

# Ökonomisch optimale Investitionsstrategien für thermische Sanierungen des Gebäudebestands im Zeitverlauf am Beispiel der Stadt Wien

## DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

**Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)**

im Rahmen des Studiums

**Energie- und Automatisierungstechnik**

eingereicht von

**Esther Werderitsch, BSc.**

Matrikelnummer: 0826615

Technische Universität Wien

Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe

Energy Economics Group (EEG)

Betreuung:

Ao. Univ.Prof. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Reinhard Haas**

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Sara Fritz**

Wien, März 2018



## Code of Conduct

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct – Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis (in der aktuellen Fassung des jeweiligen Mitteilungsblattes der TU Wien), insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In– noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Wien, im März 2018

---

(Esther Werderitsch, BSc.)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung .....</b>	<b>I</b>
<b>Kurzfassung.....</b>	<b>II</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungen.....</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Fragestellung und Methode.....	2
1.3 Wissenschaftlicher Beitrag dieser Arbeit.....	3
1.4 Aufbau dieser Arbeit.....	4
<b>2 Literatur .....</b>	<b>5</b>
<b>3 Eingangsdaten und Annahmen.....</b>	<b>9</b>
3.1 Gebäudebestand Wien .....	9
3.2 Maßnahmen der Gebäudekomponenten und technische Lebensdauer.....	12
3.2.1 Investitionskosten der Maßnahmen der Gebäudekomponenten.....	12
3.2.2 Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten .....	13
3.3 Energieträgermix .....	17
3.4 Energiepreise .....	17
3.5 Jahresnutzungsgrade .....	18
3.1 CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren .....	19
<b>4 Methode .....</b>	<b>21</b>
4.1 Analyse der Auswirkung von Maßnahmenbündel.....	22
4.1.1 Energetische Analyse der Auswirkung von Maßnahmenbündel.....	22
4.1.2 Ökonomische Auswirkungen der Maßnahmenbündel.....	26
4.2 Das Optimierungsmodell .....	29
4.2.1 Renovierungszeitpunkte.....	29
4.2.2 Zielfunktion.....	30
4.2.3 Investitionskosten.....	33
4.3 Szenariendefinition .....	33
<b>5 Ergebnisse .....</b>	<b>37</b>
5.1 Einfluss von Energiepreisszenarien auf die Wärmebedarfsentwicklung des Gebäudebestandes von Wien.....	37

5.2	Einfluss der Energiepreisszenarien auf die Wärmebedarfsentwicklung der Gebäudekategorie Einfamilienaus.....	39
5.2.1	Energiepreisszenario 1.....	40
5.2.2	Energiepreisszenario 2.....	44
5.2.3	Energiepreisszenario 3.....	45
5.3	Einfluss der Energiepreisszenarien auf die Wärmebedarfsentwicklung der Gebäudekategorie kleine Mehrfamilienwohngebäude.....	50
5.3.1	Energiepreisszenario 1.....	50
5.3.2	Energiepreisszenario 2.....	55
5.3.3	Energiepreisszenario 3.....	56
5.4	Einfluss der Energiepreisszenarien auf die Wärmebedarfsentwicklung der Gebäudekategorie große Mehrfamilienwohngebäude.....	59
5.4.1	Energiepreisszenario 1.....	60
5.4.2	Energiepreisszenario 2.....	63
5.4.3	Energiepreisszenario 3.....	64
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>Weitere Ergebnisse.....</b>	<b>73</b>
7.1	Einfluss der Energiepreisszenarien auf die Wärmebedarfsentwicklung der Gebäudekategorie Büros in Wohngebäuden .....	73
7.1.1	Energieszenario 1 .....	74
7.1.2	Energieszenario 2 .....	78
7.1.3	Energieszenario 3 .....	78
7.2	Einfluss von Energiepreisszenarien auf die Wärmebedarfsentwicklung der Gebäudekategorie Bürogebäude.....	82
7.2.1	Energieszenario 1 .....	83
7.2.2	Energieszenario 2 .....	87
7.2.3	Energieszenario 3 .....	88
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>91</b>

## **Danksagung**

Dieser Abschnitt ist allen Personen gewidmet, die mich während meines Studiums und insbesondere während dieser Diplomarbeit unterstützt und ermutigt haben.

Ich möchte Ao.Univ.Prof. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Reinhard Haas für seine wertvollen und konstruktiven Anregungen und Beratungen im Lauf dieser Diplomarbeit meinen tiefsten Dank aussprechen.

Besonderer Dank gilt auch Dipl.-Ing. Dr.techn. Sara Fritz für ihre Geduld und die gute Unterstützung zu jedem Zeitpunkt meiner Diplomarbeit.

