun auf Energie und ganz besonders Energieflexibilität übertragen. Hierzu wird angenommen, dass in einem Zeitraum von $T - M$ bis T flexibel Energie bezogen werden kann und somit zum Zeitpunkt $T + 1$ spätestens Energie vom Wohnquartier gebraucht wird. Zudem wird für das

Modell angenommen, dass während dieser flexiblen Periode genau einmal Energie vom Wohnquartier gebraucht wird. Der Strike Preis wird definiert durch:

$$K = E[P_{T+1}].$$

$E[P_{T+1}]$ ist der erwartete Energiepreis in der Periode, in der spätestens wieder Energie vom Quartier gebraucht wird. Wird nun beispielhaft $M = 0$ angenommen, also genau eine Periode, in der flexibel Strom verbraucht werden kann, so ist der Wert der Flexibilität EF_T :

$$EF_T = \max\{E[P_{T+1}] - P_T; 0\}$$

Ist der Preis in Periode T geringer als der erwartete Preis in $T + 1$ so hatte die Flexibilität den Wert $E[P_{T+1}] - P_T$. Ist der Preis höher, so wird die Option nicht ausgeübt und der Wert der Flexibilität entspricht null.

Für alle Werte von Energieflexibilität mit $M > 0$ wird der Wert rekursiv berechnet, über:

$$EF_{T-M} = \max\{E[P_{T+1}] - P_{T-M}; EF_{T-M+1}\}$$

Diese Formel ist die Basis für die wirtschaftliche Bewertung von Energieflexibilität. Um diese auf Wohnquartiere übertragen zu können, muss der Energiebedarf der einzelnen Verbraucher im Wohnquartier zunächst in Verbräuche mit Flexibilität und Verbräuche ohne Flexibilität unterteilt werden. So könnten beispielsweise Heizenergiebedarfe als flexible Lasten gelten. Außerdem kann der Stromverbrauch von Haushaltsgeräten wie Spülmaschinen oder Waschmaschinen als flexibel verschiebbar eingestuft werden. Zudem ist auch die Wärmeversorgung unter Berücksichtigung von Wärmepumpen, ein flexibler Energieverbraucher, da durch die thermische Trägheit der Gebäude das Heizen teilweise auf spätere Zeitpunkte verschoben werden kann. Unflexible Verbräuche sind beispielsweise Licht oder Küchengeräte. Ist diese Einteilung vorgenommen, wird zu jedem der Verbräuche ein Zeitfenster bestimmt, in dem der Verbrauch flexibel verschoben werden kann. Zu jedem dieser Zeitfenster kann so mit der Formel oben und einer entsprechenden Wahrscheinlichkeitsfunktion für P_t der Wert der Energieflexibilität im Wohnquartier berechnet werden.

Wie jedoch bereits in der Einleitung dieses Kapitels beschrieben, braucht es für die ökonomische Nutzung von Energieflexibilität zum einen flexible Strompreise und zum anderen eine smarte Steuerung der entsprechenden Verbraucher. Eine smarte Steuerung ließe sich bei den Quartieren nachträglich installieren, es wird jedoch keinen flexiblen Strompreis in den beiden Quartieren geben, wodurch die Energieflexibilität nicht mit in die ökonomische Bewertung einbezogen wird.

3 Vorgehen zur Wirtschaftlichkeitsbewertung

3.1 Bewertungsmethodik unter Berücksichtigung unterschiedlicher Perspektiven

Die Grundlage für diese Wirtschaftlichkeitsbewertung bildet die Kapitalwertmethode als dynamisches Investitionsbewertungsverfahren, um Wertunterschiede zwischen verschiedenen Zeitpunkten zu berücksichtigen. Die Entscheidung den Kapitalwert als Bewertungsmethodik zu verwenden, wurde auf Grund der Tatsache getroffen, dass mit Hilfe des Kapitalwerts eine Bewertung aus verschiedenen Perspektiven vorgenommen werden kann. Dies wäre unter Verwendung der Amortisationsdauer nicht möglich gewesen, da die Amortisationsdauer die Annahme zu Grunde legt, dass Investitionskosten zu Beginn des Betrachtungszeitraums anfallen und durch spätere Einzahlungen kompensiert werden. Bei der Perspektive eines Mietenden ist dies, wie wir später noch zeigen werden, allerdings nicht der Fall. So ließe sich die Perspektive des Mietenden unter Verwendung der Amortisationsdauer nicht miteinbeziehen. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass der Kapitalwert mit Hilfe stochastischer Methoden einfach als Zufallsvariable modelliert werden kann. So ist es in einem späteren Schritt möglich, Unsicherheiten in der Energiepreisentwicklung für die Auswertungen zu berücksichtigen.

Dieses Kapitel dient dazu, das grundsätzliche Konzept der Kapitalwertmethode auf die Bewertung klimaneutraler Quartiere zu übertragen und wichtige Annahmen in diesem Zusammenhang vorzustellen. Außerdem wird im Folgenden erläutert, wie die Wirtschaftlichkeit mit Hilfe verschiedener Perspektiven bewertet werden kann.

Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Klimaneutralität in den Quartieren wird auf Basis der Differenz zwischen der klimaneutralen Variante und der Basisvariante bestimmt. Bei der Basisvariante handelt es sich um ein Energiekonzept, welches nicht klimaneutral ist, sondern einem energetischen Standard vergleichbarer Neubauten gleicht. Das bedeutet, dass die Emissionen der Energieformen Wärme und Strom in Summe nicht neutralisiert werden können und verursachte Emissionen nicht kompensiert werden. Die Wirtschaftlichkeit wird aus der Sicht dreier unterschiedlicher Perspektiven bewertet: Quartierssicht, Investierendensicht sowie Mietendensicht.

Bei der Quartierssicht werden, unabhängig von Investierenden und Mietenden, die Energiekosteneinsparungen zwischen Basisvariante und klimaneutralem Quartier den Mehrkosten der Investition gegenübergestellt.

$$Kap^{Quartier} = -I_{t=0}^{KN} + I_{t=0}^B + \sum_{t=1}^T \frac{-EK_t^{KN} + EK_t^B}{(1+i)^t}$$

$Kap^{Quartier}$: Kapitalwert Quartiers- sicht	$I_{t=0}^{KN}$: Investitionen der klima- neutralen Variante	$I_{t=0}^B$: Investitio- nen der Basisvari- ante	EK^{KN} : Energiekos- ten klima- neutral	EK^B : Energiekos- ten Basisva- riante	i : Kalkulations- zins	t : Zeitinter- vall
--	--	---	---	---	--------------------------------	-----------------------------

Die investierendenseitige Wirtschaftlichkeitsbewertung für die Klimaneutralität der einzelnen Quartiere berücksichtigt die zu Beginn zusätzlich anfallenden Investitionskosten, sowie die daraus folgenden Einzahlungen durch die erhöhten Mieten gegenüber durchschnittlichen Referenzmieten. Diese Betrachtung unterliegt der Annahme, dass der Investierende die Wohnungen entsprechend vermietet. Als Folge daraus profitiert der Investierende selbst nicht von den eingesparten Energiebedarfen.

$$Kap^{Investor} = I_{t=0}^{KN} + I_{t=0}^B + \sum_{t=1}^T \frac{\Delta M}{(1+i)^t}$$

$Kap^{Investor}$: Kapitalwert Investierender	$I_{t=0}^{KN}$: Investitionen der klimaneu- tralen Variante	$I_{t=0}^B$: Investitionen der Basisvari- ante	ΔM Unterschied Miete Klima- neutral und Basis	i : Kalkulationszins	t : Zeitintervall
---	---	--	---	---------------------------	------------------------

Dem gegenüber steht die Perspektive der Mietenden, welche von der erhöhten Energieeffizienz durch verringerte Energiebedarfe profitieren, sich jedoch Preisunsicherheiten ausgesetzt sehen und eine höhere Miete zahlen müssen.

$$Kap^{Mietende} = \sum_{t=1}^{10} \frac{-\Delta M - EK^{KN} + EK^B}{(1+i)^t}$$

$Kap^{Mietende}$: Kapitalwert Mietende	ΔM Unterschied Miete Klimaneutral und Basis	EK^{KN} : Energiekosten klimaneutral	EK^B : Energiekosten Basisvariante	i : Kalkulationszins	t : Zeitintervall
---	--	--	--	---------------------------	------------------------

3.2 Ökonomische Prognosen

3.2.1 Energiepreise: Datengrundlage

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit des klimaneutralen Quartiers sind verschiedene Inputdaten relevant. Neben den Investitionskosten und Energiebedarfen, die bereits im Zusammenhang mit dem Energiekonzept bestimmt wurden, fehlen hierbei noch die zukünftigen Energiepreise.

Verbraucherpreise der Energieträger Strom, Gas und Fernwärme wurden der Website des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie entnommen (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020). Der Preisverlauf in den vergangenen Jahren der Einspeisevergütung für PV ist einer Studie zur aktuellen Situation von Photovoltaik in Deutschland entnommen (Fraunhofer ISE 2020). Die Einspeisevergütung für KWK basiert auf den Strompreisen für Erzeugung, die auch den Daten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie entnommen sind (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020).

Um eine Prognose der Energiepreisentwicklung für die Zukunft vornehmen zu können, werden im Rahmen der Energiepreisprognose die Vergangenheitspreise der unterschiedlichen Energieträger betrachtet. Folgender Tabelle kann die Entwicklung dieser Preise exemplarisch entnommen werden.

	2016	2017	2018	2019
Strom	29,33	29,82	30,19	31,24
Erdgas	6,86	6,64	6,53	6,79
Fernwärme	8,50	8,23	8,38	8,76
Einspeisevergütung PV	9,00	9,00	9,00	8,00
Einspeisevergütung KWK	2,90	3,41	4,44	3,77

Tabelle 1: Reale (inflationsbereinigte) Energiepreise der Jahre 2016 - 2019 in ct/kwh

In Tabelle 1 sind aus Gründen der Darstellung lediglich die Jahre 2016 bis 2019 abgebildet. Für die Prognosen, die im nächsten Kapitel beschreiben werden, wurden jedoch Daten der Jahre 2006 bis 2019 verwendet.

3.2.2 Energiepreise: Prognosemethodik

Wie bereits Tabelle 1 zeigt, unterliegen Energiepreise Schwankungen. Um das darin steckende Risiko für die Wirtschaftlichkeit abbilden zu können, werden verschiedene Preisszenarien für die Zukunft prognostiziert. Als Grundlage hierfür dienen die Preise der vergangenen Jahre.

Als Prognosemodell für Energiepreise wird der stochastische Prozess einer geometrischen brown'schen Bewegung gewählt, da dieser in der Wissenschaft weit verbreitet ist (Häckel et al. 2017). Diese Art des stochastischen Prozesses eignet sich besonders gut für Energiepreise, da hier die Varianz mit der Anzahl der prognostizierten Zeitintervalle zunimmt.

$$\delta p_t = g \cdot p_t \cdot dt + s \cdot p_t \cdot dz$$

Dabei entspricht dz dem Inkrement eines Wiener Prozesses, der die Entwicklung einer standardisierten normalverteilten Variablen mit 0 als Erwartungswert und Einheitsvarianz beschreibt. p_t ist der Energiepreis zum Zeit-

punkt t . Für geometrische brown'sche Bewegungen gibt es zwei Parameter, die die Entwicklung des Preisprozesses definieren: einen langfristigen Trend g , d.h. die durchschnittliche Wachstumsrate zwischen zwei Zeitschritten $t - 1$ und t und s , was die Volatilität dieser Wachstumsrate darstellt. Im Kontext dieser Arbeit beschreibt g die durchschnittliche Wachstumsrate der vergangenen 14 Jahre (da die Energiepreise der vergangenen 14 Jahre betrachtet werden) und s die durchschnittliche Abweichung von dieser Wachstumsrate der vergangenen Jahre.

