

Vergleich der CO₂-Vermeidungskosten zwischen konventionellem Wärmeschutz und einem Hausautomationssystem

Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Connected Energy – SHAPE
(AP6, Bericht D 6.2)

Autoren:

Christian Gambardella, Borderstep Institut

Linda Bergset, Borderstep Institut

Dr. Severin Beucker, Borderstep Institut

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Berechnung von CO₂-Vermeidungskosten	5
2.1	Grundlagen und Definitionen	5
2.2	Annahmen und wirtschaftliche Rahmenbedingungen	9
3	Datengrundlage für die Berechnung der CO₂-Vermeidungskosten	12
3.1	Konventioneller Wärmeschutz: Studie der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (ARGE) e.V.	12
3.2	RIEcon Hausautomationssystem- Feldversuch I	14
3.3	RIEcon Hausautomationssystem- Feldversuch II	20
4	Ergebnisse der Berechnung von CO₂-Vermeidungskosten	23
4.1	Berechnung der CO ₂ -Vermeidungskosten	23
4.2	CO ₂ -Vermeidungskosten des „Konventionellen Wärmeschutzes“ und der „RIEcon Hausautomation“ im Vergleich.....	30
5	Fazit	35
6	Literatur	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vermeidungskosten ohne Modernisierungsumlage (Kalkulationszins 3 %).....	31
Abbildung 2: Vermeidungskosten mit Modernisierungsumlage (Kalkulationszins 3 %).....	32
Abbildung 3: Vermeidungskosten ohne Modernisierungsumlage (Kalkulationszins 5 %).....	33
Abbildung 4: Vermeidungskosten mit Modernisierungsumlage (Kalkulationszins 5 %).....	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Annahmen an die Berechnungsparameter.....	10
Tabelle 2: Gebäudetypisierung Walberg et al. 2011.....	13
Tabelle 3: Energiekennzahlen und Investitionskosten „Konventioneller Wärmeschutz“ Gebäudetyp M68	14
Tabelle 4: Energiekennzahlen (Feldversuch Potsdamer Allee, Eberswalde).....	16
Tabelle 5: Investitionskosten (Feldversuch Potsdamer Allee, Eberswalde).....	19
Tabelle 6: Inspektions- und Instandhaltungskosten	20
Tabelle 7: Energiekennzahlen für die Bewertungszeiträume (Feldversuch Albert-Schweitzer Viertel, Zeitraum 1.1.2002 - 31.12.2003)	21
Tabelle 8: Investitionskosten (Feldversuch Albert-Schweitzer-Viertel 31-35, Zeitraum 2002 - 2003) .	22
Tabelle 9: Variable Betriebskosten im Feldversuch I in [€/m ² a]	24
Tabelle 10: Annuitäten- und Diskontfaktoren.....	27
Tabelle 11: Fixe Betriebskosten [€/m ² a] Feldversuch I	27
Tabelle 12: Annuitätische Investitionskosten [€/m ² a]	28
Tabelle 13: Vermeidungskostenberechnung	29

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht entstand im Rahmen des Forschungsprojektes Connected Energy – Serviceorientierte Heimautomatisierungsplattform zur Energieeffizienzsteigerung (SHAPE).¹ Ziel des Projektes war die Entwicklung und Erprobung eines dezentralen Energiemanagements für den Einsatz im mehrgeschossigen Wohnungsbau sowie dessen Integration in die Architektur einer intelligenten Heimvernetzung des Innovationszentrums Connected Living².

Ziel des Arbeitspaketes 6 „Wissenschaftliche Auswertung und Transfer“ ist unter anderem die durch das dezentrale Energiemanagement realisierbaren Kosten- und Energieeffizienzpotenziale abzuschätzen (Task 6.2). Im Bericht „Geschäftsmodelle für den Zukunftsmarkt des dezentralen Energiemanagements in Privathaushalten“ (siehe Beucker et al. 2012) wurde bereits auf die Marktpotenziale und möglichen Beiträge der Technik zu den Energieeffizienzzielen der Bundesregierung eingegangen. Der vorliegende Bericht soll dagegen die Fragestellung vertiefen, welchen Beitrag das dezentrale Energiemanagement aus umweltpolitischer und (betriebs-)wirtschaftlicher Perspektive zur Erreichung der Energieeffizienzziele im Gebäudebereich leisten kann.

Dazu werden die CO₂-Vermeidungskosten eines dezentralen Energiemanagementsystems (Hausautomationssystem) mit denen des konventionellen Wärmeschutzes (Dämmung von Fassade und Dach, Tausch von Fenster, etc.), als der bisher vorherrschenden Variante der energetischen Sanierung, verglichen. Unter den CO₂-Vermeidungskosten werden in diesem Bericht die Kosten verstanden, die im Rahmen einer spezifischen Maßnahme zur Reduktion einer definierten Kohlendioxidmenge aufgewendet werden müssen. Üblicherweise werden die Ergebnisse der Berechnung von CO₂-Vermeidungskosten daher in Euro je Tonne vermiedenem Kohlendioxid (CO₂) angegeben. Die Ergebnisse einer solchen Berechnung lassen somit Rückschlüsse über die umweltpolitische und (betriebs-) wirtschaftliche Leistungsfähigkeit bzw. Effizienz der jeweiligen Maßnahme zu.

¹ Das Forschungsprojekt Connected Energy – SHAPE wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und dem Projektträger im DLR Konvergente IKT/ Multimedia gefördert (Förderkennzeichen 01MG10001A). Informationen zu dem Projekt SHAPE, seinen Projektpartnern und Ergebnissen sind unter www.connected-living.org/SHAPE verfügbar.

² Das Innovationszentrum Connected Living ist ein Zusammenschluss von Forschungsinstitutionen und Unternehmen auf dem Gebiet der intelligenten Heimvernetzung. Ziel des Zentrums ist es, Partner aus den verschiedenen Anwendungsbranchen Entertainment und Kommunikation, Versorgung und Haushalt, Energieeffizienz, Konsumelektronik, Sicherheit und Komfort, Gesundheit und häusliche Pflege einzubinden, um neue und zukunftsweisende Möglichkeiten der intelligenten Heimvernetzung sowie tragfähige Geschäftsmodelle zu entwickeln (siehe auch www.connected-living.org/).

Bei den verglichenen Systemen handelt es sich zum einen um ein Hausautomationssystem RIEcon der Firma Dr. Riedel Automatisierungstechnik GmbH, welches im Vorhaben SHAPE zu einem dezentralen Energiemanagementsystem weiterentwickelt wurde³. Für die Bewertung der Einsparleistung des Systems sowie der Investitionskosten kann auf Daten aus Umsetzungsvorhaben zurückgegriffen werden. Zum anderen wird für die Bewertung des konventionellen Wärmeschutzes auf Daten aus öffentlich verfügbaren Studien (beispielsweise der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (ARGE) e.V. bzw. der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena)) zurückgegriffen.

³ Ausführliche Informationen zu dem System, seinen Funktionen und seiner Integration in die Heimvernetzungsplattform des Innovationszentrums Connected Living sind auf den Webseiten des Vorhabens SHAPE (<http://www.connected-living.org/projekte/shape/>) bzw. den Seiten des Herstellers erhältlich (<http://www.riedel-at.de/>).

2 Berechnung von CO₂-Vermeidungskosten

Im Folgenden sollen sowohl für das RIEcon Hausautomationssystem als auch für konventionelle wärmeschutztechnische Sanierungsmaßnahmen im mehrgeschossigen Wohnungsbau, die der verbesserten Dämmung verschiedener Gebäudebauteile dienen, spezifische CO₂-Vermeidungskosten berechnet werden. Die hierbei in Anlehnung an Beer et al. (2009) angewandte Methode basiert auf der Berechnung „statischer Vermeidungskosten“, die eine Abschätzung des relativen wirtschaftlichen Potenzials oben genannter Maßnahmen unter der Annahme eines zeitlich konstanten Bezugssystems zulässt.

2.1 Grundlagen und Definitionen

Die CO₂-Vermeidungskosten einer spezifischen Maßnahme werden definiert als diejenigen Kosten, die ausgehend von einem statischen oder dynamischen Bezugssystem oder Referenzzeitpunkt zur Reduktion einer bestimmten Kohlendioxidmenge aufgewendet werden müssen (Beer et al. 2009, 12). Diese Vermeidungskosten werden im weiteren Verlauf in € pro Tonne CO₂ bzw. CO₂-Äquivalente⁴ [€/tCO₂e] ausgedrückt.

Die hier angewandte Berechnung erfolgt auf Basis einer Differenzbetrachtung (vgl. Wagner et al. 2004), in der sämtliche Investitionskosten sowie fixe und variable Betriebskosten der Maßnahmen und des jeweiligen Referenzsystems berücksichtigt werden und in Relation zu den spezifischen Emissionseinsparungen gesetzt werden. Technisch stellen sich die Vermeidungskosten VK somit als Quotient aus entsprechender Kosten- und Emissionsdifferenz zwischen Maßnahme m und Referenz ref wie folgt dar:

Formel 1:

$$VK_i = \frac{k_{mi} - k_{ref}}{e_{mi} - e_{ref}} = \frac{\Delta k_{mi}}{\Delta e_{mi}}$$

⁴ CO₂ ist das bekannteste Treibhausgas. Tatsächlich gibt es viele andere Treibhausgase (CH₄, N₂O, HFKW, FKW, etc.) die ebenfalls zur Klimaveränderung beitragen. Um ihren Beitrag am Klimawandel abschätzen zu können, werden sie in CO₂-Äquivalente umgerechnet. Ihr Erwärmungspotenzial wird somit in Relation zur Klimawirksamkeit von CO₂ gestellt.

k_{ref}	Annuitätische Kosten der Referenz in €/a
k_{mi}	Annuitätische Kosten der Maßnahme i in €/a
e_{ref}	Spezifische jährliche Emissionen der Referenz in tCO ₂ e/a
e_{mi}	Spezifische jährliche Emissionen der Maßnahme in tCO ₂ e/a
Δe_{mi}	Jährliche Emissionseinsparung durch die Maßnahme in tCO ₂ e/a
VK_i	Statische Vermeidungskosten der Maßnahme i

Quelle: Beer et al. 2009.

Wie in der Einleitung erwähnt, wird hier der Ansatz statischer Vermeidungskosten gewählt, bei dem davon ausgegangen wird, dass sich das Bezugssystem über den noch zu definierenden Betrachtungszeitraum nicht verändert. Somit wird von der Dynamik maßnahmenspezifischer Einsparpotenziale abstrahiert, die durch die zeitlich versetzte Implementierung bzw. Überlagerung verschiedener Maßnahmen verursacht werden könnten. Die hier betrachteten Maßnahmen sollen mit einem einheitlichen, gegenwärtigen **IST-Zustand als Referenzsystem** (zum Zeitpunkt t=0) verglichen werden (Beer et al. 2009, 17). Im Fokus stehen dabei zwei Varianten energetischer Sanierungsmaßnahmen deren Bezugssystem jeweils durch ein Typgebäude des unsanierten, mehrgeschossigen Altbaubestandes definiert wird (vgl. Kap. 3). Die Notwendigkeit der energetischen Sanierung wird vorausgesetzt.

Die Berechnungen der CO₂-Vermeidungskosten unterstellen in diesem Fall eine hypothetische Entscheidungssituation eines Gebäudeeigentümers, in der die Reduktion des Heizenergieverbrauchs und der daraus resultierenden Emissionen seines Altbaubestandes entweder durch entsprechende *konventionelle Wärmeschutzmaßnahmen* oder durch die Installation einer *modernisierten Heizungsanlage* in Form des *RIEcon Hausautomationssystems* realisiert werden kann. Innerhalb des **Betrachtungszeitraumes** der Durchführung werden jedoch keine weiteren Maßnahmen implementiert, so dass es wie bereits erwähnt zu keiner Dynamisierung der maßnahmenspezifischen Einsparpotenziale kommt. Der Betrachtungszeitraum wird in den nachfolgenden Berechnungen durch die **Lebensdauer** derjenigen Maßnahme bestimmt, die annahmegemäß am längsten Bestand hat (vgl. Kap. 3).

Anstatt die durchschnittliche jährliche Emissionsreduktion gegenüber dem Referenzsystem im gesamten Betrachtungszeitraum zu berücksichtigen, werden im Folgenden nur die im Vergleich zum Ausgangszustand zum Zeitpunkt t=0 erzielten Emissionseinsparungen herangezogen. Neben dem unterschiedlichen Informationsgehalt hinsichtlich indikativer Reduktionsziele (vgl. Beer et al. 2009, 18), spielt hierbei auch die zeitliche Begrenzung von Messdaten der im nachfolgenden Abschnitt vorgestellten Pilotprojekte eine Rolle. Die durch eine Maßnahme i (Wärmeschutz oder RIEcon System) im Vergleich zum Ausgangszustand (unsanierter mehrgeschossiger Bau aus den Jahren 1958 bis 1978) eingesparten CO₂-Emissionen stellen sich somit wie folgt dar:

Formel 2:

$$\Delta e_{mi} = e_{ref} \Big|_{t=0} - e_{mi}$$

Δe_{mi} Jährliche CO₂-Emissionsreduktion durch die Maßnahme gegenüber der Referenz zum Zeitpunkt t=0 in t/a

Quelle: Beer et al. 2009.