Mein großer persönlicher Dank gilt natürlich meiner Familie und meinen Freunden für ihre Unterstützung und Ermutigung während dem Studium. Ohne diese wichtigen Stützen wäre dieses Studium so nicht möglich gewesen.

## Kurzfassung

Die Gebäude sind für 40% des Energieverbrauchs und 36% der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der EU verantwortlich [1]. Um das langfristige Ziel, die Treibhausgasemissionen um 80-95% bis 2050 zu senken, sind erhebliche Anstrengungen zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden gefordert [2]. Mehrere ineinandergreifende Maßnahmen, wie die thermische Sanierung der Gebäudehülle oder der Tausch der Heizungssysteme, sind der Schlüssel zur nachhaltigen Nutzung von Gebäuden.

Ziel dieser Arbeit ist es, die ökonomisch optimierten thermischen Sanierungsmaßnahmen für den Wiener Gebäudebestand bis 2050 zu modellieren und die Auswirkungen davon auf den Endenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu ermitteln. Dabei wird auch eruiert, welche Maßnahmen für die unterschiedlichen Gebäudekategorien ausgewählt werden.

Dazu wurde ein lineares Optimierungsmodell entwickelt. Das lineare Optimierungsmodell mit der Zielfunktion hat die Aufgabe die Entscheidungsvariablen zu wählen, dass unter Einhaltung der Nebenbedingungen ein Minimum der Zielfunktion erreicht wird. Ziel dieses Optimierungsmodells ist es, die jährlichen Gesamtkosten, die sich aus der Annuität der Investitionskosten der Sanierungsmaßnahmen in die Gebäudehülle und der Energiekosten für die Bereitstellung der Raumwärme ergeben, zu minimieren.

Durch die ökonomisch optimierten Sanierungen kann, unter der Berücksichtigung eines „business-as-usual“-Szenarios der Energiepreise, der Endenergiebedarf für den Gebäudebestand von 16 TWh auf 6 TWh reduziert werden, entspricht einer Reduktion von 63%. Ändern sich die Energiepreise, Erhöhung der Preise der fossilen Energieträger, kann durch die ökonomisch optimierten Sanierungen der Endenergiebedarf des Gebäudebestandes von Wien auf 4 TWh reduziert werden, was einer Reduktion von 75% entspricht. Auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden in dieser Größenordnung durch die ökonomisch optimierten Maßnahmen der Gebäudehülle reduziert. Die Einsparungspotentiale variieren je nach Gebäudekategorie. Das höchste Einsparungspotential unter der Berücksichtigung des „business-as-usual“-Szenarios der Energiepreise wird in der Gebäudekategorie kleines Mehrfamilienwohngebäude erzielt. Um noch weitere Einsparungen im Gebäudebestand zu erzielen, wäre es als nächster Schritt sinnvoll auch eine Anlagenseitige Investitionen (Kesseltausch) zu Berücksichtigen.

## Abstract

Buildings are responsible for 40% of energy consumption and 36% of CO<sub>2</sub> emissions in the European Union [1]. Accordingly, for reaching the declared long-term target of reducing greenhouse gas emission levels by 80-95% until 2050 a major effort to improve building energy efficiency will be required [2]. Several interlocking measures, such as the thermal refurbishment of the building envelope or the replacement of heating systems, are key for the sustainable use of buildings.

Aim of this work is to model economically optimized thermal refurbishment measures for the Viennese building stock until 2050 and to determine the effects of this on final energy demand and CO<sub>2</sub> emissions. It also describes different measures for corresponding building categories.

For this purpose, a linear optimization model was developed. The objective of the linear optimization model with a target function is to select the decision variable that, while complying with the constraints, achieves a minimum of the target function. Aim of this optimization model is to minimize the total annual costs resulting from the annuity of investment costs of renovation measures of the building envelope and the energy costs for provision of space heating.

Due to the economically optimized refurbishment, considering a “business-as-usual”-scenario of energy prices, the final energy demand for the building stock can be reduced from 16 TWh to 6 TWh, which corresponds to a reduction of 63%. By adjusting energy prices, increasing the prices of fossil energy carriers, final energy demand can be reduced to 4 TWh by economically optimized renovation of the Viennese building stock, resulting in a reduction of 75%. The CO<sub>2</sub> emissions are also reduced on this scale by economically optimized refurbishment of the building envelope. The potential savings vary depending on the building category. The highest savings potential, considering the “business-as-usual” scenario of energy prices, is achieved in the building category comprised of small apartment buildings. To achieve even more savings in the building stock, it would be appropriate to consider renovation of heating systems (boiler replacements) as a subsequent step.