Folgende Abbildung zeigt beispielhaft einen prognostizierten Verlauf für den Verbraucherpreis von Fernwärme, sowie den Verlauf des Fernwärmepreises bisher.

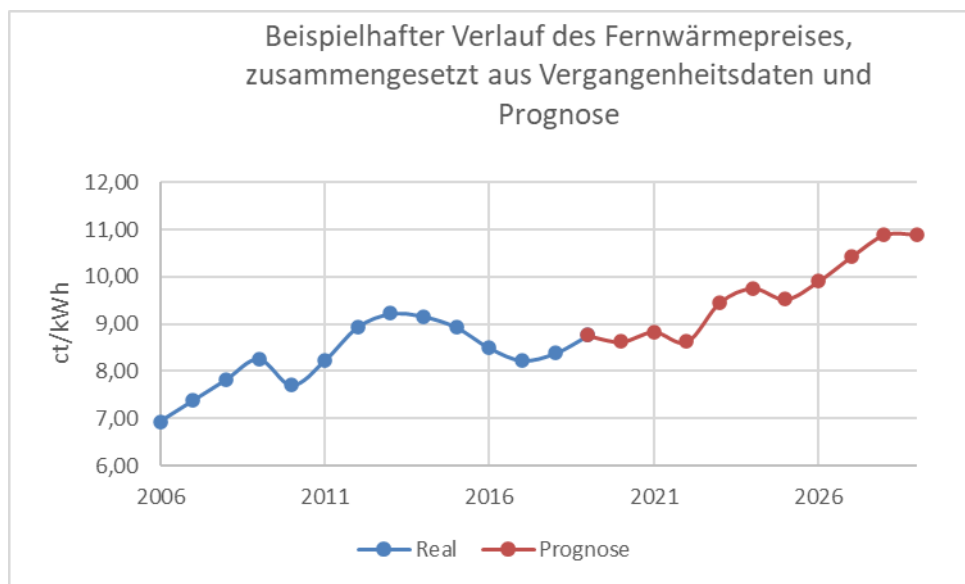


Abbildung 1: Beispielhafter Verlauf des Fernwärmepreises zusammengesetzt aus Vergangenheitsdaten und Prognose

3.2.3 Inflation

Neben den zukünftigen Energiepreisen wird auch die Inflationsentwicklung in Zukunft abgeschätzt. Diese Inflation wird darauf sowohl in die verschiedenen laufenden Kosten der verschiedenen Maßnahmen als auch in die Energiepreise miteinbezogen.

Die Prognose der Inflation basiert, im Gegensatz zu den Energiepreisen, nicht auf Vergangenheitswerten, sondern auf dem Inflationsziel der Europäischen Zentralbank mittelfristig eine Inflation von knapp unter 2% anzustreben (Europäische Zentralbank 2021). Zur Modellierung einer Zeitreihe, die sich um einen bestimmten Wert entwickelt, eignet sich ein sogenannter Ornstein-Uhlenbeck-Prozess (Uhlenbeck and Ornstein 1930). Dieser kann formal wie folgt ausgedrückt werden:

$$\delta p_t = \theta(\mu - p_t) \cdot dt + s \cdot dz$$

Dabei entspricht dz wieder dem Inkrement eines Wiener Prozesses. p_t ist der Energiepreis zum Zeitpunkt t . Für einen Ornstein-Uhlenbeck-Prozess gibt es drei Parameter, die die Entwicklung des Preisprozesses definieren: θ ist der Drift des Prozesses bzw. beschreibt er die Anziehungskraft des Niveaus μ . Dieses Niveau entspricht in diesem Wirtschaftlichkeitsbericht dem mittelfristigen Ziel der Europäischen Zentralbank. Wie auch bei der brown'schen Bewegung ist s ein Faktor, der die Volatilität des Prozesses bestimmt.

3.3 Risikobewertung

In der Literatur zur Risikobewertung von Energieeffizienzprojekten ist der Status quo die Berechnung von Risikokennzahlen auf Basis einer Monte Carlo Simulation (Ahrlichs et al. 2020; Jackson 2010; Häckel et al. 2017). In der Literatur werden auch noch weitere Ansätze, wie der einer Bewertung mit Hilfe von Real-Optionen, vorgestellt (Menassa 2011). Diese sind aber Exoten in der Wissenschaft, weshalb auch diese Bewertung auf Basis von Risikokennzahlen und einer Monte Carlo Simulation erstellt wird.

3.3.1 Risikokennzahlen

Grundsätzlich kann Risiko in zwei verschiedenen Typen von Kennzahlen gemessen werden:

Risikomaße vom Typ I sind lageunabhängig, d.h. die Höhe der Zielgröße hat keinen Einfluss auf das Risikomaß. Dabei muss die Zielgröße nicht notwendigerweise der Erwartungswert sein, sondern kann eine beliebige deterministische Zielgröße (z.B. ein Ziel-Endvermögen, eine Zielrendite) oder eine andere stochastische Benchmark sein. Hierbei werden zwei verschiedenen Arten unterschieden:

- **Zweiseitige Risikomaße:** Sie messen die Abweichung von einer Zielgröße in beide Richtungen. Beispiele sind die Varianz oder die Standardabweichung.
- **Shortfall-Risikomaße/Downside-Risikomaße:** Sie messen die negative Abweichung von einer Zielgröße, d.h. das Downside-Risiko. Beispiele sind der Lower Partial Moment, Shortfall-Wahrscheinlichkeiten oder auch die Semivarianz.

Risikomaße vom Typ II sind lageabhängig, d.h. die Höhe der Zielgröße hat Einfluss auf das Risikomaß. Beispiele sind hier der Value-at-Risk (VaR) oder Conditional-Value-at-Risk (CVaR). Risikomaße vom Typ II greifen oftmals auf Quantile zurück. Diese liefern einen differenzierten Einblick in die Wahrscheinlichkeitsverteilung und damit in die Chancen bzw. Risikostruktur. Das

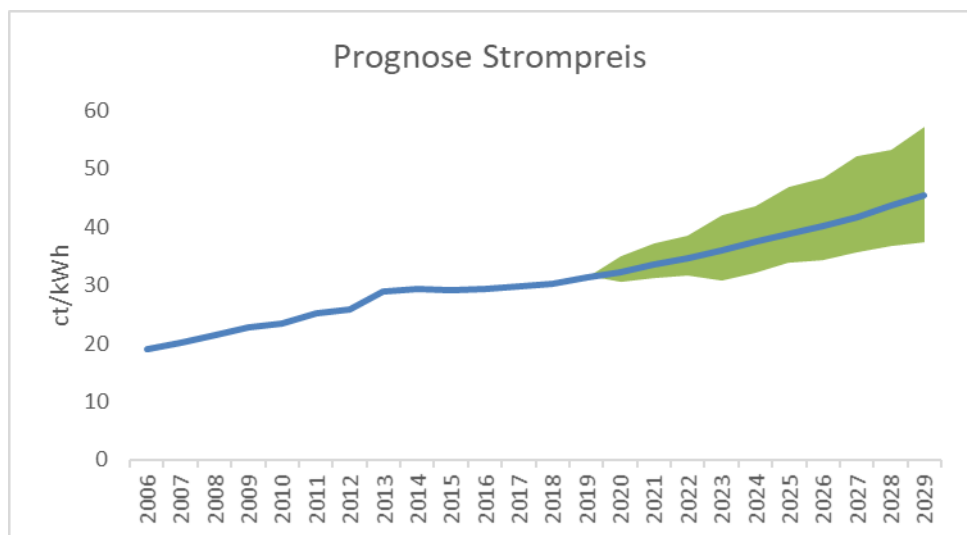
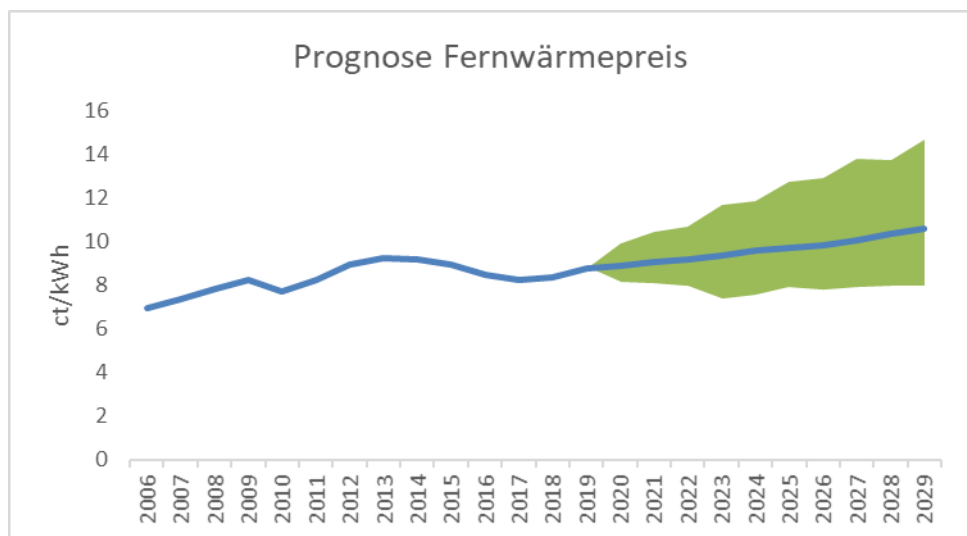
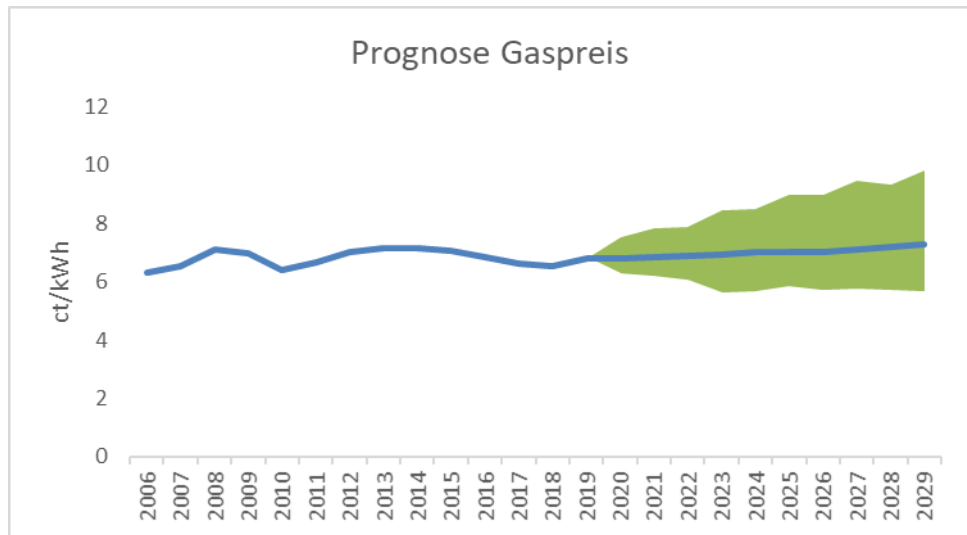
α -Quantil ist dabei diejenige Ausprägung der Zufallsvariable, die mit einer Wahrscheinlichkeit von höchstens $1-\alpha$ überschritten wird.

Für die Risikobewertung im Rahmen dieser Wirtschaftlichkeitsanalyse wird das Risiko mit Hilfe des Value-at-Risks angegeben. Der Vorteil bei diesem Risikomaß ist, dass es leicht zu kommunizieren ist und auch verständlich für Stakeholder, die nicht aus dem Bereich der Finanzmathematik kommen. Das Risiko wird so anhand eines Kapitalwerts angegeben, der in einem „Bad-Case Szenario“ eintritt. Dieses „Bad-Case Szenario“ bezieht sich auf das 5%-Quantil der Verteilung des Kapitalwerts. Es stellt somit den Kapitalwert dar, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% so hoch ist oder niedriger.