Die maßnahmenspezifische Emissionseinsparung bezogen auf den mit der Umsetzung einhergehenden Aufwand ergibt definitionsgemäß die CO₂-Vermeidungskosten dieser Maßnahme. Um sämtliche über den Betrachtungszeitraum anfallenden Kosten vom gegenwärtigen Standpunkt aus ökonomisch berücksichtigen und bewerten zu können, werden alle Kostenbestandteile der einzelnen Maßnahmen als auch ihrer Referenzsysteme in Annuitäten⁵ angegeben. Die berechneten Gegenwartskosten erfassen dadurch nicht nur singuläre Zahlungs- und Ertragsströme zu einem fixen Zeitpunkt, sondern auch die innerhalb des Betrachtungszeitraumes in ferner Zukunft liegenden Erträge, z. B. für Teil- oder Komplettersatzinvestitionen (Beer et al. 2009). Die detaillierte, auf die vorhandenen Daten angepasste Methode zur Berechnung dieser Annuitäten wird Gegenstand des Kapitels 4.1 sein. Alle in Annuitäten angegebenen Kostenbestandteile zusammen ergeben letztendlich die annuitätischen Maßnahmenkosten. Die jährlichen Maßnahmengesamtkosten k_{mi} der Maßnahme i stellen sich somit als Summe der annuitätischen Investitionskosten k_{mi}^{inv} , der jährlichen fixen und variablen Betriebskosten, k_{mi}^{fix} bzw. k_{mi}^{var} , dar. Sofern das Referenzsystem zum Zeitpunkt der Maßnahmendurchführung noch über einen Restwert $k_{ref,Rest}^{inv}$ verfügt, müsste auch dieser in die Kostenberechnung der Maßnahmen einfließen. Die jährlichen Maßnahmenkosten der Maßnahme i entsprächen daher dem folgenden Ausdruck:

Formel 3:

$$k_{mi} = k_{mi}^{inv} + k_{mi}^{var} + k_{mi}^{fix} + k_{ref,Rest}^{inv}$$

Quelle: Beer et al. 2009.

Hinsichtlich der jährlichen Gesamtkosten, die für das Referenzsystem aufgewendet werden müssen, k_{ref} , müssten zu dessen variablen und fixen Betriebskosten, k_{ref}^{var} und k_{ref}^{fix} , entsprechende annuitätische Investitionskosten, sowohl bezüglich des Restwertes der Erstinvestitionen $k_{ref,Rest}^{inv}$ als auch der

⁵ Eine Annuität ist eine regelmäßig, jährlich fließende Zahlung, die sich aus Zins und Tilgung zusammensetzt.

Ersatzinvestitionen innerhalb des Betrachtungszeitraums k_{ref}^{ersatz} hinzugerechnet werden. Gleichzeitig müssten Restwerte der Ersatzinvestitionen $k_{ref,Rest}^{ersatz}$, die über den Betrachtungszeitraum hinaus Bestand hätten, von den annuitätischen Gesamtkosten wieder subtrahiert werden. Somit stellen sich die jährlichen Gesamtkosten des Referenzsystems wie folgt dar:

Formel 4:

$$k_{ref} = k_{ref,Rest}^{inv} + k_{mi}^{var} + k_{ref}^{fix} + k_{ref}^{ersatz1} + \dots + k_{ref}^{ersatzN} - k_{ref,Rest}^{ersatzN}$$

Quelle: Beer et al. 2009.

Da für den Maßnahmenvergleich angenommen wird, dass der energetische Ausgangszustand der Referenzgebäude Sanierungsmaßnahmen unausweichlich macht, da dieser bspw. nicht dem durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) 2009 spezifizierten Altbaustandard⁶ entspricht, wird ein Restwert des bestehenden Wärmeschutzes folglich nicht berücksichtigt. Auch von Ersatzinvestitionen, die zum Erhalt des energetischen IST-Zustandes beitragen würden, wird aus diesem Grunde abstrahiert⁷.

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen und der genannten Kostenbestandteile, können die Vermeidungskosten (siehe Formel 1) folgendermaßen ermittelt werden:

Formel 5:

$$VK_i = \frac{(k_{mi}^{inv} + k_{mi}^{fix} + k_{mi}^{var}) - (k_{ref}^{var})}{\Delta e_{mi}} = \frac{\Delta k_{mi}^{var} + k_{mi}^{fix} + k_{mi}^{inv}}{\Delta e_{mi}}$$

k_{ref}^{var} Jährliche variable Kosten der Referenz in €/a

k_{mi}^{var} Jährliche variable Kosten der Maßnahme i in €/a

⁶ Die Energieeinsparverordnung (EnEV) aus dem Jahr 2009 schreibt bei Sanierung von Altbauten eine Reduktion des Energie-, Heizungs- und Warmwasserbedarf um 30 % vor (siehe ebd.)

⁷ Qualitativ beeinflusst eine Berücksichtigung zusätzlicher Kosten im Referenzsystem das Ergebnis des Maßnahmenvergleichs nicht, da sich die berechnete Kostendifferenz für beide Maßnahmen verbessern und folglich jeweils geringere Vermeidungskosten implizieren würde. Geringere Vermeidungskosten wiederum signalisieren ein verbessertes wirtschaftliches Umsetzungspotenzial beider Maßnahmen, so dass in quantitativer Hinsicht möglicherweise wichtige Informationen verloren gehen. Die Absicht der hier durchgeführten Vermeidungskostenberechnungen liegt jedoch im Maßnahmenvergleich, daher wird ein möglicher Informationsverlust hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen in Kauf genommen.

k_{mi}^{fix}	Jährliche fixe Betriebskosten der Maßnahme i in €/a
k_{mi}^{inv}	Annuitätische Investitionskosten der Maßnahme i in €/a
Δk_{mi}^{var}	Differenz der variablen Kosten zwischen Maßnahme i und Referenz in €/a
Δe_{mi}	Jährliche Emissionseinsparung durch die Maßnahme in tCO _{2e} /a
VK_i	Statische Vermeidungskosten der Maßnahme i

Quelle: Beer et al. 2009.

Die Bewertungsmethode, auf Basis derer Kosten und Erlöse in die Berechnungen miteinbezogen werden, erfolgt nach einem betriebswirtschaftlichen Ansatz. Dieser eignet sich das Umsetzungspotenzial einzelner Maßnahmen realistisch abzuschätzen, da Kosten- und Ertragsströme innerhalb des Betrachtungszeitraums aus der Perspektive des Investors/Gebäudeeigentümers einkalkuliert werden. Die Einbeziehung von sowohl Energiekosteneinsparungen als auch der Modernisierungsumlage⁸ – die sich auf die gleichen „Einnahmen“ bzw. vermiedenen Kosten beziehen, aber unterschiedlichen Nutznießern zugutekommen – entspricht nicht exakt der Vorgehensweise in Beer et al. (2009). Allerdings ist eine Berücksichtigung beider Faktoren bei der Investitionsentscheidung sinnvoll, da Kosten die die Mieter betreffen auch die Wertentwicklung der Immobilie beeinflussen. Qualitativ ändert diese Betrachtung nicht die Aussage des Maßnahmenvergleichs, da beide Faktoren für beide Maßnahmen berechnet werden. Ein volkswirtschaftlicher oder quasivolkswirtschaftlicher Berechnungsansatz, der zusätzlich zu den privaten Maßnahmenkosten und –erlösen sowohl negative als auch positive Externalitäten einbeziehen würde, kann aufgrund des damit verbundenen Aufwandes im Rahmen dieses Berichtes nicht durchgeführt werden.

2.2 Annahmen und wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Für die Vermeidungskostenberechnung müssen Annahmen für die in der Berechnung verwendeten wirtschaftlichen Parameter definiert werden. Dazu zählen die durchschnittliche Inflationsrate, die Diskontrate bzw. der Kalkulationszins, die Energiepreise und der Emissionsausstoß je verbrauchter Energieeinheit. Ein Überblick über diese Systemparameter gibt Tabelle 1:

⁸ Gemäß des Bürgerlichen Gesetzbuchs (BGB) § 559 kann der Vermieter „bauliche Maßnahmen und die dafür aufgewendeten Kosten, die den Gebrauchswert der Mietsache erhöhen, die Wohnverhältnisse auf Dauer verbessern oder nachhaltig Einsparungen von Energie oder Wasser bewirken (Modernisierung), mit bis zu 11 % auf die jährliche Kaltmiete umlegen“ (Beucker et al. 2012, 56).

Tabelle 1: Annahmen an die Berechnungsparameter

Laufzeit T (Jahre)	50
Zinssatz/Diskontrate i [%]	5 oder 3
Preis Elektrischer Strom p_{el} [€/kWh]	0,2531
Preis Fernwärme p_{fw} [€/MWh]	85,35
CO ₂ -Emissionen Fernwärme [g/kWh _{output}]	205,1
CO ₂ -Emissionen Strom [g/kWh _{output}]	544
Durchschnittliche Inflationsrate q [%]	1,5037
Inflationsfaktor	1,01537
Wechselkurs DM/€	1,9553

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Daten von Destatis 2012, Destatis 2011, Wagner et al. 2004, Beer et al. 2009, IHK Schleswig Holstein 2012, Beucker et al. 2012, Umweltbundesamt 2012.

Die angegebene Laufzeit von 50 Jahren wird als Lebensdauer konventioneller Wärmeschutzmaßnahmen unterstellt und beschreibt somit den Betrachtungszeitraum der Kostenberechnungen.

Die Diskontrate von 5 % orientiert sich an den in vergleichbaren Studien verwendeten Abzinsungsraten zukünftiger Erträge (vgl. Wagner et al. 2004; Beer et al. 2009). Der gewählte Diskontsatz, auch als Preis des zur Maßnahmendurchführung beschafften Kapitals interpretierbar, hat erheblichen Einfluss auf die Höhe der maßnahmenspezifischen Vermeidungskosten. Zur realistischeren Abbildung der am Kapitalmarkt erhältlichen Finanzierungsbedingungen für die hier betrachteten Investitionen bietet es sich daher an, die nachstehenden Berechnungen innerhalb eines Zinskorridors durchzuführen. Somit werden in separaten Szenarien alle Kosten- und Ertragsströme sowohl mit einem Zinssatz von 5 % als auch 3 %, als unterer Kapitalpreisgrenze, diskontiert. Intuitiv führt eine geringere Gegenwartspräferenz (geringerer Kalkulationszins) zu einer höheren Gewichtung zukünftiger Zahlungen (Erlöse) im Verhältnis zu gegenwärtigen Zahlungen (Erlösen), die dann besser über den Betrachtungszeitraum geglättet werden können, *ceteris paribus*. Der entsprechende Annuitätenfaktor (vgl. Kapitel 4.1) sinkt und mit ihm die annuitätischen Investitionskosten. Umgekehrt verhält es sich bei einem höheren Zinssatz. Die Wahl des Kalkulationszinsfußes hat somit erheblichen Einfluss auf die Höhe und womöglich das Vorzeichen spezifischer CO₂-Vermeidungskosten.

Die Wärmeversorgung der in Kapitel 3 vorgestellten Pilotgebäude, die mit dem RIEcon Hausautomationssystem ausgestattet wurden und deren Messdaten die Berechnungsgrundlage bilden, erfolgte jeweils über Fernwärme. Der Preis für Fernwärme p_{fw} von 85,35 € pro MWh, basiert auf Angaben des Fernwärme-Preisvergleichs 2011 der IHK Schleswig-Holstein (IHK Schleswig-Holstein 2012).

Der angegebene Strompreis p_{el} von 0,25 € pro kWh ist entstammt den Daten des Statistischen Bundesamtes für aktuelle Strompreise im Haushaltssektor (Destatis 2012). Auch das Mittel der Inflationsrate gründet auf einer Zeitreihe des Statistischen Bundesamtes (Destatis 2012).

Die Werte für Treibhausgasemissionen ausgewählter Energieträger in Gramm pro kWh-Output stammen aus verschiedenen Quellen. Die Kennzahl für CO₂-Emission, die durch den Verbrauch von Fernwärme verursacht werden, entspricht dem unter Kapitel 2.3.1 in Beucker et al. (2012) dokumentierten Wert für Fernwärme aus Kohle/HKW, der auf GEMIS-Daten des Ökoinstituts beruht. Der Emissionswert für Strom geht aus Berechnungen des Umweltbundesamtes für den deutschen Strom-Mix hervor (Umweltbundesamt 2012).