## Abkürzungen

BGF	Bruttogeschossfläche, [m <sup>2</sup> ]
DA	Dach
EEB	Endenergiebedarf, [kWh]
EFH	Einfamilienhaus
FA	Fassade
FE	Fenster
GB	Gebäude
HWB	Spezifischer Heizwärmebedarf, [kWh/m <sup>2</sup> ]
KE	Kellerdecke
LD	Lebensdauer der Gebäudekomponenten, [a]
MFHg	Großes Mehrfamilienwohngebäude
MFHk	Kleines Mehrfamilienwohngebäude
WGB	Wohngebäude

# 1

# Einleitung

## 1.1 Motivation

Im Rahmen der Klima-und Energiepolitik bis 2030 verfolgt die EU drei Hauptziele [3]:

- Senkung der Treibhausgasemissionen um mindestens 40% (gegenüber dem Stand von 1990)
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien auf mindestens 27%
- Steigerung der Energieeffizienz um mindestens 27%

Gebäude sind für 40% des Energieverbrauchs und 36% der CO<sub>2</sub> Emissionen in der EU verantwortlich [1]. Um das langfristige Ziel, die Treibhausgasemissionen um 80-95% bis 2050 zu senken, sind erhebliche Anstrengungen zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden gefordert [2].

In der EU sind etwa 35% der Gebäude über 50 Jahre alt. Wird die Energieeffizienz von Gebäuden verbessert, kann der gesamte EU- Energieverbrauch um 5-6% gesenkt werden [1].

Angesichts der Tatsache, dass der Renovierungszyklus für Gebäude ca. 30 Jahre beträgt und sich die energetische Qualität des Gebäudes währenddessen nicht ändert, muss sichergestellt werden, dass die Renovierungsmaßnahmen an bestehenden Gebäuden das Energiesparpotential optimieren [2].

Das „Building Performance Institute Europe“, [2], hat sich zum Ziel gesetzt, die Energieeffizienz von Gebäuden in ganz Europa zu verbessern und so dazu beizutragen, die CO<sub>2</sub> Emissionen von Gebäuden zu reduzieren. Seine Aufgabe ist es, die Entwicklung ehrgeiziger gebäudebezogener Strategien und Programme auf Ebene der EU und der Mitgliedstaaten zu unterstützen und deren rechtzeitige und effiziente Umsetzung durch die Zusammenarbeit mit relevanten Interessensgruppen aus der Politik, Forschungsgemeinschaft, der Bauindustrie und den Verbraucherorganisationen voranzutreiben. Wie bereits erwähnt, weisen die Gebäude den größten Betrag der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Europa auf. Um das langfristige Ziel, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80% zu senken, erfordert es daher erhebliche Anstrengungen zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden. Aus diesem Grund ist die Definition von Mindestanforderungen an die Energieeffizienz für neue und bestehende Gebäude ein

Schlüsselement europäischer Bauvorschriften. Die Europäische Kommission hat Anforderungen eingeführt, um solche Standards in allen Mitgliedstaaten durch diese Richtlinie zu setzen. Die Neufassung der Energy Performance of Buildings Directive - EPBD im Jahr 2010 enthält eine Bestimmung, dass die nationalen Energieeffizianzorderungen im Hinblick auf ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis durch Anwendung einer harmonisierten Berechnungsmethode festgelegt werden sollten. Die Kommission fordert die Mitgliedstaaten auf, diese Methode zu verwenden und anzuwenden, um die erforderlichen Kostenoptimalitätsniveaus für ihr Land zu berechnen und mit den nationalen Anforderungen zu vergleichen, die in den nationalen Bauvorschriften festgelegt sind.

Die Methodik verbindet die Anforderungen an die Energieeffizienz mit wirtschaftlichen Zielen und unterstützt das Ziel die Kosten während des Lebenszyklus eines Gebäudes zu minimieren und gleichzeitig die Umweltvorteile zu maximieren. Steigende Energiepreise bieten noch mehr Spielraum für die Verbesserung der geltenden Vorschriften, da die Kosteneinsparungen aufgrund des geringeren Energieverbrauchs höher sind und höhere Vorabinvestitionen rechtfertigen können.

In Wien beträgt der Anteil des Endenergieverbrauchs für den Sektor private Haushalte rund 32%. Rund 36% des Wiener Endenergiebedarfs wird für die Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Kühlung aufgewendet [4] [5] und betrug für das Jahr 2015 14,9 TWh [6].

Es müssen mehrere ineinandergreifende Maßnahmen gesetzt werden, um den Bedarf an fossiler Energie zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser deutlich zu senken. Die thermische Sanierung des Gebäudebestandes ist eine zentrale Maßnahme zur Effizienzsteigerung, und somit zur Senkung der fossilen Energieträger für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser. Diese Maßnahmen führen auch zur Reduktion des Ausstoßes klimaschädlicher Emissionen. [7]

Die Investitionen in die thermische Sanierung des Gebäudebestands können den Energiebedarf, die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die laufenden Energiekosten senken.