3.3.2 Monte Carlo Simulation

Für die Bestimmung des Value-at-Risks und somit des Risikos ist es nötig, die Verteilung des Kapitalwerts zu schätzen. Hierfür wird eine Monte Carlo Simulation verwendet.

Eine Monte Carlo Simulation ist ein Verfahren aus der Stochastik, bei dem ein Zufallsexperiment sehr häufig wiederholt wird, um die Verteilung einer Zufallsvariable zu schätzen. Die Zufallsvariable ist in diesem Fall der Kapitalwert. Mit vielen verschiedenen Energiepreisszenarien sowie Inflationsszenarien wird die Verteilung des Kapitalwerts geschätzt. Vereinfacht gesprochen werden die vorgestellten stochastischen Prozesse viele Male durchlaufen und so werden verschiedene Kapitalwerte eines Energiekonzepts berechnet. Aus der Kombination von 50 verschiedenen Energiepreisszenarien und 50 verschiedenen Inflationsszenarien ergeben sich 2500 verschiedene Kapitalwerte, mit denen eine Verteilung des Kapitalwerts zu einem bestimmten Energiekonzept berechnet werden kann. Um diesen Vorgang zu veranschaulichen sind in folgender Abbildung die Prognosen der Energiepreise und Inflation dargestellt. Ab dem Jahr 2019, gibt es hier nicht mehr nur einen Wert, sondern ein Korridor, in dem der Wert liegen kann.



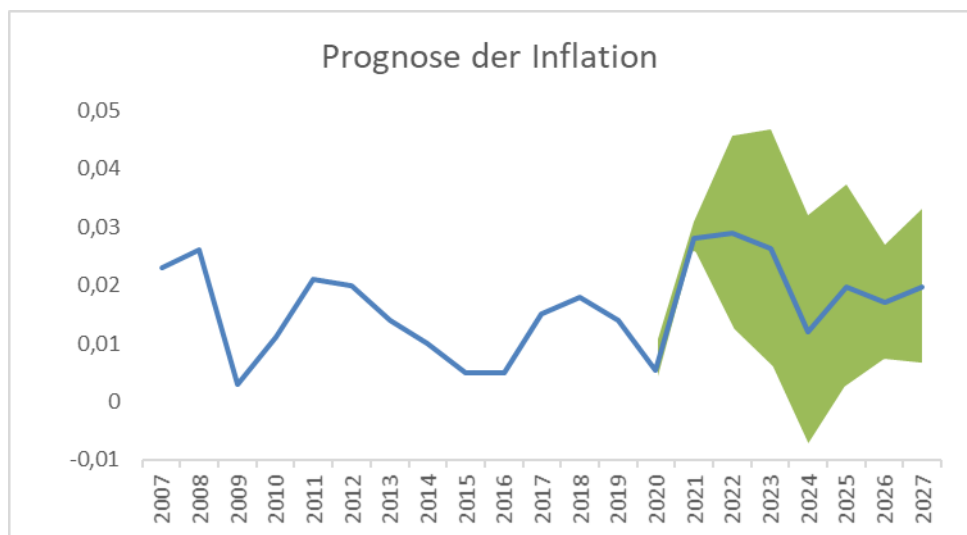
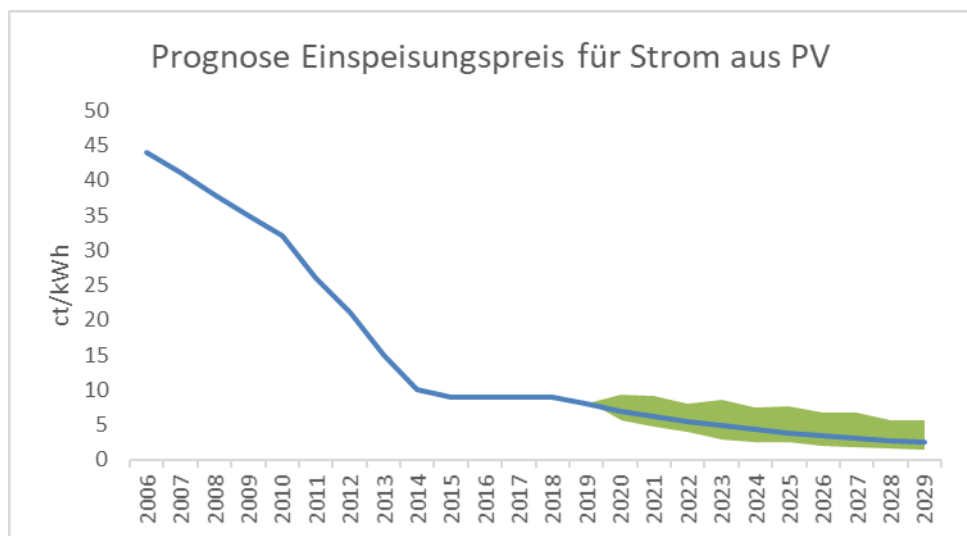
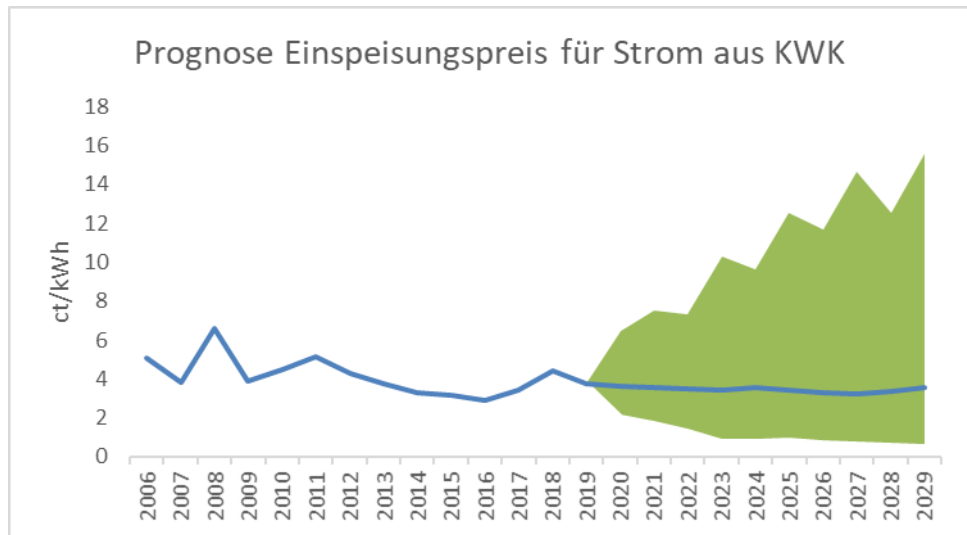


Abbildung 2: Prognosen der verschiedenen Preise der Energieträger, bzw. der Einspeisung

4 Wirtschaftlichkeitsbericht

Bevor die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbewertung im Detail vorgestellt werden, sei darauf hingewiesen, dass sich die beiden Quartiere wegen unterschiedlicher Rahmenbedingungen, unterschiedlicher Energiestandards in den Basisvarianten und allgemeiner demografischer Unterschiede nicht vergleichen lassen.

4.1 Datengrundlage allgemein

Daten zu Energiepreisen sind der Datenbank des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (2020) entnommen. Die Datenbank stellt zu verschiedenen Primärenergieträgern für Wärmeenergie Verbraucherwärmepreise im Bundesdurchschnitt zur Verfügung. Ebenso finden sich in dieser Datenbank durchschnittliche Verbraucherstrompreise wieder. Die Modellierung verschiedener Inflationsszenarien wurde auf Basis des Inflationsziels der EZB (Europäische Zentralbank 2021) durchgeführt.

Neben den Energiepreisen und Inflationsszenarien setzt die Kapitalwertmethode weitere Parameter voraus. Zentral hierbei ist die Wahl eines geeigneten Kalkulationszinssatzes, um den Zeitwert des Geldes abbilden zu können. In diesem Bericht wird der Zinssatz auf einen Wert zwischen 0% und 1% gesetzt und in einer späteren Sensitivitätsanalyse genauer untersucht. Der Wertebereich ist auf Basis von deutschen Staatsanleihen als risikofreie Investitionsalternative bestimmt worden (Bundesrepublik Deutschland Finanzagentur GmbH 2020). Außerdem setzt der Kapitalwert einen Betrachtungshorizont voraus. Der Betrachtungshorizont der verschiedenen Maßnahmen wird der VDI-Richtlinie 2067 entnommen. Zudem werden der Richtlinie verschiedene Kostensätze für Wartung, Inspektion und Instandsetzung entnommen. Die Richtlinie enthält zusätzliche Angaben zum durchschnittlichen Bedienungsaufwand der verschiedenen Maßnahmen. Da dieser bei den betrachteten Maßnahmen, mit maximal 6h im Jahr, sehr gering ist werden die hier entstehenden Kosten vereinfachend nicht berücksichtigt. Folgender Tabelle können die entsprechenden Werte entnommen werden.

	Lebensdauer (Jahre)	Wartungskostensatz/ Instandsetzung/ Inspektion (Prozent der Investitionskosten)
Wärmeschutz	50	0%
Lüftung	15	1%
Wasserbereitung	20	2%
Solarthermie	20	1,5%

Heizung	20	1%
Kühlung	15	6%
Beleuchtung und Ausstattung	20	0%
Gebäudeautomation	15	10%
Heizzentrale	20	3%
PV	20	1,5%

Tabelle 2: Parameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung zu Kosten und Lebensdauern der einzelnen Maßnahmen

4.2 Wirtschaftlichkeitsbericht Stuttgart

4.2.1 Datengrundlage Kosten und Energieversorgung

Das Wohnquartier in Stuttgart besteht aus einem sanierten Altbau und mehreren Neubauten. Das Quartier ist zum Zeitpunkt der Berechnung dieser Wirtschaftlichkeitsanalyse lediglich in Planung. Die unterschiedlichen Kosten der verschiedenen Varianten sowie Energieverbräuche der Basis und klimaneutralen Energieversorgung sind dem wissenschaftlichen Hintergrundbericht (M2.1.1) des IBPs entnommen. In diesem Hintergrundbericht werden verschiedene Varianten der klimaneutralen Energieversorgung beschrieben. Weiter Details und Hintergründe der Energiekonzepte sind im Dokument des IBP beschrieben. Folgender Tabelle können Rahmendaten der verschiedenen Konzepte entnommen werden.

	Energieversorgung	Gebäudestandard	Wärmebedarf	Strombedarf
Basisvariante	Wärmeversorgung über Fernwärme	Neubau: KfW 55 Sanierung Altbau: KfW 100	5942 MWh/a (Fernwärme)	2.671 MWh/a
	Variante 1	Kaltes Nahwärmenetz mit dezentralen Sole-Wasser-Wärmepumpen; Stromversorgung aus Netz; Einspeisung des PV Stroms	Neubau: KfW 40 Sanierung Altbau: KfW 70	2508 MWh/a (Erdwärme) 836 MWh/a (Strom)
Variante 2	Heizzentrale mit zentraler Sole-Wasser-Wärmepumpe; Stromversorgung aus Netz; Einspeisung des PV Stroms	Neubau: KfW 40 Sanierung Altbau: KfW 70	2524 MWh/a (Erdwärme) 1.010 MWh/a (Strom)	1917 MWh/a

Tabelle 3: Parameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung zu Energiekonzepten

Zusätzlich zu den Energiedaten ergeben sich Kosten der verschiedenen Varianten, diese können folgender Tabelle entnommen werden sowie Details zu den Kosten in M2.1.1 nachgelesen werden. In beiden Varianten der klimaneutralen Energieversorgung wird ein Teil der in der Stromversorgung freigesetzten CO₂-Emissionen kompensiert. Auch die Kosten für die Kompensation können folgender Tabelle entnommen werden und basieren auf den Angaben von Atmosfair (Atmosfair 2021).