3 Datengrundlage für die Berechnung der CO₂-Vermeidungskosten

Die Berechnung der relevanten Parameter der Vermeidungskosten erfolgt für die jeweilige Maßnahme auf Basis unterschiedlicher Datensätze. Für die Maßnahme „Konventioneller Wärmeschutz“ werden Daten zu einzelnen Kostenbestandteilen/Erlösen und dem Energieverbrauch bzw. den Emissionen einer repräsentativen Studie der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (ARGE) e.V. entnommen. Das „RIEcon Hausautomationssystem“ wurde bereits in mehreren Pilotprojekten installiert, so dass auf Messwerte zurückgegriffen wird, die im Rahmen zweier Feldversuche gewonnen werden konnten. Zu beachten ist, dass aufgrund der unterschiedlichen Ausgangsobjekte und Daten die Referenzsysteme der Maßnahmen nicht identisch sind. In den wichtigsten Punkten gibt es jedoch Übereinstimmungen, so dass die Vergleichbarkeit der zu beobachtenden Unterschiede bei den Kosten und Emissionen gewährleistet ist.

3.1 Konventioneller Wärmeschutz: Studie der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (ARGE) e.V.

Die für die Berechnung der Vermeidungskosten des „konventionellen Wärmeschutzes“ herangezogenen Daten entstammen einer Studie von Walberg et al. (2011), die im Auftrag von Verbänden, unter anderem des Baugewerbes, durchgeführt wurde, die der bundesweiten Kampagne „Impulse für den Wohnungsbau“ angehören. Die Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (ARGE) e.V. untersucht darin die Entwicklung „der bestehenden Bausubstanz im weitgehend selbstgenutzten Wohnungsbau der Ein- bis Zweifamilienhäuser und der kleineren Mehrfamilienhäuser (drei bis zwölf Wohnungen) im vermieteten Wohnungsbau“ (Walberg et al. 2011).

Auf Grundlage von Befragungen und Daten aus eigenen Archiven, des Statistischen Bundesamtes, der Länder und weiterer Institutionen wurde eine Bestandsaufnahme nach Bautyp, Baualtersklasse, dem baulichen Zustand der untersuchten Gebäude und dem Modernisierungsgrad erstellt. Die von der ARGE erstellte Gebäudetypologie dient als Ausgangsbasis für die Kosten- und Emissionsberechnungen des „konventionellen Wärmeschutzes“ und dessen Referenzsystem. Letzteres entspricht dabei einem kleineren Mehrfamilienhaus mit zwölf Wohneinheiten, das in den Jahren 1958 bis 1968 erbaut wurde und im Ausgangszustand als „nicht modernisiert“ klassifiziert werden kann (vgl. Walberg et al. 2011, 71). Die Einordnung des Ausgangszustandes erfolgt entlang der Kategorien „nicht modernisiert“, „gering modernisiert“ und „mittel/größtenteils modernisiert“. Diese Klassen wurden unter Berücksichtigung der Entwicklung gesetzlicher, energetischer Standards ermittelt (vgl. Walberg et al. 2011, 57):

Tabelle 2: Gebäudetypisierung Walberg et al. 2011

Ausgangszustand	Energetischer Standard
„Nicht modernisiert“	Standard vor Wärmeschutzverordnung 1977 (vor WSchV 1977)
„Gering modernisiert“	Standard nach Wärmeschutzverordnung 1977/1984 (nach WSchV 1977/1984)
„Mittel/größtenteils modernisiert“	Standard nach Wärmeschutzverordnung 1995 (nach WSchV 1995)

Quelle: Walberg et al. 2011.

Des Weiteren werden für den in Kapitel 4 angestrebten Maßnahmenvergleich zwei Varianten des „konventionellen Wärmeschutzes“ berücksichtigt, die Teil des in der ARGE-Studie aufgeführten Maßnahmenportfolios sind. Demzufolge wird nachstehend zwischen Wärmeschutzmaßnahmen unterschieden, die den Energieverbrauchsstandards der EnEV 2009 entsprechen oder diese unterschreiten. Diese beziehen sich vor allem auf Ziele zur Reduktion von Transmissionsverlusten verschiedener Gebäudekomponenten, gibt jedoch auch Richtwerte für den Endenergieverbrauch vor. Somit fallen unter den „konventionellen Wärmeschutz“ im Wesentlichen Maßnahmen, die zur verbesserten Dämmung verschiedener Bauteile wie Dach, Fassade und Fenster beitragen. Um die Vergleichbarkeit der CO₂-Vermeidungskosten des „konventionellen Wärmeschutzes“ zu denen des „RIEcon Systems“ in beiden Fällen zu gewährleisten, muss auch letzteres mindestens die Standards der EnEV 2009 erfüllen. Dies wird, wie weiter unten dokumentiert, der Fall sein. Bezogen auf die reine Wohnfläche darf der durchschnittliche Endenergieverbrauch inklusive Warmwasser und solarer Wärmegewinnung bei mehrgeschossigen Bestandswohngebäuden 172,3kWh/m²a betragen. Für Bestandsgebäude, die den Standards der EnEV 2009 genügen sollen, liegt dieser Wert lediglich bei 120kWh/m².

Die in der ARGE-Studie ermittelten Daten für das oben definierte Referenzgebäude, in dem Wärmeschutzmaßnahmen durchgeführt wurden, die unter den Standards der EnEV 2009 liegen (<EnEV 2009), geben einen durchschnittlichen Endenergieverbrauch von 142 kWh/m² pro Jahr aus. Entsprechen die Wärmeschutzmaßnahmen den Standards der EnEV 2009, sinkt der jährliche Endenergieverbrauch auf 84 kWh/m² (vgl. Walberg et al. 2011). Die einmalig anfallenden Investitionskosten für die jeweilige Sanierungsmaßnahme, bezogen auf die Wohnfläche, betragen 173 €/m² beziehungsweise 320 €/m². Das Referenzgebäude des Typs „M68: Nicht Modernisiert“ (Walberg et al. 2011) weist im Ausgangszustand einen Endenergieverbrauch von 183 kWh/m²a auf. Tabelle 3 fasst die Energiekennzahlen und Investitionskosten beider Varianten des „konventionellen Wärmeschutzes“ zusammen:

Tabelle 3: Energiekennzahlen und Investitionskosten „Konventioneller Wärmeschutz“ Gebäudetyp M68

Ausgangslage: nicht modernisiert	Kosten [€/m ²]	Endenergieprognose [kWh/m ² a]
IST-Zustand	-	183,00
KINV (<EnEV2009-Standard)	173,00	142,00
KINV (EnEV2009-Standard)	320,00	84,00
IMOD (<EnEV2009-Standard)	2,52	-
IMOD (EnEV2009-Standard)	6,07	-

Quelle: Walberg et al. 2011.

Die Wahl des Gebäudetyps „M68: Nicht Modernisiert“ als Referenzsystem für den „konventionellen Wärmeschutz“ erfolgt aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Referenzgebäuden des nachfolgend vorgestellten Falles des Hausautomationssystems. Der Transmissionswärmeverluste der Gebäude im Ausgangszustand ist hierfür das entscheidende Kriterium. So wird von der ARGE für den Typ M68, („nicht modernisiert“) ein U-Wert von 1,37 W/m²K angesetzt (Walberg et al. 2011). Für die Referenzgebäude der beiden folgenden Feldversuche wurde anhand eigener Berechnungen ein mittlerer U-Wert von 1,57 W/m²K ermittelt, so dass von näherungsweise gleichen Ist-Zuständen vor Maßnahmenimplementierung ausgegangen werden kann.

3.2 RIEcon Hausautomationssystem- Feldversuch I

Da für die maßnahmenspezifischen Kostenbestandteile und CO₂-Emissionen Daten aus unterschiedlichen Feldversuchen zur Verfügung stehen, werden versuchsspezifische Vermeidungskosten der Maßnahme „RIEcon Hausautomationssystem“ berechnet. Dies ermöglicht eine Analyse der Faktoren, die möglicherweise unterschiedliche Vermeidungskosten für dieselbe Maßnahme verursachen.

Die Daten des ersten Feldversuchs wurde zwischen den Jahren 1999 und 2001 im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Pilotprojektes erfasst (Riedel et al. 2002). Dieses Projekt zielte auf die wärmetechnische Grundsanierung eines um 1977 erbauten Plattenbaus vom Typ P2/6 mit 65 Wohneinheiten in der Potsdamer Allee 4 - 12 in Eberswalde ab.⁹ Neben einem verbesserten Vollwärmeschutz umfasste das Maßnahmenpaket auch die Installation des RIEcon Hausautomationssystem. Die folgende Auflistung (Riedel et al. 2002, Anhang C, 16) beschreibt die einzelnen Maßnahmen, sowie die zeitliche Zuordnung ihrer Implementierung:

⁹ Es sei angemerkt, dass die Sanierung gemäß energetischer Standards der EnEV1999 erfolgte. Dennoch kann nachstehend gezeigt werden, dass die mit dem RIEcon System ausgestatteten Gebäude auch Energieverbrauchs-Standards gemäß EnEV2009 erfüllen.

Zeitraum Juli bis Dezember 1999

- Vollwärmeschutz der Gebäudehülle
- Wärmedämmung Decke Sockelgeschoß, Bodenplatte, Dach
- Austausch von Fenstern (mit integrierten ALD)
- Montage der Hausanschluss-Station
- Montage der Solaranlage auf dem Dach.

Zeitraum Juli bis September 1999

- Montage der Heizungsanlage
- Montage der Komponenten zur Einzelraum-Temperaturregelung
- Sanierung der Abluftschächte
- Montage der Komponenten zur Lüftungssteuerung.

Die Teilsysteme zur Gebäudeautomation im Pilotgebäude untergliedern sich in die Komponenten zur Steuerung der Anlagentechnik und in die zur Messwerterfassung in der Hausanschluss-Station:

- Regieregler RIEcon MRC
- Kompaktregler RIEconMRE
- Gebäudezentrale Lüftung RIEconETR100
- Knotencontroller RIEconDLB02
- Gebäudezentrale RIEconWRE100
- Steuer- und Meß-PC RIEcon1000
- Wohnungsmanager RIEconR50
- Raumelektronik RIEcon10
- Ventiltrieb RIEconSTE
- Abluftventilsteuerung RIEconR45L
- Universalregler RIEcon36

Der gebäudespezifische Endenergie- beziehungsweise Heizenergieverbrauch wurde sowohl vor als auch nach den Sanierungsmaßnahmen erfasst. Nach Beendigung der Sanierung wurden für die Zeiträume 1.1.2000 bis 31.12.2000 und 1.1.2001 bis 31.12.2001 Messdaten erhoben, die einen Rückschluss auf den gebäudespezifischen Emissionsausstoß nach Implementierung der Maßnahme "RIEcon Hausautomationssystem" zulassen. Tabelle 4 liefert einen Überblick über die für die Berechnungen relevanten Energiekennzahlen:

Tabelle 4: Energiekennzahlen (Feldversuch Potsdamer Allee, Eberswalde)

	Modernisierter Wärmeschutz mit RIEcon	Modernisierter Wärmeschutz mit RIEcon	Modernisierter Wärmeschutz	Unsanierter Zustand (Referenzsystem)
Messzeiträume	1.1.01-31.12.01	1.1.00-31.12.00	1.1.99-31.12.99	1.1.98-31.12.98
Normierungsgrößen				
Wohnfläche (m ²)	3.416,37	3.416,37	3.416,37	3.416,37
Wohnungseinheiten (WE)	65	65	65	65
Energieverbrauchskennwerte [kWh _{th} /m ² a]				
EVK _{Heiz}	63,6	61,6	120,8	158,9
Elektroenergieverbräuche Anlagentechnikkomponenten [MWhel/a]				
ELT Einzelraumregelung	1,37	2,17	-	-
ELT HAST (Hausautomationssteuerung)	3,61	3,44	-	-
ELT Lüftungssteuerung	2,39	1,52	-	-
ELT Lüfter	5,47	6,32	-	-
ELT _{TOT}	12,84	13,45	-	-

Quelle: Riedel et al. 2002.

Die für die Berechnung der maßnahmen- beziehungsweise referenzsystembezogenen Emissionen relevante Energieverbrauchskennzahl, ist die für den Heizwärmebedarf, EVK_{Heiz}. Diese gibt den Heizbedarf ohne solare Erträge an. Nach Durchführung der Sanierungsmaßnahmen entsteht der jeweilige Wert nach Berücksichtigung (Riedel et al. 2002, 29):

- der energetischen Sanierung der Gebäudehülle,
- der Rekonstruktion der Gebäudetechnik, sowie den aktiven Automatisierungsfunktionen,
- der Einzelraumtemperaturregelung mit Heizkostenerfassung und –verteilung,
- der bedarfsgerechten Heizkurvenadaption sowie
- der bedarfsgerechten Koordination der Heizungs- und Lüftungssteuerung.