	Basisvariante	Mehrkosten Variante 1	Mehrkosten Variante 2
Wärmeschutz	20.840.468 €	2.859.594 €	2.859.594 €
Lüftung	2.079.199 €	0 €	0 €
Wasserbereitung	1.026.223 €	1.173.929 €	1.173.929 €
Heizung	4.937.957 €	3.116.776 €	1.211.511 €
Beleuchtung und Ausstattung Gebäudeautomation	7.900.957 €	748.511 €	748.511 €
Heizzentrale	224.926 €	2.300.783 €	2.702.148 €
PV	0 €	2.700.000 €	2.700.000 €
Kompensation ¹	0€	148.251 €	176.431 €

Tabelle 4: Parameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung zu Investitionskosten

Als Grundlage des Wirtschaftlichkeitsberichts für das Quartier in Stuttgart wird zudem, aufbauend auf den Annahmen in M2.1.1, eine Wohnfläche von 52.500 m² bestehend aus 700 belegten Wohneinheiten mit jeweils 75 m² angenommen in Anlehnung an M2.1.1. Diese Annahmen sind besonders wichtig für die Berechnungen der Wirtschaftlichkeit aus Sicht der Mietenden.

4.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse dieses Berichts geben sowohl Einblicke in die Wirtschaftlichkeit der beiden Quartiere aus den beschriebenen Perspektiven als auch in Parameter und Faktoren, die die Wirtschaftlichkeit maßgeblich beeinflussen. Um den Einfluss verschiedener Faktoren darzustellen, werden Sensitivitätsanalysen des Kalkulationszinses sowie verschiedener Entwicklungen einer CO₂-Bepreisung durchgeführt.

¹ Für die Berechnung der Kompensation wird ein Preis von 23 € pro Tonne CO₂, wie von Atmosfair angegeben, angenommen. Die Emissionsmenge der kommenden 20 Jahre wird unter Berücksichtigung der klimapolitischen Ziele zur Emissionssenkung der Stromversorgung in Deutschland und auf Basis der in M2.1.1 angegebenen Energiemengen abgeschätzt.

Bewertung aus Quartierssicht

Folgende Abbildungen zeigen die Wirtschaftlichkeit der beiden Varianten aus Quartierssicht. Sie gibt somit Auskunft über den Trade-off zwischen Energiekosteneinsparungen durch höhere Energieeffizienzstandards der Gebäude und Mehrinvestitionen in Klimaneutralität. Für die Berechnung der Kapitalwerte in folgender Abbildung wurde ein Kalkulationszins von 0,5% angenommen und ohne eine CO₂-Bepreisung gerechnet.

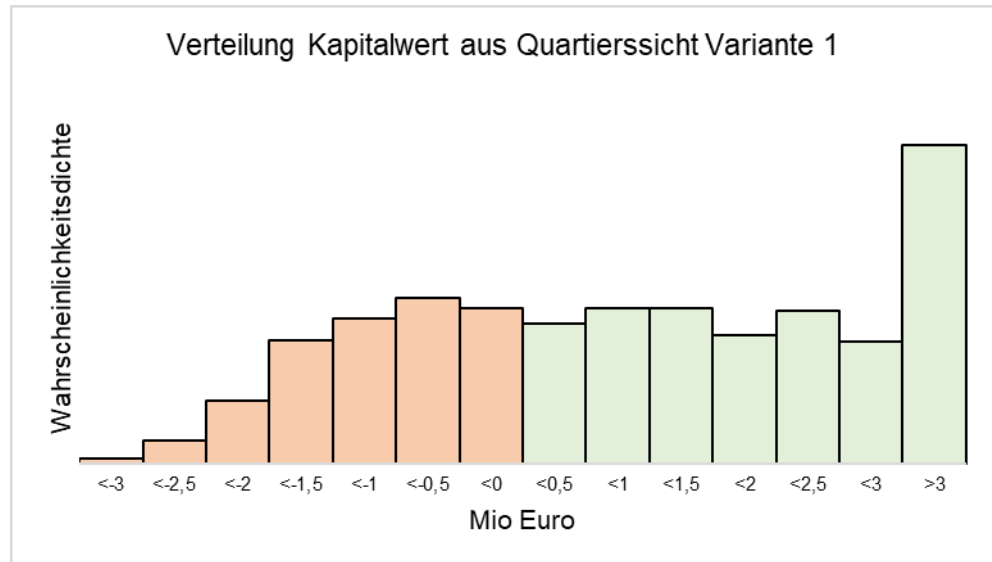


Abbildung 3: Kapitalwertverteilung aus Quartierssicht der Variante 1

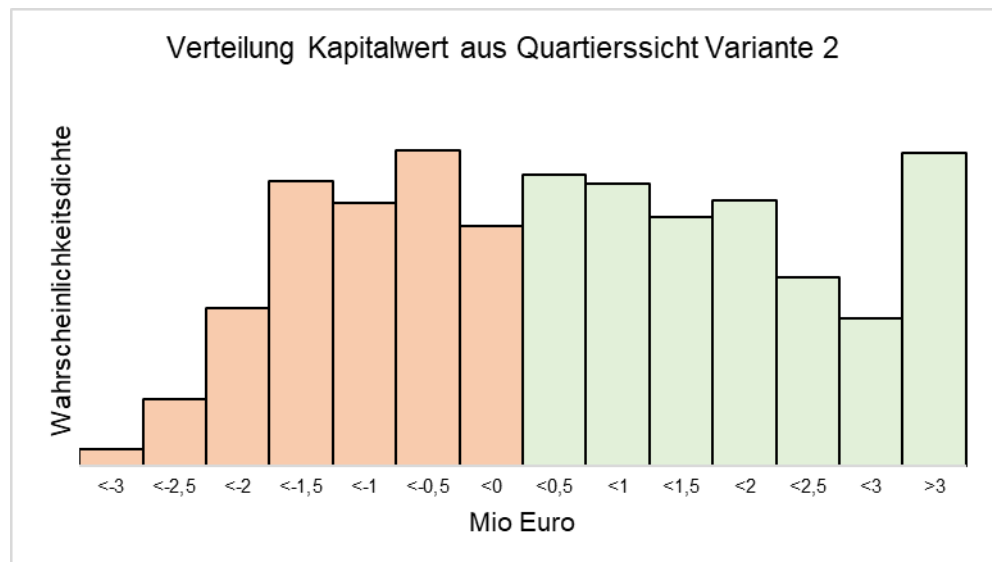


Abbildung 4: Kapitalwertverteilung aus Quartierssicht der Variante 2

	Erwarteter Kapitalwert	„Bad Case“ Kapitalwert (5% Quantil)	Wahrscheinlichkeit, dass Kapitalwert <0

Variante 1 Kaltes Nahwärmenetz mit dezentralen Sole-Wasser-Wärmepumpen	1,00 Mio. €	-2,0 Mio. €	37%
Variante 2 Heizzentrale mit zentraler Sole-Wasser-Wärmepumpe	0,49 Mio. €	-2,2 Mio. €	44%

Tabelle 5: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbewertung aus Quartierssicht

Aus Quartierssicht betrachtet haben beide Varianten einen positiven erwarteten Kapitalwert. Somit ist ein klimaneutrales Quartierskonzept für einen risikoneutralen Entscheider und unter Annahme der oben genannten Parameter wirtschaftlicher als ein „Standard“ Quartier. Die Risikobewertung zeigt jedoch, dass es in beiden Varianten ein Risiko gibt, dass die klimaneutrale Energieversorgung nicht wirtschaftlich ist. Dieses Risiko ergibt sich aus den weiter oben beschriebenen unsicheren Energiepreisen und der Inflationsentwicklung.

Bewertung aus Sicht der Investierenden

Ziel des Stadtquartierprojekts ist das Schaffen eines klimafreundlichen, aber auch bezahlbaren Wohnraums. Daher wird für die Bewertung aus Sicht des Investierenden eine warmmietneutrale Mieterhöhung unterstellt. Eine warmmietneutrale Mieterhöhung entspricht der Mieterhöhung, die den Mietenden nicht zusätzlich belastet. Im Fall von klimaneutralen Wohnquartieren ist das Wort „Erhöhung“ ggf. irreführend, da die Miete ja nicht erhöht wird, sondern einfach höher ist als in anderen neu gebauten Wohnquartieren. In diesem Bericht wird somit von einer warmmietneutralen Mehrmiete die Rede sein. Diese ist die Mehrmiete, die genauso hoch ist wie die Energieeinsparungen der Mietenden. Durch diese Mehrmiete macht es für den Mietenden finanziell keinen Unterschied, ob sie/er in einem klimaneutralen oder „normalen“ Wohnquartier wohnt. Die warmmietneutralen Mehrmieten sind in folgendem Diagramm zusammengefasst.

	Warmmietneutrale Mehrmiete pro m ² Wohnfläche und pro Jahr.
Variante 1 Kaltes Nahwärmenetz mit dezentralen Sole-Wasser-Wärmepumpen	1,13 €
Variante 2 Heizzentrale mit zentraler Sole-Wasser-Wärmepumpe	0,98 €

Tabelle 6: Warmmietneutrale Mehrmieten der beiden Varianten

Aufbauend auf diesen beiden Mehrmieten ergeben sich für die beiden Varianten folgende Verteilungen der Kapitalwerte.

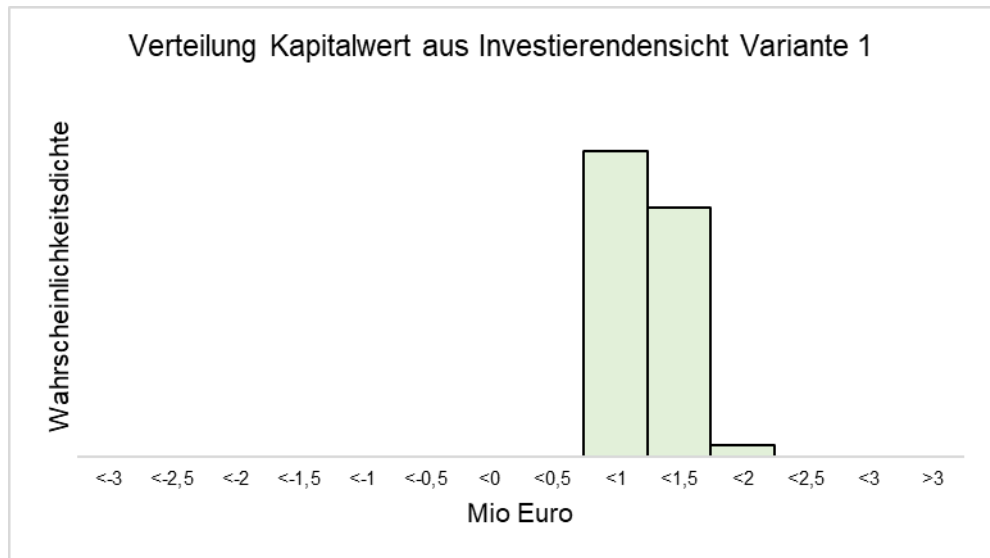


Abbildung 5: Kapitalwertverteilung aus Sicht des Investierenden der Variante 1

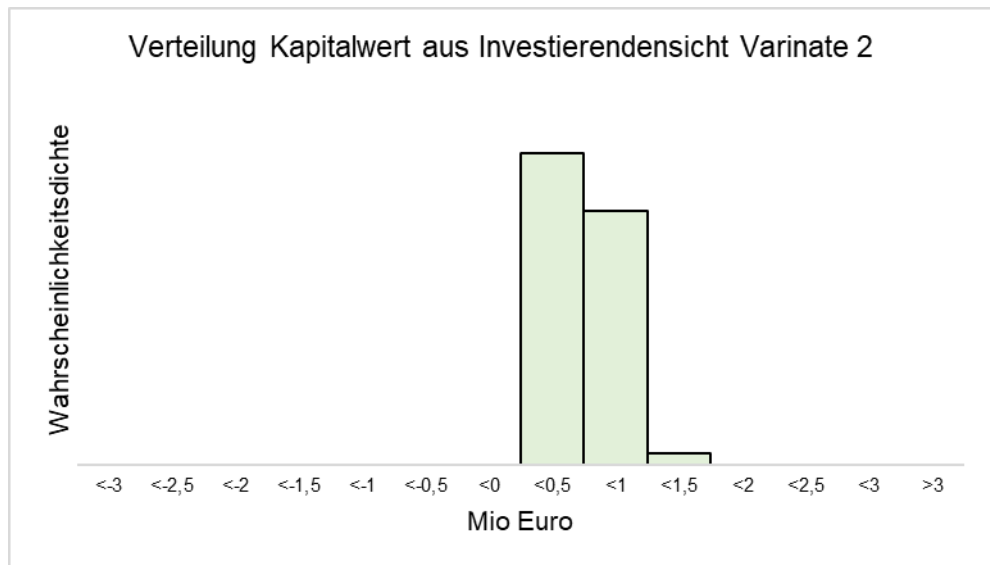


Abbildung 6: Kapitalwertverteilung aus Sicht des Investierenden

	Erwarteter Kapitalwert	„Bad Case“ Kapitalwert (5% Quantil)	Wahrscheinlichkeit, Kapitalwert <0
Variante 1 Kaltes Nahwärmenetz mit dezentralen Sole-Wasser-Wärmepumpen	1,00 Mio. €	0,72 Mio. €	0%

Variante 2 Heizzentrale mit zentraler Sole- Wasser- Wärmepumpe	0,49 Mio. €	0,21 Mio. €	0%
---	-------------	-------------	----

Tabelle 7: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbewertung aus Sicht der Investierenden

Verglichen mit den Kapitalwerten aus Quartierssicht sind die erwarteten Kapitalwerte aus Sicht der Investierenden gleich hoch. Der Unterschied zur Quartierssicht ist das finanzielle Risiko. Da die Mehrmieten in diesem Bericht nicht von Risiko betroffen sind und der Investierende bzw. Vermietende nicht das Risiko sich ändernder Energiepreise trägt, ist das Risiko aus der Perspektive der Investierenden wesentlich niedriger.

Bewertung aus Sicht der Mietenden

Passend zur Sicht der Investierenden wird für die Sicht der Mietenden eine warmmietneutrale Mehrmiete unterstellt. Aufbauend auf dieser Mehrmiete zeigen folgende Abbildungen die Kapitalwerte in Form der Kosteneinsparungen einer Wohneinheit in einem Jahr. Positive Kapitalwerte stehen somit für Kosteneinsparungen und negative Werte für Mehrkosten.

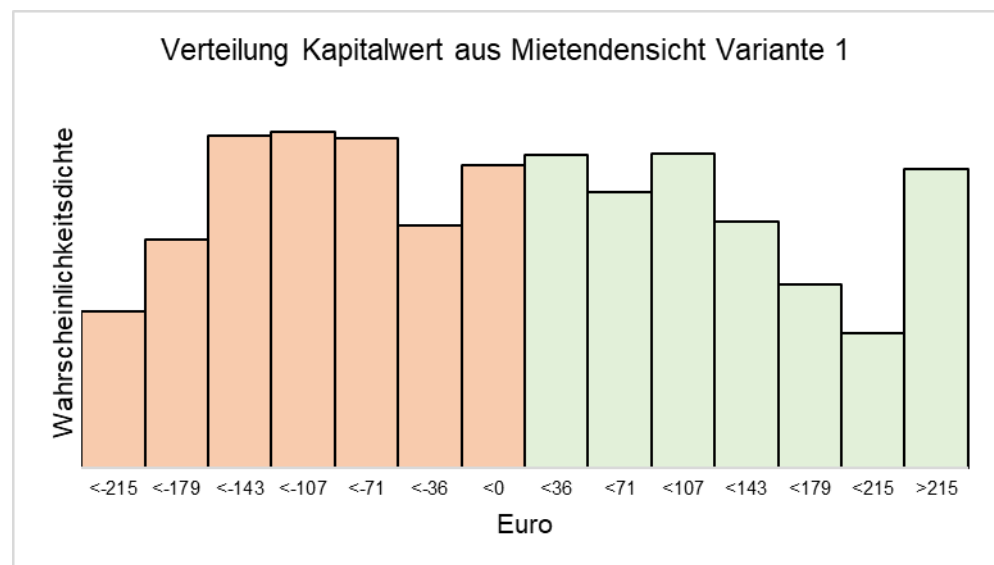


Abbildung 7: Kapitalwertverteilung (durchschnittliche jährliche Kosteneinsparungen) aus Mietendensicht der Variante 1

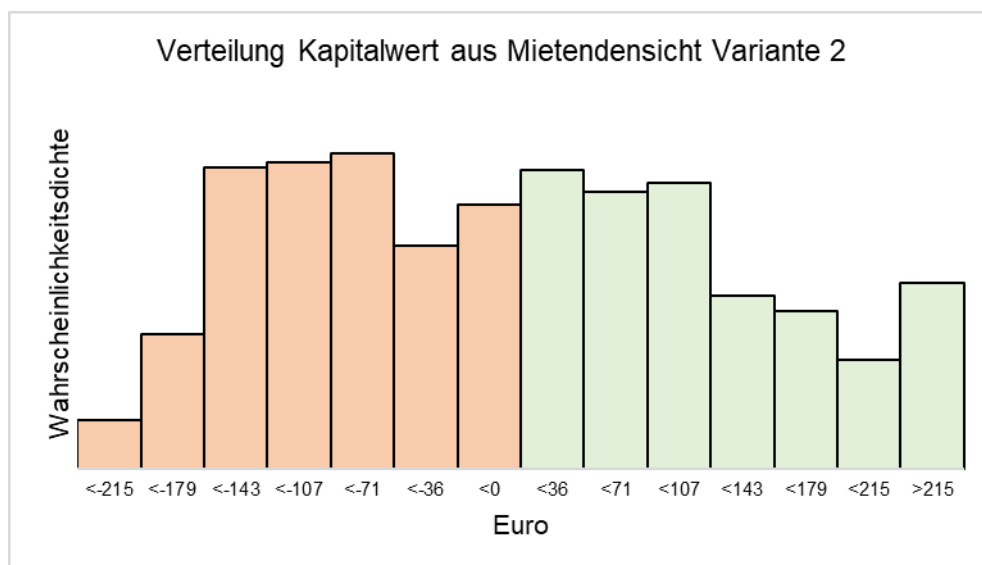


Abbildung 8: Kapitalwertverteilung (durchschnittliche jährliche Kosteneinsparungen) aus Mietendensicht der Variante 2

	Erwarteter Kapitalwert	„Bad Case“ Kapitalwert (5% Quantil)	Wahrscheinlichkeit, Kapitalwert <0
Variante 1 Kaltes Nahwärmenetz mit dezentralen Sole-Wasser-Wärmepumpen	0 €	-208 €	52%
Variante 2 Heizzentrale mit zentraler Sole-Wasser-Wärmepumpe	0 €	-186 Mio. €	52%

Tabelle 8: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbewertung aus Mietendensicht

Der erwartete Kapitalwert beider Varianten ist 0. Dies entspricht der Definition einer warmmietneutralen Mehrmiete. Wie bereits in vorangegangenen Kapitel angekündigt, ist das finanzielle Risiko für Mietende jedoch nicht gleich 0. So gibt es in beiden Varianten ein erhebliches Risiko, dass die Mietenden unter Berücksichtigung einer warmmietneutralen Mehrmiete in einem klimaneutralen Quartier höhere Kosten haben als in einem „normalen“ Wohnquartier. Um dieses Risiko auszugleichen, wird empfohlen, keine warmmietneutrale Mehrmiete anzusetzen, sondern die Mehrmieten geringer zu gestalten. Beispielsweise würde bereits eine um 9 ct. geringere Mehrmiete pro Jahr und pro m² die erwarteten Kosteneinsparungen der Mietenden auf 80 € im Jahr erhöhen und für die Investierenden immer noch in einem positiven erwarteten Kapitalwert resultieren.

Zusätzlich sollte an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass klimaneutrale Wohnquartiere durch ihre geringeren Energiebedarfe einen stark positiven Effekt auf das allgemeine finanzielle Risiko von Mietenden haben. So haben

Mietende allgemein geringere Ausgaben für Wärmeenergie und Strom und sind künftig schwankenden Rohstoff- und Strompreisen in einem wesentlich geringeren Umfang ausgesetzt als in einem herkömmlichen Wohnquartier.

4.2.1 Sensitivitätsanalysen

Die Schätzung von Faktoren wie dem Kalkulationszinssatz unterliegt einer gewissen Unsicherheit. Beispielsweise könnte sich die Marktlage in den kommenden Jahren so ändern, dass ein anderer Kalkulationszinssatz verwendet werden müsste. Um diese Unsicherheit darzustellen, wird in diesem Kapitel eine Sensitivitätsanalyse der beschriebenen Faktoren durchgeführt. Außerdem wird in diesem Kapitel beschrieben, wie sich ein wichtiges klimapolitisches Instrument, eine CO₂-Bepreisung, auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Kalkulationszins

In diesem Kapitel wird betrachtet, welchen Einfluss ein anderer Kalkulationszins auf die Ergebnisse hätte. Das Ergebnis dieser Sensitivitätsanalyse kann folgender Abbildung entnommen werden.

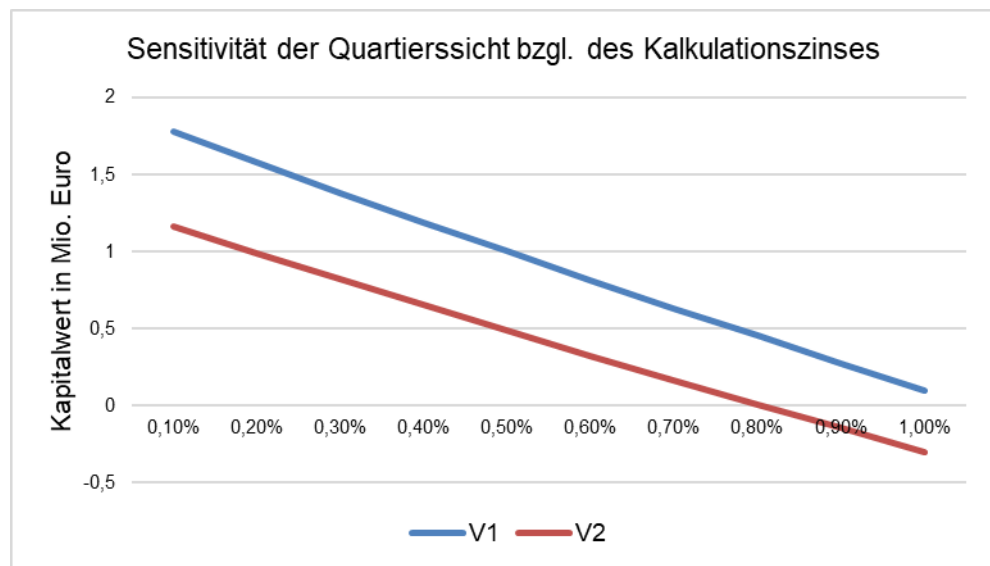


Abbildung 9: Kapitalwert der Quartierssicht in Abhängig des Kalkulationszinnes

Der Einfluss des Kalkulationszinnes auf den Kapitalwert aus Quartierssicht ist relativ hoch. Erwartungsgemäß sinken beide Kapitalwerte mit zunehmendem Zins fast linear ab. In Variante 2 würde bei einem Zins von 1% sogar ein negativer Kapitalwert erzielt. Der Grund hierfür besteht darin, dass der Kalkulationszins den Zeitwert des Geldes abbildet. Klimaneutrale Wohnquartiere setzen sehr hohe Investitionen am Anfang voraus, die sich erst wäh-

rend der Lebensdauer des Quartiers amortisieren. Ein höherer Kalkulationszins bedeutet, dass Geldströme heute relativ mehr wert sind als zukünftige Zahlungsströme. Daher sinkt der Kapitalwert mit zunehmendem Zins.