Im Ausgangszustand des Gebäudes, der das Referenzsystem des Feldversuches I zum Gebäude mit RIEcon Hausautomation darstellt, ergibt sich gemäß Tabelle 2 somit ein EVK_{Heiz} von $158,9 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. In Kapitel 4 wird dieser Wert zur Emissionsberechnung des Referenzgebäudes herangezogen.

Für das gleiche Gebäude, welches nun jedoch mit einem verbesserten Wärmeschutz und der Automationstechnik ausgestattet ist, ergeben die Messungen des EVK_{Heiz} für die Bewertungszeiträume 2000 und 2001 jeweils $61,6 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ beziehungsweise $63,6 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Für den angestrebten Vergleich muss nun der durch den Wärmeschutz eingesparte Heizenergiebetrag hinzuaddiert werden. So erhält man eine Kennzahl, die den EVK_{Heiz} eines Gebäudes vom Typ des Referenzgebäudes angibt, das nur mit dem RIEcon System modernisiert wurde.

Da die auf den Energieverbrauch bezogenen Messungen im Feldversuch I erst nach Installation aller Modernisierungsmaßnahmen durchgeführt wurden, stehen Daten anteiliger Einsparungen der Einzelmaßnahmen nicht zur Verfügung. Hierfür wird auf Berechnungen des Fraunhofer Instituts für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI) und des Instituts für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. der TU Berlin zurückgegriffen (Riedel et al. 2002). Diese beinhalten die anteiligen Einsparungen der RIEcon Systemkomponenten sowie der Wärmedämmung im Einzelnen. Bei der Ermittlung dieser Kennzahlen konnte auf ein Datensample zurückgegriffen werden, welches aus einer Vielzahl von Projekten wie den hier vorgestellten gewonnen werden konnte.

Letztendlich belaufen sich die Einsparungen, die im Durchschnitt durch Wärmedämmung und das RIEcon System erzielt werden können jeweils auf $50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Folglich werden die aus zusätzlicher Wärmedämmung gewonnenen Heizenergieeinsparungen von $50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ auf die genannten EVK_{Heiz} -Werte der Jahre 2000 und 2001 aufgeschlagen, um so zu einem EVK_{Heiz} des Typ P2/6 Gebäudes mit RIEcon System ohne Wärmedämmung von $111,6 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ beziehungsweise $113,6 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ zu gelangen. Um die gesamten durch die Maßnahme verursachten Emissionen abzubilden, muss zudem der Eigenstromverbrauch des Hausautomationssystems berücksichtigt werden¹⁰. So verbraucht das System in Form von Stellantrieben, Mess- und Steuerungseinheiten, etc. Strom, der durch die Kennzahl ELT_{TOT} wiedergegeben wird. Dieser ergibt für das Jahr 2000 einen Hilfsenergieverbrauch von $13,5 \text{ MWh}$ pro Jahr und für den Messzeitraum 2001 $12,84 \text{ MWh}$ pro Jahr.

Zur Berechnung der Kosten, die innerhalb des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren durch die Installation des RIEcon Systems anfallen, werden die entsprechenden Daten des Feldversuchs I in **variable** und **fixe Betriebskosten**, sowie **annuitätische Investitionskosten** untergliedert, so dass sich die Komplettkosten der Maßnahme als Summe der genannten Bestandteile zusammensetzt. In Tabelle 5 sind sowohl Erstinvestitionskosten als auch Teil- und Komplettersatzkosten aufgeführt. Die für das Pilotgebäude berechneten Investitionskosten (NOMK_{INV}) betragen 65 DM/m^2 und somit rund $3.416,37 \text{ DM}$ pro Wohnungseinheit. Der entsprechende Betrag in Euro des Jahres 2012 beläuft sich auf

¹⁰ Eine Berücksichtigung des Eigenstromverbrauchs des Hausautomationssystems ist notwendig, um die Nettoeinsparung zu ermitteln. Hierbei handelt es sich ausdrücklich nicht um die Ermittlung lebenszyklusweiter Energieverbräuche im Sinne einer Ökobilanz. Dies würde weitaus größeren Aufwand erfordern und vor allem auch, die Erfassung der in der Herstellungs- und Entsorgungsphase anfallenden Ressourcenverbräuche erfordern.

39,92 €₂₀₁₂/m² beziehungsweise 2.098,18 €₂₀₁₂ pro Wohneinheit.¹¹ Ferner wird bei der Berechnung der Vermeidungskosten angenommen, dass ein Teilersatz in Höhe von 6,47 €₂₀₁₂/m² nach 20 Jahren und Komplettersatz der Hausautomationstechnik in Höhe von 23,49 €₂₀₁₂/m² nach 40 Jahren notwendig wird.¹² Da es sich hierbei um zukünftige Kostenströme handelt, wurden die Werte bereits mit dem entsprechenden Faktor diskontiert und spiegeln somit den Barwert der jeweiligen Investition im Jahr 2012 wider.

Aus Vermieter- bzw. Investorensicht sind neben den Investitionskosten auch die mit der Maßnahme verbundenen staatlichen Refinanzierungsinstrumente relevant. Daher wird in den unten aufgeführten Berechnungen der einzelnen Maßnahmenkosten auch eine warmmietneutrale Modernisierungumlage berücksichtigt. Sofern durch Modernisierungsmaßnahmen nachhaltige Energieeinsparungen ermöglicht werden, können laut Mietgesetz (siehe §559 BGB) warmmietneutrale Erhöhungen der Netto-Jahresmiete begrenzt auf 11 % der reinen Modernisierungsaufwendungen durchgeführt werden. Warmmietneutralität ist gewährleistet, sofern der modernisierungsbedingte Aufschlag auf die monatliche Nettokaltmiete den durch die Maßnahme eingesparten monatlichen Energiekosten auf Basis heutiger Energiepreise entspricht (vgl. Discher 2010, 50). Der in Tabelle 5 unter I_{MOD} aufgeführte Wert entspricht näherungsweise dieser Definition, wurde jedoch nicht auf Basis der konkret eingesparten Energiekosten berechnet, sondern basiert auf Angaben der zugrundeliegenden Studie zum Feldversuch I. Da im zweiten Feldversuch annahmegemäß der gleiche Betrag an Heizenergie eingespart wird, wird auch hier der gleiche Wert für I_{MOD} unterstellt. Für den „konventionellen Wärmeschutz“ wird die Modernisierungumlage gemäß obiger Definition anhand konkreter Energiekosteneinsparungen berechnet.

¹¹ Der diesbezüglich unterstellte Inflationsfaktor kann Tabelle 1 entnommen werden.

¹² Daten zu Investitionskosten für Teil- und Komplettersatz wurden dem Abschlussberichts des im folgenden Kapitel vorgestellten Feldversuches im Albert-Schweitzer-Viertel in Berlin-Friedrichshagen entnommen.

Tabelle 5: Investitionskosten (Feldversuch Potsdamer Allee, Eberswalde)

	RIEcon System
	[Lüftungssteuerung/ Wärmeleistungsadaption/ Einzelraumregelung]
NOMK _{INV} [DM/m ²] (durchschn. WE-Fläche 50m ² -70m ²)	65,00
NOMK _{INVTOT} [DM] (durchschn. WE-Fläche 50m ² -70m ²)	222.064,05
NOMI _{MOD} [DM/m ² Monat] (Modernisierungsumlage 11% auf die Kaltmiete)	0,52
KINVBRUTTO[€/m ²] (durchschn. WE-Fläche 50m ² -70m ²)	39,92
K _{INVTOT} [€2012] (durchschn. WE-Fläche 50m ² -70m ²)	136.381,92
K _{TETOT} [€2012] [Mehrkosten für Teilersatz nach 20 Jahren]	22.113,32
K _{KETOT} [€2012] [Mehrkosten für Komplettersatz nach 40 Jahren]	80.252,06
K _{TE} [€ ₂₀₁₂ /m ²]	6,47
K _{KE} [€ ₂₀₁₂ /m ²]	23,49
I _{MOD} [€/m ² a] (Modernisierungsumlage 11% auf Kaltmiete)	3,23

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Daten von Riedel et al. 2002.

Tabelle 5 gibt zudem Auskunft über die fixen Betriebskosten des Hausautomationssystems, die sich gemäß Herstellerangaben aus Instandhaltungs-, Inspektions- sowie Batteriewechselkosten zusammensetzen. Während Inspektionskosten, K_{INSP} , nach Maßnahmendurchführung jährlich anfallen, müssen jährliche Instandhaltungskosten, K_{INST} , aufgrund von Garantie erst nach fünf Jahren berücksichtigt werden. Ferner müssen die Batterien der Anlagenkomponenten alle 2,5 Jahre gewechselt werden, so dass innerhalb der Lebensdauer entsprechende periodische Zahlungsströme, K_{BATT} , hinzugerechnet werden müssen. Die zur Verfügung stehenden Werte in € pro Wohnungseinheit können Tabelle 6 entnommen werden. Diese werden später auf die entsprechende Wohnfläche umgerechnet.

Tabelle 6: Inspektions- und Instandhaltungskosten

K_{INSP} [€/WE a]	11,00
K_{INST} [€/WE a] (Nach Garantiezeit = 5 Jahre)	67,45
K_{BATT} [€/WE] (alle 2,5 Jahre)	30,00

Quelle: Riedel 2002.

3.3 RIEcon Hausautomationssystem- Feldversuch II

Der zweite Datensatz, auf dessen Grundlage CO₂-Vermeidungskosten des RIEcon Systems berechnet werden, basiert auf einem Feldversuch, der in den Jahren 2001 bis 2003 durchgeführt wurde. Im Rahmen eines vom BMWi geförderten Modellvorhabens wurden im Albert-Schweitzer-Viertel (ASV) in Berlin-Friedrichshagen in zwei Wohnblöcken, ASV 21-30 und ASV 31-40, des Gebäudetyps P2 jeweils unterschiedliche Sanierungsmaßnahmen durchgeführt. Während die Gebäudehälften in ASV 31-40 sowohl mit hochmodernem Vollwärmeschutz als auch mit innovativen Heizungs- und Belüftungssystemen ausgestattet wurden, wurden im Nachbargebäude ASV 21-30 konventionelle Wärmeschutzmaßnahmen und Lüftungsanlagen implementiert. Im Einzelnen erfolgte die Modernisierung in den folgenden Etappen (Brüggemann et al. 2004):

- Haustechnik, Lüftung, Heizung, Sanitär, Elektro: Juli bis September 2001
- Dachabdichtung, Montage Solarkollektoren: Juni bis August 2001
- Wärmepumpe: Juli bis August 2001
- Fensteraustausch: Juli bis August 2001
- Balkonsanierung: Mai bis Juli 2001
- Fassadendämmung: August bis Oktober 2001
- Heizungsanpassung: bis Januar 2002
- Sanierung Treppenhäuser, Eingangsüberdachungen: August bis November 2001
- Wohnumfeldmaßnahmen: Frühjahr 2002

Die bereits in Kapitel 3.2 im ersten Feldversuch aufgeführten Anlagenkomponenten des RIEcon Systems wurden auch in der ersten Hälfte des Gebäudeblocks ASV 31-40 installiert. In der anderen Gebäudehälfte wurde ein alternatives Heizungs- und Lüftungskonzept der Firma Conit eingebaut. Insgesamt besteht jeder Gebäudeblock aus hundert Wohneinheiten mit insgesamt 5078,4 m² Wohnfläche. Somit sind 50 Wohneinheiten mit dem Riedel und weitere 50 mit dem Conit Heizungs- und Lüftungssystem ausgestattet. Es wird im Folgenden angenommen, dass die genannte Wohnfläche auf alle Wohneinheiten gleich verteilt ist. Tabelle 7 fasst neben den Normierungsgrößen die zur Berechnung maßnahmen-/ referenzspezifischer Emissionen benötigten Energieverbrauchskennzahlen zusammen:

Tabelle 7: Energiekennzahlen für die Bewertungszeiträume (Feldversuch Albert-Schweitzer Viertel, Zeitraum 1.1.2002 - 31.12.2003)

	RIEcon System ohne WS	Unsanierter Zustand (Referenzsystem)
Normierungsgrößen		
Wohnfläche (m ²)	2.539,20	2.539,20
Wohneinheiten (WE)	50	50
Heizenergieverbrauchskennwerte [kWh/m ² a]		
$EVK_{\text{Heiz}} = Q_{a,\text{Heiz,ber}} / F_{\text{Wohn}}$	116	180
Elektroenergieverbrauch Anlagenkomponenten [kWh/m ² a]		
ELT_{TOT}	2,73	-

Quelle: Brüggemann et al. 2004.