CO₂-Bepreisung

Dieses Kapitel zeigt auf, wie sich eine CO₂-Bepreisung auf das Wohnquartier in Stuttgart auswirken würde. Grundlage für die Berechnungen der Emissionen ist wiederholt das wissenschaftliche Hintergrunddokument des Fraunhofer IBP (M2.1.1). Für die Berechnung wird angenommen, dass in der klimaneutralen Variante keine zusätzlichen Kosten durch eine CO₂-Bepreisung entstehen, während in der Basisvariante die jährlich emittierten Emissionen der Wärmeversorgung (1307 t/a) bepreist werden.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass in diesem Bericht, im Unterschied zu aktuellen Bestimmungen, der CO₂ Preis auf CO₂-Äquivalente erhoben wird und auch auf Fernwärme ein Preis beim Konsumenten erhoben wird. Unterstellt man aktuelle Bestimmungen, also das Aussetzen der Bepreisung für Wärme aus Fernwärme, so hätte ein CO₂ Preis keine direkten Auswirkungen auf die Ergebnisse. Es sei jedoch darauf verwiesen, dass ein CO₂ Preis für einen Anstieg des Fernwärmepreises sorgen würden, wodurch sich ein indirekter Effekt ergeben könnte, der den Effekt in diesem Bericht ähnelt.

Für die Bepreisung werden unterschiedliche Szenarien angenommen:

- CO₂ Preis der aktuellen Bundesregierung:**
 Bepreisung wie von der Bundesregierung beschlossen. Nach 2025 wird angenommen, dass der Preis in der Mitte des vorgegebenen Preis-Korridors (bei 60 €/t) liegt. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2021).

2021	2022	2023	2024	2025	Ab 2026
25 €/t	30 €/t	35 €/t	45 €/t	55 €/t	60 €/t

- Prognostizierter CO₂ Preis von Prognos:**
 Bepreisung wie von Kemmler et al. (2020) vorgeschlagen. In der vom BMWi beauftragten Studie werden Projektionen und Folgeabschätzungen zur weiteren Entwicklung des Energiesystems bis 2030 und darüber hinaus herausgearbeitet. In diesem Zusammenhang wird folgende CO₂ Preis Entwicklung prognostiziert:

2021	2022	2023	2024	2025	2026

23 €/t	27 €/t	31 €/t	39 €/t	47 €/t	50 €/t
2027	2028	2029	2030	2031	2032
78	101	123	140	153	165
2033	2034	2035	2036	2037	2038
177	189	199	210	220	220

- 1,5 Grad Plan von German Zero**

Bepreisung wie im 1,5 Grad Plan von German Zero vorgeschlagen. Hier schlägt die Initiative vor, mit einem Preis von 50 €/t zu starten, der jährlich um 10 €/t erhöht wird.

2021	2022	2023	2024	2025	Ab 2026
50 €/t	60 €/t	70 €/t	80 €/t	90 €/t	usw.

- Stadt Stuttgart CO₂ Preis:**

Bepreisung wie von der Stadt Stuttgart für die Bewertung kommunaler Projekte vorgeschrieben. In diesem Zusammenhang setzt die Stadt einen CO₂ Preis von 65 € für Projekte, die im Jahr 2021 beginnen, fest.

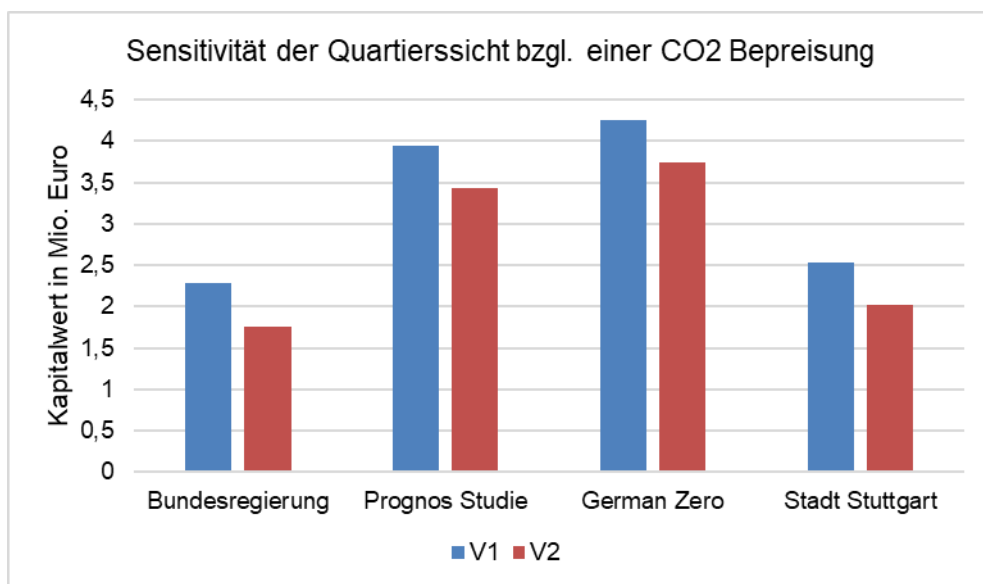


Abbildung 10: Kapitalwert aus Quartierssicht in Abhängig des CO₂ Preises

Die Abbildung zeigt, wie hoch der Einfluss einer CO₂-Bepreisung auf die Wirtschaftlichkeit des Wohnquartiers ist. Bereits das Szenario mit den niedrigsten Preisen steigert die Wirtschaftlichkeit des Wohnquartiers um etwa 100%. Dieser Bericht zeigt somit, wie wirkungsvoll das politische Instrument der CO₂-Bepreisung ist und dass in Zukunft klimaneutrale Wohnquartiere, angenommen einer weiter steigenden CO₂-Bepreisung, immer wirtschaftlicher werden.

4.3 Wirtschaftlichkeitsbericht Überlingen

4.3.1 Datengrundlage Kosten und Energieversorgung

Das Wohnquartier in Überlingen besteht aus einem Alt- und Neubau. Zum Zeitpunkt der Erstellung des Wirtschaftlichkeitsberichts lag jedoch nur ein Energiekonzept für den Neubau vor, weshalb hier zunächst lediglich die Kennzahlen für den Neubau berechnet werden. Die unterschiedlichen Kosten sowie Energieverbräuche der Basis- und klimaneutralen Energieversorgung sind zwei verschiedenen Wohnquartieren der Baugenossenschaft Überlingen entnommen. Bei dem Wohnquartier, das als klimaneutrales Konzept betrachtet wird, handelt es sich um den im Rahmen des Stadtquartierprojekts bereits gebauten Neubau. Als Basis bzw. Vergleichskonzept dient das zweite Wohnquartier, das von der Baugenossenschaft Überlingen außerhalb des Projekts realisiert wurde. Die Energieverbräuche sind hierbei dem Energiekonzept der Energieagentur Ravensburg für die klimaneutrale Variante bzw. den tatsächlichen Bedarfen für die Basisvariante entnommen. Für die klimaneutrale Variante lagen zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch keine tatsächlichen Verbräuche vor. Folgender Tabelle können Rahmendaten der verschiedenen Konzepte entnommen werden.

	Energieversorgung	Gebäudestandard	Wärmebedarf	Strombedarf
Basisvariante	Wärmeversorgung über Gaskessel und Solarthermie, Strombezug aus dem Netz	KfW 70	485 MWh/a (85% über Gas und 15% Solarthermie)	175 MWh/a (100% Netz)
Klimaneutrale Variante	Wärmeversorgung über nah gelegene Wärmzentrale (Hackschnitzelanlage, Solarthermie und BHKW für Spitzenlast), Stromversorgung teilweise über PV ergänzt durch Batteriespeicher (Mieterstrom)	KfW 40+	252 MWh/a (70% über Hackschnitzel, 25% über Solarthermie und 5% über Gas)	175 MWh/a (67% aus PV & Batterie und 33% aus dem Netz)

Tabelle 9: Parameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung zu Energiekonzepten

Zusätzlich zu den Energiedaten ergeben sich unterschiedliche Kosten der verschiedenen Varianten, die unmittelbar mit der klimafreundlicheren Energieversorgung in Verbindung stehen und somit Grundlage für die Kapitalwertberechnung sind. Die Kosten können folgender Tabelle entnommen werden.

	Basisvariante	Mehrkosten klimaneutrale Variante
Wärmeschutz	2.916.268,15 €	140.848,75 €
Lüftung	0 €	427.346,00 €
Heizung	349.763 €	58.416,00 €
PV & Batteriespeicher	0 €	65.078,97 €

Tabelle 10: Tabelle 9: Parameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung zu Investitionskosten

4.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse dieses Berichts geben sowohl Einblicke in die Wirtschaftlichkeit des Quartiers aus unterschiedlichen Perspektiven als auch in Parameter und Faktoren, die die Wirtschaftlichkeit maßgeblich beeinflussen. Um den Einfluss verschiedener Faktoren darzustellen, werden Sensitivitätsanalysen des Kalkulationszinses sowie verschiedener Entwicklungen einer CO₂-Bepreisung durchgeführt.

Bewertung aus Quartierssicht

Folgende Abbildung zeigt die Wirtschaftlichkeit der klimaneutralen Energieversorgung aus Quartierssicht. Sie gibt somit Auskunft über den Trade-off zwischen Energiekosteneinsparungen durch eine klimafreundlichere Energieversorgung des Gebäudes und Mehrinvestitionen in Klimaneutralität. Für die Berechnung der Kapitalwerte in folgender Abbildung wurde ein Kalkulationszins von 0,5% angenommen und ohne eine CO₂-Bepreisung gerechnet.

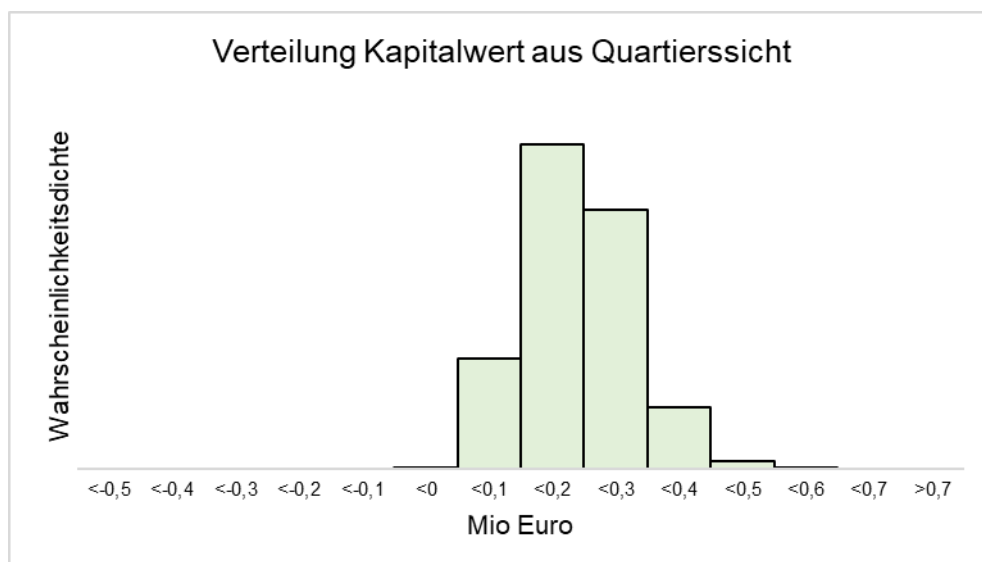


Abbildung 11: Kapitalwertverteilung aus Quartierssicht

	Erwarteter Kapitalwert	„Bad Case“ Kapitalwert (5% Quantil)	Wahrscheinlichkeit, Kapitalwert <0
Klimaneutrales Energiekonzept	0,19 Mio. €	0,07 Mio. €	0,04%

Tabelle 11: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbewertung aus Quartierssicht

Aus Quartierssicht betrachtet hat das klimaneutrale Energiekonzept einen positiven erwarteten Kapitalwert. Somit ist ein klimaneutrales Quartierskonzept im Erwartungswert wirtschaftlicher als ein „Standard“ Quartier. Die Risikobewertung zeigt zudem, dass es nur ein vernachlässigbares Risiko gibt, dass die klimaneutrale Energieversorgung nicht wirtschaftlich ist.