Mit Blick auf die vergleichsweise hohen Investitionskosten von 188.600 €₂₀₀₂ im Feldversuch II, wird im Abschlussbericht auf „Sonderlösungen im Projekt Albert-Schweitzer-Viertel“ bei der Installation des RIEcon Systems hingewiesen. Entsprechend wurden Wirtschaftlichkeitsberechnungen sowohl für diesen Sonderfall als auch für ein „RIEcon Standard System“ mit Erstinvestitionskosten in Höhe von 130.133 €₂₀₀₂ angestellt.¹³ Beide Fälle werden in Tabelle 8 zusammengefasst. Zur besseren Vergleichbarkeit wird die im Abschlussbericht des ersten Feldversuches genannte Modernisierungsumlage I_{MOD} in Höhe von 3,23 €/m²a angenommen. Die Angaben über Teil- und Komplettersatzkosten entstammen dem Bericht des zweiten Feldversuches (siehe Fußnote 12).

Des Weiteren werden die in Tabelle 6 aufgeführten fixen Betriebskosten auch für die Vermeidungskostenberechnungen auf Basis des zweiten Feldversuches verwendet.

¹³ Der zur Berechnung der Investitionskosten in 2012-Preisen herangezogene Inflationsfaktor entspricht dem im vorangegangenen Kapitel verwandten Inflationsfaktor aus Tabelle 1

Tabelle 8: Investitionskosten (Feldversuch Albert-Schweitzer-Viertel 31-35, Zeitraum 2002 - 2003)

	RIEcon-System	RIEcon-System-Standard
NOMK _{INV} (Investitionskosten in 2002 Preisen) [€ ₂₀₀₂]	188.600,00	130.133,00
K _{INVTOT} (Bruttoinvestitionskosten) [€ ₂₀₁₂]	219.677,19	151.576,10
K _{TETOT} [€ ₂₀₁₂] [Mehrkosten für Teilersatz nach 20 Jahren]	22.113,32	22.113,32
K _{KETOT} [€ ₂₀₁₂] [Mehrkosten für Komplettersatz nach 40 Jahren]	80.252,06	80.252,06
K _{INVBRUTTO} [€ ₂₀₁₂ /m ²]	86,51	59,69
K _{TE} [€ ₂₀₁₂ /m ²]	8,71	8,71
K _{KE} [€ ₂₀₁₂ /m ²]	31,61	31,61
I _{MOD} [€/m ² a] (Modernisierungsumlage 11 % auf die Kaltmiete)	3,23	3,23

Quelle: Brüggemann et al. 2004.

4 Ergebnisse der Berechnung von CO₂-Vermeidungskosten

Auf Basis der in Kapitel 2 beschriebenen Methode und Rahmenbedingungen sowie der in Kapitel 3 aufgeführten Daten wurden Berechnungen der CO₂-Vermeidungskosten für die Maßnahmen „Konventioneller Wärmeschutz“ und „RIEcon Automationssystem“ durchgeführt. Im folgenden Abschnitt sollen die Berechnungen zunächst detailliert nachvollzogen werden. Danach sollen die Ergebnisse einzeln analysiert und ein Maßnahmenvergleich durchgeführt werden.

4.1 Berechnung der CO₂-Vermeidungskosten

Die Berechnungen der Vermeidungskosten erfolgen nach der in Kapitel 2 dargestellten Methode, die sich in drei Schritte aufteilt. Zunächst werden variable und fixe Kostenbestandteile sowie annuitätische Investitionskosten separat auf gegebener Datenbasis errechnet und zu den spezifischen Maßnahmenkosten aufaddiert. Im nächsten Schritt erfolgt die Berechnung der Kostendifferenz zwischen Maßnahme und Referenzsystem, die dann im letzten Schritt ins Verhältnis zu den jeweiligen Emissionseinsparungen gesetzt wird.

Die jährlichen variablen Betriebskosten der Maßnahmen k_{mi}^{var} , als auch der Referenzsysteme k_{ref}^{var} , bestehen nachfolgend lediglich aus jährlichen Energiekosten K_{EV} für Heizenergie K_{HEIZ} und elektrischer Energie K_{ELT} . Dabei fallen zusätzliche Kosten für elektrische Energie nur beim RIEcon System an, da diese für den Betrieb der einzelnen Anlagenkomponenten benötigt wird (vgl. Tabelle 4). Die variablen Kosten der Maßnahme „Konventioneller Wärmeschutz“ und der jeweiligen Referenzsysteme entsprechen somit lediglich den jährlichen Kosten für Heizenergie. Der Wert K_{ELT} ergibt sich jeweils als Produkt des in Tabelle 1 ausgezeichneten Strompreises p_{el} i.H.v. 0,25 €/kWh und dem jährlichen Gesamtanlagenverbrauch an Strom ELT_{TOT} [kWh/m²a]. Die jährlichen Heizkosten K_{HEIZ} entsprechen dem Produkt des jeweiligen EVK_{Heiz} [kWh/m²a] und dem in Tabelle 1 angegebenen Fernwärmepreis p_{fw} i.H.v. 85,35 €/kWh. Folglich ergibt sich für die Maßnahme „RIEcon System“ der variable Kostenbestandteil aus:

Formel 6:

$$k_{mi}^{var} = K_{EV} = K_{ELT} + K_{HEIZ} = ELT_{TOT} \times p_{el} + EVK_{HEIZ}.$$

Quelle: Beer et al. 2009.

Tabelle 9 stellt die Berechnung der variablen Betriebskosten der Maßnahme „RIEcon System Feldversuch I“ und des entsprechenden Referenzgebäudes exemplarisch dar.

Tabelle 9: Variable Betriebskosten im Feldversuch I in [€/m²a]

	Ausgangszustand	RIEcon ohne WS
K _{Heiz} (EVK _{Heiz} *p _{fw})	13,56	9,61
K _{ELT} (ELT _{TOT} *p _{el})	-	0,97
K _{EV} (Energiekosten)	13,56	10,58

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Daten von Brüggemann et al. 2004.

Die Berechnung der fixen Betriebskosten und annuitätischen Investitionskosten gestaltet sich zumindest im Fall des RIEcon Systems als wesentlich komplexer und erfordert zuvor einige methodische Erläuterungen. Ziel ist die Berechnung einer Kostenkennzahl, die gemäß der oben genannten Annuitätenmethode alle gegenwärtigen und zukünftigen Zahlungsströme als konstante, jährliche Zahlungen angibt.

Um annuitätische Kosten zu berechnen, wird das Kostenkalkül eines Investors, hier der Vermieter, unterstellt. Dieser wird im Hinblick auf die jeweilige Investitionsentscheidung I_0 in eine CO₂-Vermeidungsmaßnahme wie dem RIEcon System indifferent sobald dessen Kapitalwert KW_0 hinreichend groß bzw. gleich Null ist. Sofern zukünftige Teil- oder Komplettersatzinvestitionen I_t seitens des Investors zu berücksichtigen sind, müssen auch die entsprechenden Barwerte einkalkuliert werden. $\{Z_t\}_{t=0}^{50}$ ist der periodische, konstante Strom an Ausgaben und Erträgen, die unmittelbar mit der Investition verknüpft sind und innerhalb des Betrachtungszeitraumes T=50 Jahren anfallen, während i der unterstellte Zins (Diskontrate) ist. Es sei angemerkt, dass in $\{Z_t\}_{t=0}^{50}$ auch die oben dargestellten jährlichen Energiekosten enthalten sind. Die Annahme eines konstanten Energiekostenstroms erleichtert die weiteren Berechnungen erheblich, ermöglicht jedoch in quantitativer Hinsicht keine Abbildung möglicher Energiepreissteigerungen¹⁴. Die annuitätischen Investitionskosten ergeben sich dann zu:

¹⁴ Dieser Kritikpunkt wird jedoch ebenfalls durch die Prognosegüte von Energiepreissteigerungen, die bei den meisten Wirtschaftlichkeitsberechnungen mehr oder weniger *ad hoc* unterstellt werden, relativiert. Ferner sind sowohl Maßnahmen als auch Referenzsysteme gleichermaßen von Gaspreis- bzw. Fernwärmepreissteigerungen betroffen, so dass in dieser Hinsicht zumindest keine qualitativen Auswirkungen auf das Ergebnis zu erwarten sind. Der Anteil elektrischer Hilfsenergie am oben definierten Gesamtenergieverbrauch pro Flächeneinheit macht weniger als 1 % aus, so dass zukünftige Strompreissteigerungen irrelevant für den Kostenvergleich in €/m²a erscheinen.

Formel 7:

$$AN = \frac{(1+i)^T * i}{(1+i)^T - 1} * I_0 + \frac{(1+i)^T * i}{(1+i)^T - 1} * \frac{I_t}{(1+i)^t} + \frac{(1+i)^T * i}{(1+i)^T - 1} \left(\sum_{t=0}^{50} \frac{Z_t}{(1+i)^t} \right),$$

Quelle: Beer et al. 2009.

wobei $\sum_{t=0}^{50} \frac{Z_t}{(1+i)^t}$ den Barwert (BW) aller Zahlungsströme und $\frac{(1+i)^T * i}{(1+i)^T - 1}$ den zugehörigen Annuität

tätenfaktor (ANF) darstellt. Die Annuität AN entspricht letztendlich den Kosten der Maßnahme K_M , die zur Berechnung der Kostendifferenz zwischen Maßnahme und Referenzsystem verwendet werden. Der Ausdruck in Formel 3 stellt die Basis für die weiteren Berechnungen der fixen und annuitätischen Investitionskosten der Maßnahmen dar. Daher gilt es zunächst den Zahlungsstrom $\{Z_t\}_{t=0}^{50}$ mit Hilfe des zugrunde liegenden Datenmaterials näher zu definieren.

Wie erwähnt, sind mit der Maßnahme jährliche Energiekosten K_{EV} verbunden, die innerhalb des Betrachtungszeitraumes als konstant angenommen werden. Durch diese Annahme fließt der jeweils ermittelte Wert für K_{EV} als Summand in die Annuität AN bzw. die Maßnahmenkosten K_M ein.¹⁵

Des Weiteren umfasst $\{Z_t\}_{t=0}^{50}$ auch die fixen Betriebskosten einer Maßnahme, die hier jedoch lediglich beim RIEcon Automationssystem zu berücksichtigen sind. Diese entsprechen den in Tabelle 6 beschriebenen Kosten für die jährliche Inspektion K_{INSP} , Instandhaltungsmaßnahmen K_{INST} und für den alle 2,5 Jahre anfallenden Batteriewechsel K_{BATT} . Es wird im Folgenden von zeitlichen Verbraucherpreisänderungen abstrahiert, so dass alle periodisch anfallenden Kosten auch diesbezüglich konstant bleiben. Daher gehen die Inspektionskosten K_{INSP} ebenso wie die Energiekosten K_{EV} als Summand in (3.7) ein¹⁶.

Instandhaltungskosten K_{INST} fallen bei einem herkömmlichen RIEcon System erst nach fünf Jahren Garantiezeit als jährlich konstante Kosten an. Deshalb wird zuerst der Barwert des Instandhaltungs-

¹⁵ Sofern K_{EV} als zeitlich konstant angesehen wird, lässt sich der $\sum_{t=0}^{50} \frac{Z_t}{(1+i)^t}$ in (Formel 7) folgendermaßen

darstellen: $\sum_{t=0}^{50} \frac{K_{EV}}{(1+i)^t} = \frac{(1+i)^{50} - 1}{(1+i)^{50} * i} * K_{EV}$. Der Diskontfaktor entspricht also der Inversen des Annuitäten-

faktors, so dass alleinig K_{EV} als Summand in Ausdruck (Formel 7) übrig bleibt.

¹⁶ Um alle fixen Betriebskosten gemäß Tabelle 6 in €/m² Einheiten umzurechnen, werden für den jeweiligen Feldversuch zunächst die Kostenangaben mit der Anzahl der Wohnungseinheiten multipliziert und sodann durch die angegebene Wohnfläche dividiert.

kostenstroms bestimmt und nachfolgend mit dem Annuitätenfaktor multipliziert, um die Instandhaltungskosten-Annuität zu bestimmen. Folglich gilt:

Formel 8:

$$AN = \frac{(1+i)^T * i}{(1+i)^T - 1} * I_0 + \dots + \frac{(1+i)^T * i}{(1+i)^T - 1} \left(\sum_{t=5}^{50} \frac{K_{INSP}}{(1+i)^t} \right).$$

Quelle: Eigene Darstellung.

Da K_{INSP} konstant ist und somit die Summe $\left(\sum_{t=5}^{50} \frac{K_{INSP}}{(1+i)^t} \right)$ der Differenz der Summen für 50 Jahre und vier Jahre entspricht, kann dieser Term in Formel 8 umgeformt werden zu:

Formel 9:

$$\sum_{t=5}^{50} \frac{K_{INSP}}{(1+i)^t} = K_{INSP} * \left(\sum_{t=0}^{50} \frac{1}{(1+i)^t} - \sum_{t=0}^4 \frac{1}{(1+i)^t} \right) = K_{INSP} * (DF_{50} - DF_4),$$

Quelle: Eigene Darstellung.

so dass zunächst die Diskontfaktoren für die Betrachtungszeiträume von 50 Jahren DF_{50} und vier Jahren DF_4 berechnet werden. Entsprechend der Summenformel für endliche Reihen stellt sich der jeweilige Diskontfaktor als Inverse des entsprechenden Annuitätenfaktors folgendermaßen dar:

Formel 10:

$$DF_t = \frac{(1+i)^t - 1}{(1+i)^t * i}.$$

Quelle: Beer et al. 2009.

Die annuitätischen Instandhaltungskosten K_{INST}^* ergeben sich durch Multiplikation des Ausdrucks im Formel 9 mit dem Annuitätenfaktor (ANF). Die zum Zinsfuß 3 % bzw. 5 % (siehe Tabelle 1) errechneten Diskont- und Annuitätenfaktoren können Tabelle 10 entnommen werden:

Tabelle 10: Annuitäten- und Diskontfaktoren

	3 %	5 %
ANF (Annuitätenfaktor)	0,04	0,05
DF (Diskontfaktor Betrachtungszeitraum 50 Jahre)	25,73	18,26
DF _{TE} (Diskontfaktor für einmalige Zahlung in 20 Jahre)	0,55	0,38
DF _{KE} (Diskontfaktor für einmalige Zahlung in 40 Jahren)	0,31	0,14
DF _{BATT} (Diskontfaktor Batteriewechsel)	10,06	7,04
DF _{INST} (Diskontfaktor Betrachtungszeitraum 4 Jahre)	3,61	3,38

Quelle: Eigene Berechnungen.

Des Weiteren findet der Batteriewechsel für Systemkomponenten des RIEcon Systems alle 2,5 Jahre statt, das heißt im gegebenen Betrachtungszeitraum werden 20 Zahlungen a 30 €₂₀₁₂ pro Wohneinheit fällig (vgl. Tabelle 6). Diese werden mit dem in Tabelle 10 als DF_{BATT} bezeichneten Diskontfaktor multipliziert, der sich als Summe aus den in 2,5 Jahresabständen berechneten Diskontfaktoren ergibt. Das Produkt $K_{BATT} \times DF_{BATT}$ stellt somit den Barwert der Batteriewechselkosten dar, die über den gesamten Betrachtungszeitraum anfallen. Eine Multiplikation mit dem in Tabelle 10 aufgeführten ANF ergibt die entsprechende Batteriewechsel-Annuität K_{BATT}^* . Beispielhaft sind für die Zinsfüße 3 % und 5 % die fixen Betriebskosten des Feldversuchs I in Tabelle 11 dargestellt:

Tabelle 11: Fixe Betriebskosten [€/m²a] Feldversuch I

	3 %	5 %
K* _{INST} (Instandhaltungskosten)	1,10	1,05
K* _{BATT} (Batteriewechsel)	0,22	0,22
K _{INSP} (Inspektionskosten)	0,21	0,21

Quelle: Eigene Berechnungen.

Die annuitätischen Investitionskosten bestehen bei der Riedel Automationstechnik aus Erst-, Teil- und Komplettersatzinvestitionen (vgl. Tabelle 5 und Tabelle 8), während beim „konventionellen Wärmeschutz“ annahmegemäß lediglich Erstinvestitionskosten (vgl. Tabelle 3) anfallen. Zur Berechnung der annuitätischen Erstinvestitionskosten K_{INV}^* des RIEcon Systems wird der jeweilige Bruttoinvestitionswert $K_{INVBRUTTO}$ in €₂₀₁₂/m² aus Tabelle 5 bzw. Tabelle 8 mit dem jeweiligen Annuitätenfaktor aus Tabelle 10 multipliziert.

Die nach 20 Jahren der Installation des RIEcon Systems anfallenden Teilersatzinvestitionen in €₂₀₁₂/m² (vgl. K_{TE} in Tabelle 5 bzw. Tabelle 8) müssen zunächst mit dem entsprechenden Faktor DF_{TE} diskontiert werden, um den Barwert dieser zukünftigen Investitionen zu erhalten. Das Produkt aus diesem Barwert der Teilersatzkosten und dem ANF ergibt wiederum die Annuität des Teilersatzes K_{TE}^* , die als Summand in die Maßnahmenkosten K_M einfließt. Gleichmaßen werden die nach 40 Jahren anfallenden Kosten für den Systemkomplettersatz K_{KE} zunächst mit DF_{KE} diskontiert und sodann mit dem ANF multipliziert. Das Resultat ist die Annuität des Komplettersatzes K_{KE}^* . Annahmegemäß fallen für den „konventionellen Wärmeschutz“ keine weiteren Investitionen über dessen Lebensdauer an. Beispielhaft seien die annuitätischen Investitionskosten des RIEcon Systems aus Feldversuch I in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Annuitätische Investitionskosten [€/m²a]

	RIEcon System
K_{INV}^*	2,19
K_{TE}^*	0,13
K_{KE}^*	0,18

Quelle: Eigene Berechnungen.

Zusammengefasst stellen sich die Maßnahmekosten K_M in €/m²a zunächst wie folgt dar:

Formel 11:

$$K_M = K_{EV} + K_{INST}^* + K_{INSP}^* + K_{BATT}^* + K_{INV}^* + K_{TE}^* + K_{KE}^* .$$

Quelle: Eigene Darstellung.

Der Ausdruck in Formel 11 erfasst keine Refinanzierungszahlungen, die mit einer Maßnahme über den betrachteten Zeithorizont verbunden sein können. Bei Berücksichtigung der in Kapitel 3.2 beschriebenen wärmietneutralen Modernisierungsumlage I_{MOD} , die annahmegemäß über den gegebenen Zeithorizont konstant bleibt, muss diese lediglich von den Maßnahmenkosten in Formel 11 subtrahiert werden. Die Integration dieses Refinanzierungsstromes in die Kalkulation der Vermeidungskosten ist jedoch mit einigen Unsicherheiten verknüpft, so dass anschließende Berechnungen zu optimistische Ergebnisse liefern könnten. Es erscheint generell fraglich, ob eine Nettokaltmieten-erhöhung im Sinne des §559 BGB bei den regionalen Marktgegebenheiten immer durchsetzbar ist (Discher et al. 2010). Sofern dies der Fall wäre, stellt sich in einem zweiten Schritt die Frage, ob die Differenz zum lokalen Mietspiegel lediglich temporär oder permanent besteht (vgl. ebenda). Für die untersuchten Fälle, auf Basis derer die Berechnung der Maßnahmenkosten hier durchgeführt werden, müsste zunächst eine entsprechende Analyse für vergleichbare Fälle in verschiedenen Regionen

durchgeführt werden, um eine *im Durchschnitt* zutreffende Durchsetzbarkeit einer warmmietneutralen Kaltmieterhöhung seitens des Investors (Vermieters) berücksichtigen zu können (Discher et al. 2010). Da eine solche Abschätzung außerhalb des Rahmens der hier durchgeführten Analyse liegt, wird die Maßnahmen-Refinanzierung über die Modernisierungsumlage als eigenes Szenario in die hier angestellten Maßnahmenkostenberechnungen integriert.

Entsprechend Formel 5 wird die Kostendifferenz ΔK_M zwischen Referenzsystem und Maßnahme errechnet, das heißt die Differenz zwischen Kosten für die Maßnahmen der Gebäudesanierung und den im Referenzgebäude anfallenden Energiekosten. Gleichmaßen wird die in Formel 5 gekennzeichnete Differenz der CO₂-Emissionen Δe gebildet, das heißt die im Referenzgebäude entstehenden CO₂-Emissionen abzüglich der im modernisierten Gebäude aufkommenden Emissionen. Um die jeweiligen Emissionen zu berechnen werden die entsprechenden, in Tabelle 1 aufgeführten Emissionsfaktoren in g/kWh_{output} mit dem jährlichen Energieverbrauch in kWh/m²a multipliziert. Im letzten Schritt werden die Vermeidungskosten der jeweiligen Maßnahme V_{KM} als Quotient aus ΔK_M und Δe gebildet. Tabelle 13 veranschaulicht die dargestellten Berechnungsschritte wieder für den konkreten Fall für das RIEcon System im Feldversuch I.

Tabelle 13: Vermeidungskostenberechnung

Kostendifferenz [€/m ² a]	Referenzgebäude	Gebäude mit RIEcon System
ΔK_M	-	0,98
CO ₂ -Emissionen KEA (tCO ₂ e/m ² a)	0,00	
Heizenergie	0,03	0,02
Hilfsenergie	-	0,00
Emissionen insgesamt	0,03	0,03
Δe Emissionsdifferenz	-	0,01
Vermeidungskosten [€/tCO ₂ e]	0,03	
V_{KM}	0,00	133,86

Quelle: Eigene Berechnungen.

Die CO₂-Vermeidungskosten wurden wie bereits erwähnt unter der Annahme statischer Energie- und Verbraucherpreise berechnet, so dass von fixen und variablen Betriebskostensteigerungen abstrahiert wird. Während beide Maßnahmenvarianten gleichermaßen von Energiepreissteigerungen betroffen wären, erhöhen Verbraucherpreissteigerungen, die sich in erhöhten Betriebs- und Ersatzinvestitionskosten widerspiegeln, womöglich die Vermeidungskosten des RIEcon Systems. Jedoch können die erwähnten Preisdynamiken auch in die entgegengesetzte Richtung wirken, sofern innerhalb des Betrachtungszeitraumes Energiepreise im Durchschnitt hinreichend schnell und die Kosten für den Betrieb und für die Ersatzinvestitionen des RIEcon Systems hinreichend langsam ansteigen (oder

sogar stagnieren). Insgesamt lassen diese Unsicherheiten nur vage Prognosen zu und werden somit nicht in die Berechnungen aufgenommen.

4.2 CO₂-Vermeidungskosten des „Konventionellen Wärmeschutzes“ und der „RIEcon Hausautomation“ im Vergleich

Wie im Kapitel 4.1 erläutert, werden CO₂-Vermeidungskosten sowohl für den Fall, dass die Refinanzierung der verschiedenen Maßnahmen über die warmmietneutrale Modernisierungumlage möglich ist als auch für den Fall, dass es keine Refinanzierungsmöglichkeiten gibt, berechnet. Ferner werden die Berechnungen mit einem Kalkulationszins von 3 % bzw. 5 % durchgeführt. Hierdurch spiegeln die Ergebnisse eine Schwankungsbreite der aufzuwendenden Kapitalkosten wider, die ansonsten mittels des WACC¹⁷ Ansatzes fixiert würden.

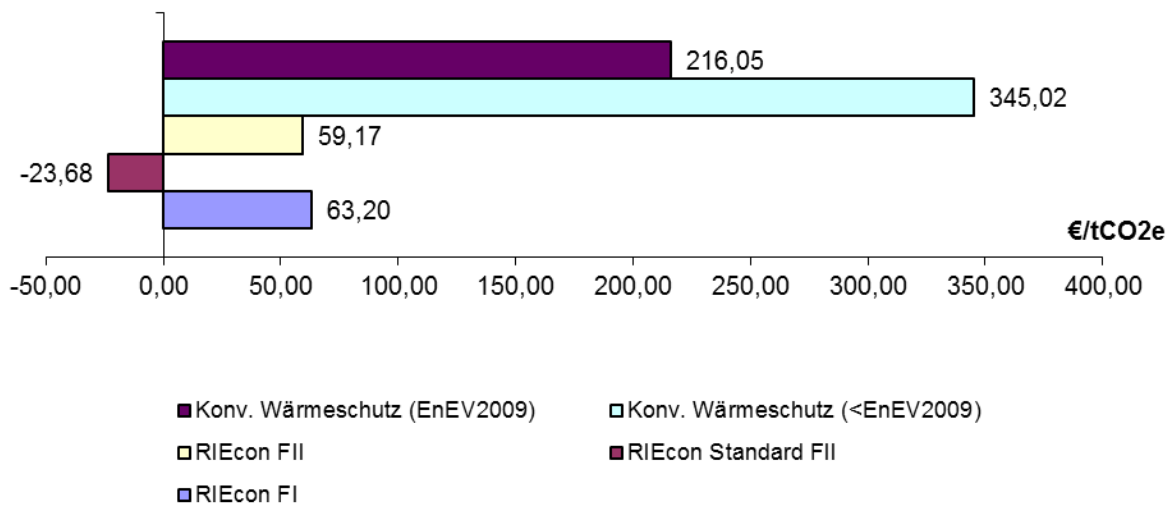
Für jede Maßnahme können demzufolge vier Ergebnisse ermittelt werden, die sich wie folgt darstellen. Abbildung 1 zeigt die Vermeidungskosten der betrachteten Maßnahmenvariationen bei einem Kalkulationszins von 3 % und ohne die Berücksichtigung von Refinanzierungsmöglichkeiten. Die Spreizung zwischen den Vermeidungskosten des „Konventionellen Wärmeschutzes“ und der „RIEcon Hausautomation“, bleibt über alle Szenarienkombinationen erhalten. Der größte Kostenunterschied, insgesamt 368,70 € pro eingesparter Tonne CO₂ in diesem Szenario besteht zwischen dem Standard RIEcon System des 2. Feldversuches und den konventionellen Wärmeschutzmaßnahmen, die unter den Standards der Energieverordnung von 2009 liegen. Während letztere Kosten von 345,02 €/tCO_{2e} verursachen, bringt das RIEcon System sogar Einsparungen von 23,68 €/tCO_{2e} im Vergleich zum un-saniierten Referenzgebäude mit sich. Diese sind auf den weitaus geringeren Energieverbrauch und damit weniger CO₂-Emissionen zurückzuführen. So sinkt der Energieverbrauch im Feldversuch von 180 kWh/m²a auf 116 kWh/m²a (vgl. Tabelle 7).