Bewertung aus Sicht der Investierenden

Ziel des Stadtquartierprojekts ist das Schaffen eines klimafreundlichen, aber auch bezahlbaren Wohnraums. Daher wird für die Bewertung aus Sicht des Investierenden eine warmmietneutrale Mieterhöhung unterstellt. Eine warmmietneutrale Mieterhöhung entspricht der Mieterhöhung, die den Mietenden nicht zusätzlich belastet. Im Fall von klimaneutralen Wohnquartieren ist das Wort „Erhöhung“ ggf. irreführend, da die Miete ja nicht erhöht wird, sondern einfach höher ist als in anderen neu gebauten Wohnquartieren. In diesem Bericht wird somit von einer warmmietneutralen Mehrmiete die Rede sein. Sie ist jene Mehrmiete, die genauso hoch ist wie die Energieeinsparungen der Mietenden. Durch diese Mehrmiete macht es für den Mietenden finanziell keinen Unterschied, ob sie/er in einem klimaneutralen oder „normalen“ Wohnquartier wohnt. Die warmmietneutralen Mehrmieten des Quartiers in Überlingen kann folgender Tabelle entnommen werden.

	Warmmietneutrale Mehrmiete pro m ² Wohnfläche und pro Jahr.
Klimaneutrales Energiekonzept	0,58 €

Tabelle 2: Warmmietneutrale Mehrmiete

Aufbauend auf dieser Mehrmiete ergibt sich folgende Verteilung der Kapitalwerte.

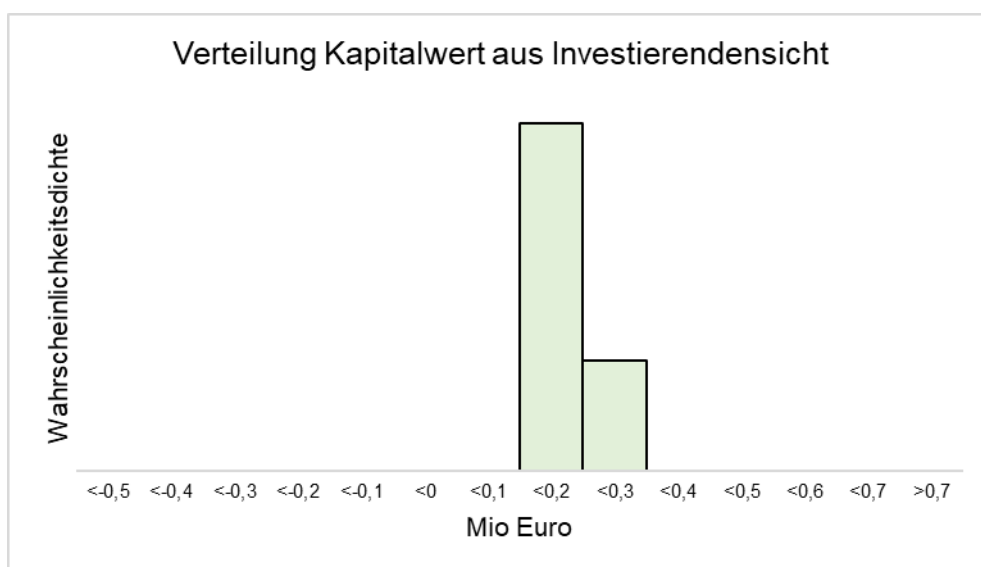


Abbildung 12: Kapitalwertverteilung aus Investierendensicht

	Erwarteter Kapitalwert	„Bad Case“ Kapitalwert (5% Quantil)	Wahrscheinlichkeit, Kapitalwert <0
Klimaneutrales Energiekonzept	0,19 Mio. €	0,13 Mio. €	0%

Tabelle 12: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbewertung aus Investierendensicht

Verglichen mit den Kapitalwerten aus Quartierssicht ist der erwartete Kapitalwert aus Sicht des Investierenden unverändert. Der Unterschied zur Quartierssicht ist das finanzielle Risiko. Da die Mehrmieten nicht von Risiko betroffen sind und der Investierende bzw. Vermietende nicht das Risiko sich ändernder Energiepreise trägt, ist das Risiko wesentlich niedriger.

Bewertung aus Sicht der Mietenden

Passend zur Sicht der Investierenden wird für die Sicht der Mietenden eine warmmietneutrale Mehrmiete unterstellt. Aufbauend auf dieser Mehrmiete

zeigen folgende Abbildungen die Kapitalwerte in Form der Kosteneinsparungen einer Wohneinheit (mit 75 m²) in einem Jahr. Positive Kapitalwerte stehen somit für Kosteneinsparungen und negative Werte für Mehrkosten.

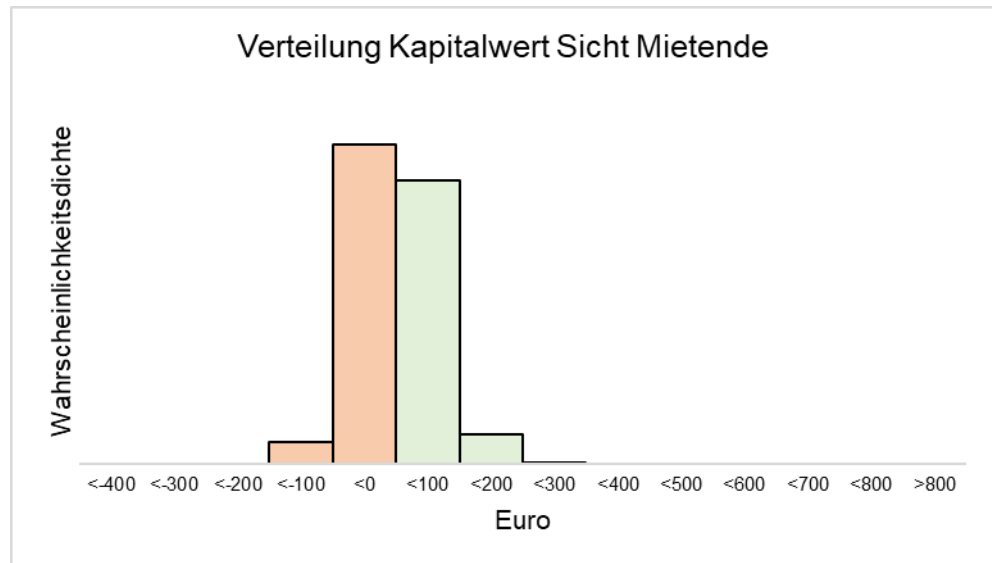


Abbildung 13: Kapitalwertverteilung (durchschnittliche jährliche Kosteneinsparungen) aus Sicht der Mietenden

	Erwarteter Kapitalwert	„Bad Case“ Kapitalwert (5% Quantil)	Wahrscheinlichkeit, Kapitalwert <0
Variante 1 Kaltes Nahwärmenetz mit dezentralen Sole-Wasser-Wärmepumpen	0€	-92 €	52%

Tabelle 13: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbewertung aus Sicht der Mietenden

Der erwartete Kapitalwert ist 0. Dies entspricht der Definition einer warmmietneutralen Mehrmiete. Im Gegensatz dazu ist das finanzielle Risiko für Mietende nicht gleich 0. So gibt es ein erhebliches Risiko, dass die Mietenden unter Berücksichtigung einer warmmietneutralen Mehrmiete in einem klimaneutralen Quartier höhere Kosten tragen als in einem „normalen“ Wohnquartier. Um dieses Risiko auszugleichen, wird Vermietenden empfohlen, eine kleinere Mehrmiete anzusetzen. Beispielsweise würde bereits eine um 9 ct. geringere Mehrmiete pro Jahr und pro m² die erwarteten Kosteneinsparungen der Mietenden auf 106 € im Jahr erhöhen und für die Investierenden immer noch zu einem positiven erwarteten Kapitalwert führen.

Zusätzlich sollte an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass klimaneutrale Wohnquartiere durch ihre geringeren Energiebedarfe einen stark positiven Effekt auf das allgemeine finanzielle Risiko von Mietenden haben. So haben Mietende allgemein geringere Ausgaben für Wärmeenergie und Strom und

sind künftig schwankenden Rohstoff- und Strompreisen in einem wesentlich geringeren Umfang ausgesetzt als in einem herkömmlichen Wohnquartier.

4.3.3 Sensitivitätsanalysen

Die Schätzung von Faktoren wie dem Kalkulationszinssatz unterliegt einer gewissen Unsicherheit. Beispielsweise könnte sich die Marktlage in den kommenden Jahren so ändern, dass ein anderer Kalkulationszinssatz verwendet werden müsste. Um diese Unsicherheit darzustellen, wird in diesem Kapitel eine Sensitivitätsanalyse der beschriebenen Faktoren durchgeführt. Außerdem wird in diesem Kapitel beschrieben, wie sich ein wichtiges klimapolitisches Instrument, eine CO₂-Bepreisung, auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Kalkulationszins

In diesem Kapitel wird betrachtet, welchen Einfluss ein anderer Kalkulationszins auf die Ergebnisse hätte. Das Ergebnis dieser Sensitivitätsanalyse kann folgender Abbildung entnommen werden.

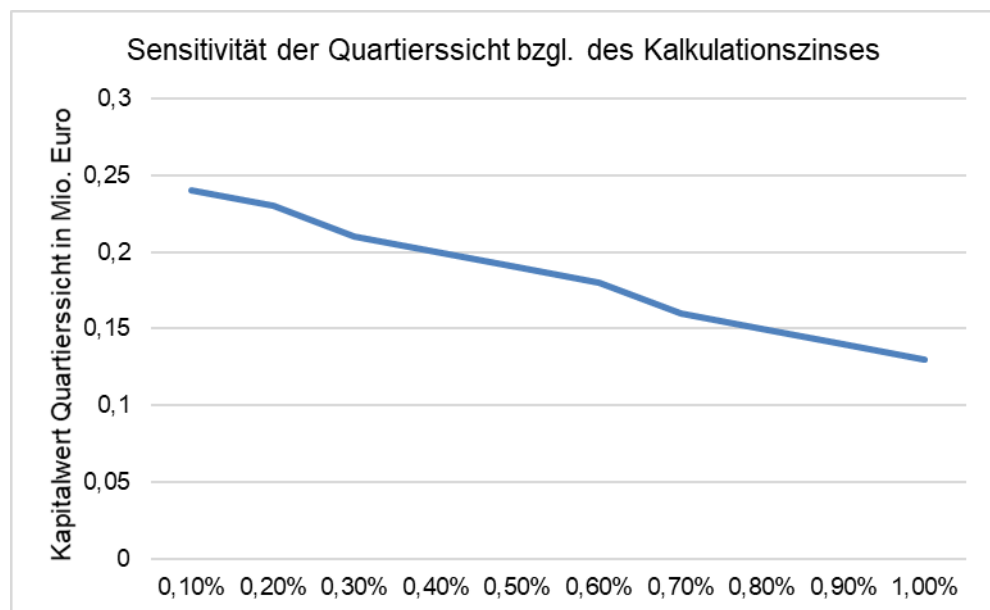


Abbildung 14: Kapitalwert der Quartierssicht in Abhängig des Kalkulationszinses

Der Einfluss des Kalkulationszinses auf den Kapitalwert aus Quartierssicht ist relativ hoch. Erwartungsgemäß sinkt der Kapitalwert mit zunehmendem Zins ab. Der Grund hierfür besteht darin, dass der Kalkulationszins den Zeitwert des Geldes abbildet. Klimaneutrale Wohnquartiere haben sehr hohe Investitionen am Anfang, die sich erst während der Lebensdauer des Quartiers amortisieren. Ein höherer Kalkulationszins bedeutet, dass Geldströme heute relativ mehr wert sind als zukünftige Zahlungsströme. Daher sinkt der

Kapitalwert mit zunehmendem Zins. Allerdings wird der Kapitalwert auch unter Annahme eines relativ hohen Zinses von 1% nicht negativ.