Trotz vergleichbarer Investitionskosten fallen die Vermeidungskosten des RIEcon Systems des ersten Feldversuches mit 63,2 €/tCO_{2e} signifikant höher aus, da das Referenzgebäude einen um ca. 20 kWh/m²a geringeren Heizenergieverbrauch im Ausgangszustand aufweist als das Referenzgebäude des zweiten Feldversuches. Entsprechend fällt das Einsparpotential bei den Energiekosten im Feldversuch I geringer aus, wodurch die Vermeidungskosten gemäß Formel 5 höher ausfallen (höhere positive Kostendifferenz bei leicht geringeren Emissionseinsparungen). Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass die tatsächlichen Investitionskosten, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, weitaus höher lagen als die unterstellten „standardmäßigen“ Investitionskosten (vgl. Tabelle 8). Wird diesem Rechnung getragen, so sind die Vermeidungskosten des zweiten Feldversuches, die dann bei 59,17 €/tCO_{2e} liegen, nahezu identisch mit den Vermeidungskosten des Feldversuches I. Die größeren Energiekosteneinsparungen im zweiten Feldversuch überkompensieren jedoch die außergewöhnlich hohen Investitionskosten, so dass das RIEcon System im Feldversuch I immer noch höhere Kosten je vermiedener Tonne CO_{2e} verursacht.

¹⁷ „Weighted Average Cost of Capital“: Diese ergeben sich als gewichtetes Mittel der Eigen- und Fremdkapitalzinsen.

Ähnliches, wenn auch auf einem viel höheren Kostenniveau, gilt für den Vergleich der konventionellen Wärmeschutzmaßnahmen (vgl. Abbildung 1). Im Vergleich zu Wärmeschutzmaßnahmen, die die Standards der EnEV 2009 nicht erfüllen, verursachen Maßnahmen, die den Standards entsprechen, trotz nahezu doppelt so hoher Investitionskosten weit geringere CO₂-Vermeidungskosten. Dies ist wiederum auf die mehr als doppelt so hohen Emissionseinsparungen beziehungsweise auf die um mehr als die Hälfte verringerten Energiekosten relativ zum Ausgangszustand zurückzuführen (vgl. Tabelle 3).

Abbildung 1: Vermeidungskosten ohne Modernisierungumlage (Kalkulationszins 3 %)

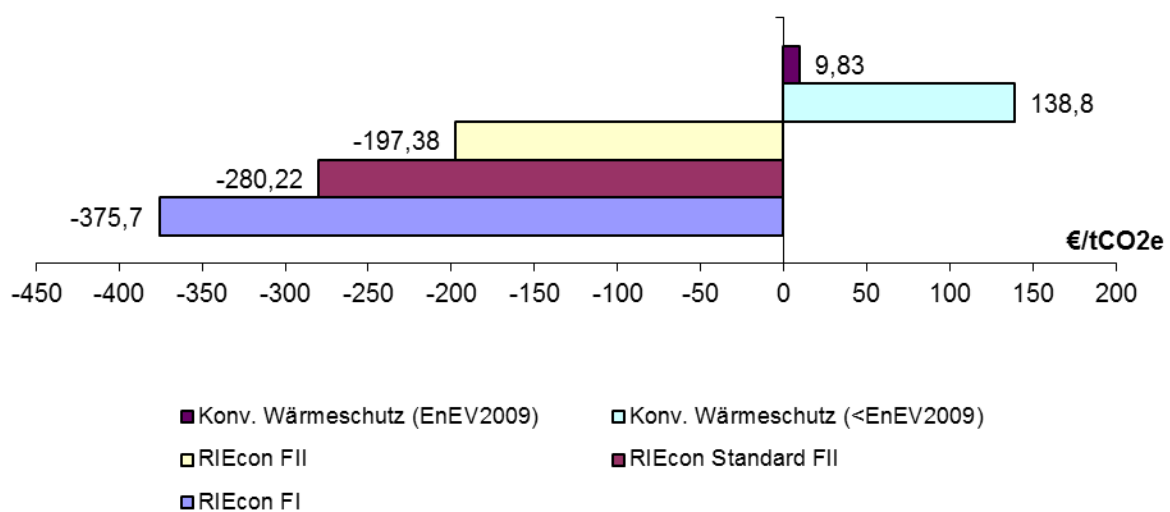


Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 2 veranschaulicht die quantitativen Einflüsse der warmmietneutralen Modernisierungumlage auf die maßnahmenspezifischen CO₂-Vermeidungskosten bei gegebenem Kalkulationszins. Die relativen Kostenvorteile des RIEcon Systems gegenüber dem konventionellen Wärmeschutz treten deutlich zu Tage. Aufgrund der negativen Vermeidungskosten ist eine Umsetzung der untersuchten Installationen der RIEcon Systeme in jedem Fall sinnvoll. Im Gegensatz dazu verursacht die Vermeidung von CO₂ mittels konventionellen Wärmeschutzes weiterhin Kosten. Jedoch fallen letztere mit 9,83 €/tCO₂e bzw. 138,8 €/tCO₂e deutlich geringer aus als im Falle ohne Modernisierungumlage. Die Kosten pro eingesparter Tonne CO₂e reduzieren sich bei einem Wärmeschutz nach EnEV 2009 um rund 95 % (von 216,05 €/tCO₂e auf 9,83 €/tCO₂e) und im anderen Fall um ca. 60 % (von 345,02 €/tCO₂e auf 138,8 €/tCO₂e). Dieser Unterschied in den Kostenreduktionsraten ist insbesondere durch die unterschiedlich hohen Modernisierungumlagen bedingt (siehe Tabelle 3), welche auf Basis unterschiedlich hoher Energieeinsparungen berechnet wurden. Im Falle des RIEcon Systems wurden dagegen für beide Feldversuche identische Werte für die Modernisierungumlage angenommen. Hervorzuheben ist, dass nun das RIEcon System des ersten Feldversuches (375,7 €/tCO₂e) trotz ge-

ringerer absoluter¹⁸ Emissionseinsparungen – 0,007 tCO₂e/m²a versus 0,013 tCO₂e/m²a – besser abschneidet als das RIEcon Standard-System des zweiten Feldversuches (280,22 €/tCO₂e). Dieser Sachverhalt ist mit dem formellen Aufbau der Vermeidungskostenberechnung verknüpft. Ein vergleichsweise kleineres Emissionsdelta (Nenner in Formel 5) führt unter ansonsten gleicher Kostenkonstellation zu höheren Vermeidungskosten (siehe Abbildung 1). Gleichsam fällt bei einem geringeren Δe_{mi} jedoch auch eine Reduktion der annuitätischen fixen bzw. variablen Kosten (Zähler in Formel 5) durch die Modernisierungumlage schwerer ins Gewicht. Folglich gilt, je „kostbarer“ eine eingesparte tCO₂e, desto signifikanter der positive Einfluss von Maßnahmenkosteneinsparungen auf die spezifischen CO₂-Vermeidungskosten, *ceteris paribus*.

Abbildung 2: Vermeidungskosten mit Modernisierungumlage (Kalkulationszins 3 %)



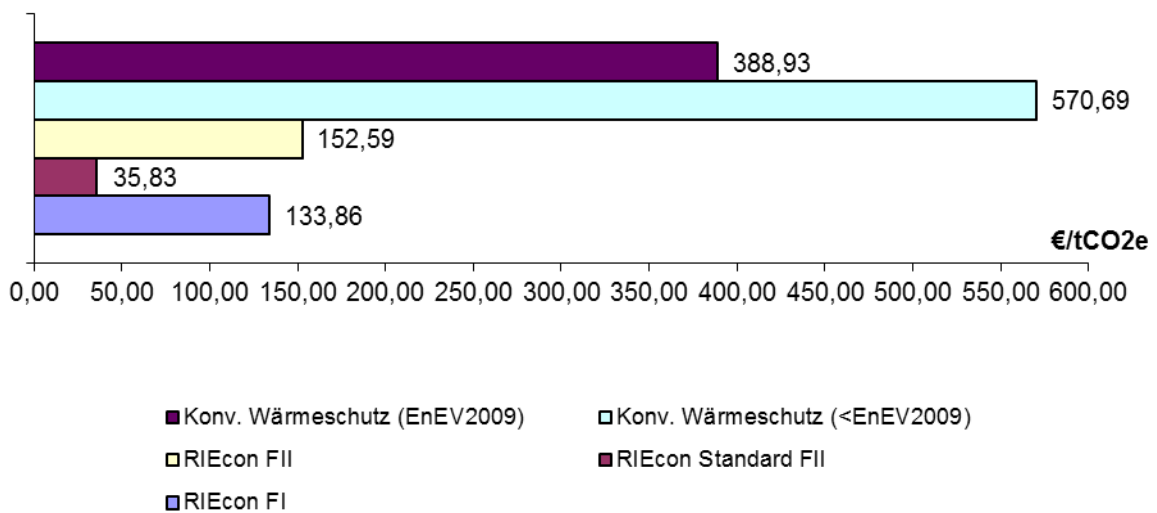
Quelle: Eigene Darstellung.

In einem zweiten Schritt wird der vorangestellte Vermeidungskostenvergleich mit dem höheren Kalkulationszins von 5 % durchgeführt. Ein höherer Kalkulationszins indiziert eine geringere gegenwärtige Wertschätzung zukünftiger Kosten und Erträge aus Investorensicht (Gebäudeeigentümer). Definitionsgemäß schließt dies auf die initialen Investitionskosten bezogenen Annuitäten K_{INV}^* in Formel 7 ein. Um dem Barwert der initialen Investitionskosten zu entsprechen, müssen die diesbezüglichen Annuitäten, die über die gesamte Lebensdauer der Maßnahme gezahlt werden müssten, entspre-

¹⁸ Auch die zum Ausgangszustand relativen Emissionseinsparungen fallen geringer aus. Während im ersten Feldversuch durch das RIEcon System rund 25 % der jährlichen CO₂-Emissionen eingespart werden, die im unsanierten Referenzgebäude angefallen wären, liegt dieser Anteil im zweiten Feldversuch bei rund 32 %.

chend höher als beim geringeren Diskontsatz von 3 % ausfallen¹⁹. Diese erhöhte „Gegenwartspräferenz“ äußert sich in einer entsprechenden Erhöhung des unterstellten Annuitätenfaktors von 0,04 auf 0,05. Folglich fallen die ohne Modernisierungumlage kalkulierten Vermeidungskosten aller Maßnahmen in Abbildung 3 drastisch höher aus als die im vergleichbaren Szenario in Abbildung 1.

Abbildung 3: Vermeidungskosten ohne Modernisierungumlage (Kalkulationszins 5 %)

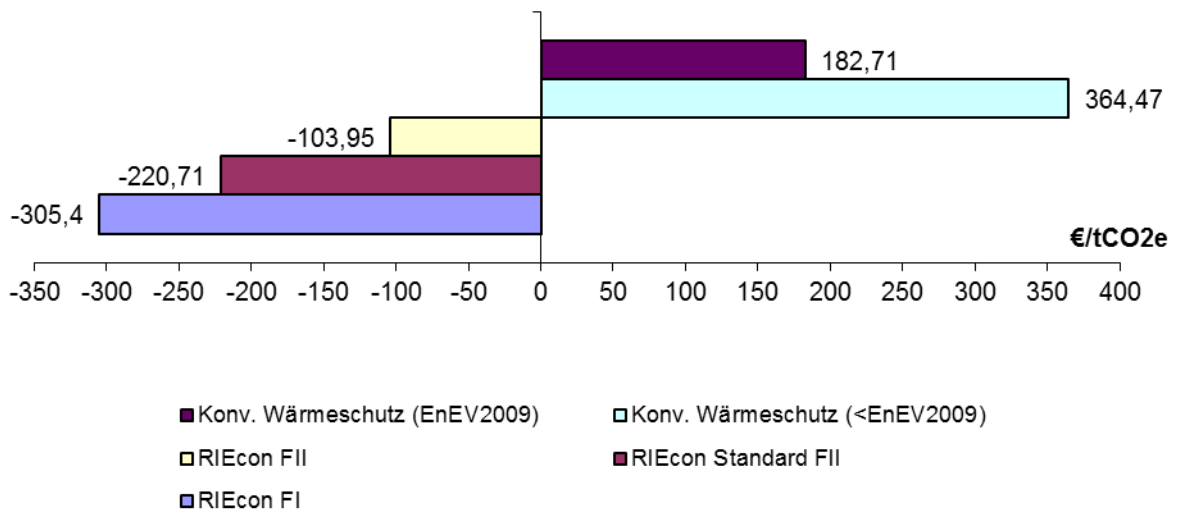


Quelle: Eigene Darstellung.

Gleiches gilt für die Szenarien mit Modernisierungumlage, Abbildung 2 und Abbildung 4, wobei im Falle des RIEcon Systems die höhere Abzinsung zu vergleichsweise „weniger negativen“, das heißt höheren Vermeidungskosten führt. Das zu beobachtende „Ranking“ zwischen den Maßnahmen und Maßnahmenvariation ist identisch zum Szenario mit geringerem Diskontsatz. Die Art und Richtung der festzustellenden Veränderungen zwischen Abbildung 3 und Abbildung 4, die bei Variation der Refinanzierungsmöglichkeiten auftreten, sind auf die bereits oben beschriebenen Effekte zurückzuführen.

¹⁹ Gleichermaßen fällt der Gegenwartswert der Kosten für Teilersatz bzw. Komplettersatz, die erst nach 20 bzw. 40 Jahre anfallen, bei einem höheren Diskontsatz geringer aus, so dass die konstanten jährlichen Zahlungen (Annuitäten), um diese Kosten zu begleichen, geringer ausfallen als bei einem geringeren Diskontsatz.

Abbildung 4: Vermeidungskosten mit Modernisierungsumlage (Kalkulationszins 5 %)



Quelle: Eigene Darstellung.

In allen Szenariokombinationen stellt das RIEcon System daher die günstigste Maßnahmenoption dar, um CO₂-Emissionen einzusparen. Dies wird vor allem durch den relativen Kostenvorteil bei den Erstinvestitionskosten erreicht, die bei vergleichbaren Emissions- und Energiekosteneinsparungen nur 12 % bis 23 % der für gängige Wärmeschutzmaßnahmen aufzuwendenden initialen Investitionskosten pro m²-Wohnfläche ausmachen.

5 Fazit

Mit dem in diesem Bericht angestellten Vergleich der CO₂-Vermeidungskosten von konventionellen Wärmeschutzmaßnahmen (Dämmung von Fassade und Dach, Tausch von Fenster, etc.) und dem dezentralen Energiemanagementsystem (Hausautomationssystem) der Firma Riedel werden im Wesentlichen zwei Ziele verfolgt. Zum einen soll die Methode und die Datengrundlage für die Berechnung der CO₂-Vermeidungskosten nachvollziehbar dokumentiert werden. Zum anderen soll eine vergleichende Analyse verschiedener Maßnahmenoptionen im Bereich der energetischen Gebäudesanierung auf Basis gegenwärtiger Kosten und Emissionseinsparungen ermöglicht werden. Die Analyse geht daher über eine reine Wirtschaftlichkeitsberechnung der CO₂-Vermeidungsmaßnahmen hinaus.

Grundlage der vorangegangenen Berechnungen bildet die im ersten Kapitel in Anlehnung an Beer et al. (2009) beschriebene Methode, die in einer Studie der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. dokumentiert wurde. Um das Umsetzungspotential der vorgestellten Maßnahmen so realistisch wie möglich widerspiegeln zu können, wurde bei der hier angewendeten Differenzkostenbetrachtung ein betriebswirtschaftlicher Ansatz verfolgt. Im Gegensatz zu einem volkswirtschaftlichen oder quasi-volkswirtschaftlichen Ansatz, werden hierbei keine mit der Maßnahme verbundenen Externalitäten und somit keine im Betrachtungszeitraum anfallenden sozialen Kosten berücksichtigt, die eine auf das Gesamtsystem bezogene Bewertung der Maßnahmen ermöglichen.

Eine Schwäche der verwendeten Methode stellt eher die Abstraktion von Preisdynamiken dar, die die vorangestellten Ergebnisse in quantitativer Hinsicht zu optimistisch oder pessimistisch erscheinen lassen. Wie in Kapitel 4.1 erläutert, werden die Ergebnisse von den unterstellten Zeitpfaden den Preisen für Fremd- oder Eigenkapital, Verbrauchsgüter und Energie beeinflusst. Aufgrund der damit verbundenen Unsicherheiten sind jedoch viele der geschilderten Annahmen plausibel. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Vernachlässigung von Preisdynamiken keinerlei Einfluss auf die qualitativen Ergebnisse des Vermeidungskostenvergleichs zwischen den Maßnahmenoptionen hat, der wesentlich zur Entscheidungsfindung bei der Wahl zwischen Modernisierungsalternativen beitragen dürfte.

Als Berechnungsbasis dienen sowohl Primärdaten, die in zwei Pilotversuchen mit der Technik der Firma Riedel Automatisierungstechnik gewonnen wurden, als auch Sekundärdaten, die von der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (ARGE) zu konventionellen Wärmeschutzmaßnahmen gesammelt und verarbeitet wurden. Mittels dieser Daten konnten die Energieverbrauchs-, Emissions- und Kostenkennzahlen ermittelt und die Vermeidungskosten in Kapitel 4.2 berechnet werden.

Zentrales Ergebnis des anschließenden Vergleichs des RIEcon Systems mit konventionellen Wärmeschutzmaßnahmen ist, dass die Vermeidung klimaschädlicher CO₂-Emissionen durch die Hausautomation die ökonomisch zu präferierende Variante der energetischen Gebäudesanierung darstellt. Es zeigt sich, dass über alle hierbei betrachteten Szenarien die Vermeidung einer Tonne CO₂ mithilfe des konventionellen Wärmeschutzes, der die in der EnEV 2009 definierten Standards entweder erfüllt oder untererfüllt, signifikant höhere Kosten verursacht als im Falle des RIEcon Systems. Im Maximum und Minimum fallen bei den hier berücksichtigten Wärmeschutzmaßnahmen CO₂-Vermeidungskosten an, die jeweils um den Faktor 2 bzw. 6 höher liegen als bei der Riedel Hausautomationstechnik.

Werden zudem Refinanzierungsmöglichkeiten wie einer warmmietneutralen Modernisierungsumlage auf die Kaltmiete berücksichtigt, so wird die Implementierung des RIEcon Systems oder vergleichbarer dezentraler Energiemanagementsysteme aus ökonomischer Sicht obligatorisch (negative Vermeidungskosten), da diese verglichen mit einem energetisch nicht modernisierten Referenzgebäude insgesamt zu Kosteneinsparungen führen würden. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass diese Refinanzierungsvariante nur im Zusammenhang mit spezifischen lokalen Wohnungsmarktgegebenheiten bewertet werden kann (vgl. Discher et al. 2009, 39ff). Die für dieses Ergebnis verantwortliche Kaltmieterhöhung kann daher möglicherweise nur bedingt durchgesetzt werden. Allerdings erscheinen die unterstellten, *einmaligen* Mieterhöhungen von 3,52 €/m²a (RIEcon System) bzw. 2,52-6 €/m²a (Wärmeschutz) vor dem Hintergrund zu erwartender Energiepreissteigerungen und der somit im Folgezeitraum zu erzielenden Energiekosteneinsparungen seitens der Mieter als vergleichsweise gering. Entsprechend kommen auch die Autoren der dena-Sanierungsstudie von 2009 bei einem vergleichbaren Fall zu dem Schluss, dass derartige Mietpreissteigerungen „am Markt mit scheinbar geringem Risiko leicht durchsetzbar“ (Discher et al. 2009, 46) seien und können sich dabei auf Daten aus 92 ausgewählten dena-Sanierungsprojekten berufen.

Einen gewichtigeren Faktor hinsichtlich der absoluten Höhe der maßnahmenspezifischen Vermeidungskosten spielen die Kosten der Kapitalbeschaffung. Werden folglich in einer gesonderten Betrachtung die Kalkulationszinsfüße von 3 % auf 5 % erhöht, so kommt es bei beiden Sanierungsvarianten zu einer drastischen Erhöhung der Vermeidungskosten um 60 % bis 100 %. Vergleicht man die Fälle „ohne Modernisierungsumlage“, so steigern sich Vermeidungskosten des RIEcon Systems von 59,17 bzw. 63,20 €/tCO_{2e} auf bis zu 133,86 bzw. 152,59 €/tCO_{2e} und die des Wärmeschutzes von 216,06 €/tCO_{2e} bzw. 345,02 €/tCO_{2e} auf 388,93 €/tCO_{2e} bzw. 570,69 €/tCO_{2e}.

Für den qualitativen Vergleich spielt dieses Resultat jedoch keine Rolle. Wie eingangs erwähnt, verfügt die Riedel Hausautomationstechnik über alle Szenarien hinweg einen absoluten Kostenvorteil gegenüber den hier unterstellten konventionellen Wärmeschutzmaßnahmen bei der Vermeidung einer zusätzlichen Einheit von CO₂-Emissionen.

6 Literatur

- Beer, M., Corradini, R., Gobmaier, T., Vogler, G., Köll, L., Podhajsky, T., Vogler, G. & Zotz, M. (2009): CO₂-Verminderung in Deutschland Teil I - Methodik und Zusammenfassung. Essen: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE)
- Beucker, S., Bergset, L., Beeck, H., Bogdanova, T., Bormann, F., Riedel, M. & Bierter, W. (2012): Geschäftsmodelle für den Zukunftsmarkt des dezentralen Energiemanagements in Privathaushalten. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Connected Energy – SHAPE. Berlin
- EnEV (2009): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung), http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/enev_2007/gesamt.pdf (Abruf Dezember 2012).
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2012): Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2000 bis August 2012. Wiesbaden. Online unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/EnergiepreisentwicklungPDF_5619001.pdf?__blob=publicationFile, Stand: 01.03.2013.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2011): Preise: Fast zehn Jahre Euro – Preisentwicklung vor und nach der Bargeldumstellung. Wiesbaden. Online unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Verbraucherpreise/Fast10JahreEuro5611105119004.pdf?__blob=publicationFile, Stand: 01.03.2013.
- Discher, H., Hinz, E. & Enseling, A. (2010): dena-Sanierungsstudie. Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand. Begleitforschung zum dena-Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“.
- IHK Schleswig-Holstein (2012): VEA-Fernwärme-Preisvergleich 2011. Arbeitsgemeinschaft der Industrie- und Handelskammern zu Flensburg, zu Kiel und zu Lübeck. Online unter: http://www.ihk-schleswig-holstein.de/innovation/energie/zahlen_daten_fakten/734186/VEA_Fernwaerme_Preisvergleich.html;jsessionid=BAE5A7E81B840E186328B834C8ED2746.repl20, Stand: 01.03.2013
- Brüggemann, Herz, Jödicke, Wegewitz, Urbanowicz, Markfort, Schnauss, Hartmann, Kerschberger, Kloos, Schellhardt, Kreie, Bentscheff & Riedel (2004): Innovative Niedrigenergiesanierung Albert-Schweizer-Viertel - Ein BMWi-gefördertes Modellbauvorhaben der KÖWOGÉ Köpenicker Wohnungsgesellschaft mbH.
- Riedel, M., Bentscheff, S., Lauckner, G., Klingner, M. & Heinz, E. (2002): Pilotversuch zur Einführung mikroelektronischer Einzelraumregelungssysteme für die bedarfsgeführte Heizungs- und Lüftungssteuerung in rekonstruierten WBS 70 - Mietwohnungen, Abschlussbericht.
- Umweltbundesamt (2011): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2010 und erste Schätzungen 2011. Dessau-Roßlau. Fachgebiet I 2.5 Energieversorgung und -daten. Online unter: <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf>, Stand: 01.03.2013
- Wagner, U., Geiger, B., Hardi, M., Brückl, O., Roth, O. & Tzscheuschler, P. (2004): CO₂-Vermeidungskosten im Kraftwerksbereich, bei den erneuerbaren Energien sowie bei nachfrageseitigen

Energieeffizienzmaßnahmen. Technische Universität München. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik.

Walberg, D., Holz, A., Gniechwitz, T. & Schulze, T. (2011): Wohnungsbau in Deutschland 2011 - Modernisierung oder Bestandsersatz (Band 1 Textband) Studie zum Zustand und der Zukunftsfähigkeit des deutschen "Kleinen Wohnungsbaus"

Walberg, D., Holz, A., Gniechwitz, T. & Schulze, T. (2011): Wohnungsbau in Deutschland 2011 - Modernisierung oder Bestandsersatz (Band 2 Tabellenband) Studie zum Zustand und der Zukunftsfähigkeit des deutschen "Kleinen Wohnungsbaus"