CO₂-Bepreisung

Dieses Kapitel zeigt auf, wie sich eine CO₂-Bepreisung auf das Wohnquartier in Überlingen auswirken würde. Grundlage für die Berechnungen der Emissionen ist das wissenschaftlichen Hintergrunddokument des Fraunhofer IBP (M2.1.1). Für die Berechnung werden die anfallenden Kosten der klimaneutralen Variante vernachlässigt, da diese nur auf den jährlichen Gas-Bezug anfallen und somit verschwindend gering sind. Die jährlich emittierten Emissionen der Wärmeversorgung der Basisvariante sind 116,4 t/a. Für die Bepreisung werden unterschiedliche Szenarien angenommen:

- **CO₂ Preis der aktuellen Bundesregierung:**

Bepreisung wie von der Bundesregierung beschlossen. Nach 2025 wird angenommen, dass der Preis in der Mitte des vorgegebenen Preis-Korridors (bei 60 €/t) liegt. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2021).

2021	2022	2023	2024	2025	Ab 2026
25 €/t	30 €/t	35 €/t	45 €/t	55 €/t	60 €/t

- **Prognostizierter CO₂ Preis von Prognos:**

Bepreisung wie von Kemmler et al. (2020) vorgeschlagen. In der vom BMWi beauftragten Studie werden Projektionen und Folgeabschätzungen zur weiteren Entwicklung des Energiesystems bis 2030 und darüber hinaus herausgearbeitet. In diesem Zusammenhang wird folgende CO₂ Preis Entwicklung prognostiziert:

2021	2022	2023	2024	2025	2026
23 €/t	27 €/t	31 €/t	39 €/t	47 €/t	50 €/t
2027	2028	2029	2030	2031	2032
78	101	123	140	153	165
2033	2034	2035	2036	2037	2038
177	189	199	210	220	220

- **1,5 Grad Plan von German Zero**
Bepreisung wie im 1,5 Grad Plan von German Zero vorgeschlagen. Hier schlägt die Initiative vor, mit einem Preis von 50 €/t zu starten, der jährlich um 10 €/t erhöht wird.

2021	2022	2023	2024	2025	Ab 2026
50 €/t	60 €/t	70 €/t	80 €/t	90 €/t	usw.

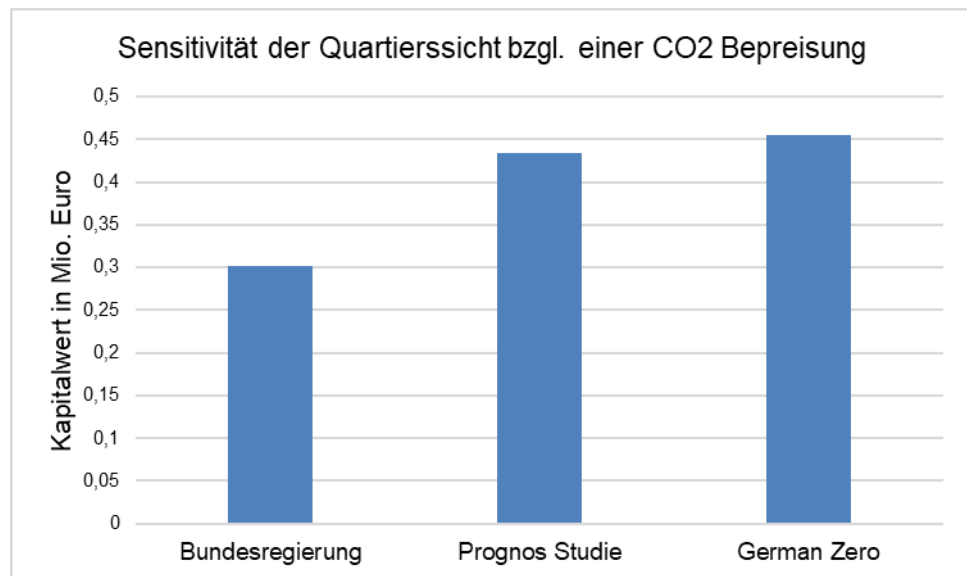


Abbildung 14: Kapitalwert aus Quartierssicht in Abhängig des CO₂ Preises

Die Abbildung zeigt, wie hoch der Einfluss einer CO₂ Bepreisung auf die Wirtschaftlichkeit des Wohnquartiers ist. Bereits das Szenario mit den niedrigsten Preisen steigert die Wirtschaftlichkeit des Wohnquartiers um 50%. Dieser Bericht zeigt somit, wie wirkungsvoll das politische Instrument der CO₂ Bepreisung ist und dass in Zukunft klimaneutrale Wohnquartiere, angenommen einer weiter steigenden CO₂-Bepreisung, immer wirtschaftlicher werden.

5 Mögliche Schlussfolgerungen für klimaneutrale Stadtquartiere

Allgemein zeigen die Ergebnisse dieses Berichtes, wie die Wirtschaftlichkeit von klimaneutralen Wohnquartieren allgemein berechnet werden kann. Die hier vorgestellte Methodik ist nicht nur in der Lage, die Wirtschaftlichkeit abzuschätzen, sondern kann darüber hinaus das damit verbundenen finanzielle Risiko abbilden. Am Beispiel der Wohnquartiere wird zudem gezeigt, wie die Methodik angewendet werden kann und die Ergebnisse stellen exemplarisch dar, wie die Wirtschaftlichkeit von Wohnquartieren allgemein einzu-

schätzen ist. Hierbei sei nochmals darauf verwiesen, dass ich die Ergebnisse der Quartiere nur sehr eingeschränkt miteinander vergleichen lassen.

Die Ergebnisse dieser beispielhaften Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigen, dass Klimaneutralität von Quartieren mit Mehraufwänden verbunden ist, die Energiekosteneinsparungen, die mit erhöhter Effizienz einhergehen, die entstandenen Investitionskosten jedoch decken können.

Um die Wirtschaftlichkeit noch weiter zu erhöhen, hat die Politik allgemein zwei Hebel: die Senkung der Investitionskosten sowie die Erhöhung der Energiekosteneinsparungen. Ein gefördertes Forschungsprojekt wie dieses stellt dabei eine Möglichkeit dar Investitionskosten zu senken indem Investierende in klimaneutrale Quartiere finanziell unterstützt werden. Eine andere Möglichkeit sind die bestehenden Förderprogramme zu besonders klimafreundlichen Technologien der Energiebereitstellung und Effizienzmaßnahmen an Gebäuden (KfW 2020). Den zweiten Hebel, also die Erhöhung der Einsparungen von Energiekosten, kann durch eine Bepreisung von CO₂ erzielt werden (Ahlrichs et al. 2020). Durch eine Bepreisung von CO₂ würde der Preis fossiler Energieträger in Abhängigkeit der Emissionen steigen und emissionsarme Energieträger fördern. So würde die Attraktivität klimaneutraler Quartiere für Mietende stark gesteigert werden, da diese in klimaneutralen Wohnquartieren geringere Nebenkosten zahlen müssen.

6 Literatur

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V (2017): »Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende.

Ahrlachs, Jakob; Rockstuhl, Sebastian; Tränkler, Timm; Wenninger, Simon (2020): The impact of political instruments on building energy retrofits: A risk-integrated thermal Energy Hub approach. In *Energy Policy* 147, p. 111851. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111851.

Atmosfair (2021): CO₂-Kompensationsrechner. Available online at <https://www.atmosfair.de/de/kompensieren/wunschmenge/>.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2021): Informationen zum CO₂ Preis in Deutschland. Available online at [https://www.bmu.de/service/haeufige-fragen-faq/fragen-und-antworten-zur-einfuehrung-der-co2-bepreisung-zum-1-januar-2021/#:~:text=Ab%20dem%201.%20Januar%202021,pro%2010%20Kilowattstunden%20\(kWh\).](https://www.bmu.de/service/haeufige-fragen-faq/fragen-und-antworten-zur-einfuehrung-der-co2-bepreisung-zum-1-januar-2021/#:~:text=Ab%20dem%201.%20Januar%202021,pro%2010%20Kilowattstunden%20(kWh).,), checked on 4/7/2021.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Energiedaten: Gesamtausgabe. Available online at <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>, checked on 10/30/2020.

Bundesrepublik Deutschland Finanzagentur GmbH (2020): Bundeswertpapiere. Available online at <https://www.deutsche-finanzagentur.de/de/private-anleger/bundeswertpapiere/bundesanleihen/>.

Europäische Zentralbank (2021): Website der Europäischen Zentralbank. Available online at <https://www.ecb.europa.eu/ecb/tasks/monpol/html/index.de.html>.

European Environment Agency (2015): Trends and projections in Europe 2015. EEA Report No 4.

Fraunhofer ISE (2020): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Available online at <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>, checked on 10/30/2020.

Fridgen, Gilbert; Häfner, Lukas; König, Christian; Sachs, Thomas (2016): Providing Utility to Utilities: The Value of Information Systems Enabled Flexibility in Electricity Consumption. In *JAIIS* 17 (8), pp. 537–563. DOI: 10.17705/1jais.00434.

Häkel, Björn; Pfosser, Stefan; Tränkler, Timm (2017): Explaining the energy efficiency gap - Expected Utility Theory versus Cumulative Prospect Theory. In *Energy Policy* 111, pp. 414–426. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.09.026.

Jackson, Jerry (2010): Promoting energy efficiency investments with risk management decision tools. In *Energy Policy* 38 (8), pp. 3865–3873. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.03.006.

Kemmler, Andreas; Kirchner, Almut; Maur, Alex auf der; Ess, Florian; Kreidelmeyer, Sven; Piegsa, Alexander et al. (2020): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Available online at https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/klimagutachten.pdf?__blob=publicationFile&v=8.

KfW (2020): Förderprogramme für Neubauten. Available online at <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Neubau/>.

Menassa, Carol C. (2011): Evaluating sustainable retrofits in existing buildings under uncertainty. In *Energy and Buildings* 43 (12), pp. 3576–3583. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.09.030.

Perridon, Louis; Rathgeber, Andreas W.; Steiner, Manfred (2017): Finanzwirtschaft der Unternehmung. 17., überarbeitete und erweiterte Auflage. München, Germany: Verlag Franz Vahlen. Available online at <http://lib.mylibrary.com/detail.asp?ID=979748>.

Uhlenbeck, G. E.; Ornstein, L. S. (1930): On the Theory of the Brownian Motion. In *Phys. Rev.* 36 (5), pp. 823–841. DOI: 10.1103/PhysRev.36.823.

Umweltbundesamt (2020): Indikator: Energieverbrauch für Gebäude. Available online at <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-energieverbrauch-fuer-gebäude#die-wichtigsten-fakten>.