## 1.2 Fragestellung und Methode

Das zentrale Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die ökonomisch optimierten thermischen Sanierungsmaßnahmen für den Wiener Gebäudebestand bis 2050 zu modellieren. Sanierungsmaßnahmen betreffen die Gebäudekomponenten Kellerdecke, Dach, Fassade und Fenster. Folgende Fragen werden im Rahmen der Arbeit explizit beantwortet:

- Welche Maßnahmen (thermische Sanierung der Kellerdecke, Dach, Fassade, Fenster) werden für unterschiedliche Gebäudekategorien ausgewählt?
- Welche Auswirkungen haben diese ökonomisch optimierten thermischen Sanierungen der Gebäudehülle des Wiener Gebäudebestandes auf den Wärmebedarf und den Endenergiebedarf im Zeitverlauf?
- Wie wirken sich die ökonomisch optimierten thermischen Sanierungsmaßnahmen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus?
- Welche Auswirkungen haben verschiedene Preisszenarien für fossile Energieträger auf die ökonomisch optimierten Sanierungsmaßnahmen und den resultierenden Endenergiebedarf?

Um die ökonomisch optimierten Maßnahmen für den Gebäudebestand zu erhalten, wurde ein Optimierungsmodell in MATLAB entwickelt. Dabei ist das zentrale Ziel des Modells, die jährlichen laufenden Kosten unter Berücksichtigung der Investitionen in thermischer Sanierung der Gebäudehülle und der jährlichen Energiekosten zu optimieren. Dazu wählt das Optimierungsmodell aus einer Menge an Maßnahmenbündel für jede Gebäudeklasse ein optimales Maßnahmenbündel aus. Ein Maßnahmenbündel setzt sich aus der Kombination verschiedener Maßnahmen pro Gebäudekomponente zusammen, welches die thermische Qualität der Gebäudekomponente verbessert. Durch die Wahl des optimalen Maßnahmenbündels für jede Gebäudeklasse werden die jährlichen Kosten, die sich aus den Investitionskosten für die Gebäudehülle und den Energiekosten zusammensetzen, minimiert.

Dazu wurde ein gemischt ganzzahliges Optimierungsmodell erstellt. Lineare Optimierungsmodelle sind eine spezielle Art von Modellen, deren Zielfunktion unter Einhaltung von Nebenbedingungen minimiert oder maximiert werden. Als gemischt ganzzahlige Modelle werden jene Optimierungsmodelle bezeichnet, welche auch binäre Werte zur mathematischen Beschreibung des Modells verwenden.

Das resultierende Optimierungsmodell wird als lineares Optimierungsproblem in MATLAB implementiert, unterstützt von der Modellierungssprache Yalmip. Gelöst wurde das lineare gemischt ganzzahlige Optimierungsproblem mit einem externen Solver, namens Gurobi.

### 1.3 Wissenschaftlicher Beitrag dieser Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit werden die ökonomisch optimierten Sanierungsmaßnahmen eines Gebäudebestandes untersucht. Es wird ein gemischt-ganzzahliger Optimierungsansatz genutzt, um die bestmögliche Lösung einer thermischen Sanierung unter Berücksichtigung von Energiepreisszenarien berechnen zu können.

Das entwickelte Optimierungsmodell kann für weitere Analysen mit verschiedenen Gebäudebeständen und unterschiedlichen Energiepreisszenarien genutzt werden.

## 1.4 Aufbau dieser Arbeit

Diese Diplomarbeit gliedert sich in 7 Kapitel, wobei das erste Kapitel die Einleitung darstellt. Das Kapitel 1 befasst sich mit der Motivation und der zentralen Fragestellung.

Im Kapitel 2 wird auf die Literatur näher eingegangen, welche einen Einblick über den aktuellen Stand der Thematik gibt.

Kapitel 3 beschreibt die implementierten Eingangsdaten und getroffene Annahmen. Dabei wird der Gebäudebestand und die Maßnahmen der Gebäudekomponenten genauer beschrieben.

Im Kapitel 4 beschreibt die Methodik dieser Arbeit. Dies beinhaltet die Analyse der energetischen und ökonomischen Auswirkungen der Maßnahmenbündel. Weiters wird das entwickelte Optimierungsmodell mathematisch beschrieben.

Kapitel 5 beschreibt die Ergebnisse der Modelldurchläufe. Zuerst werden die Auswirkungen der Renovierungen des gesamten Gebäudebestands von Wien auf den Endenergiebedarf und den Treibhausgasemissionen untersucht. Anschließend wird auf die Wohngebäudekategorien näher eingegangen um die getroffenen Maßnahmen zu diskutieren.

Kapitel 6 beschließt die Arbeit mit Schlussfolgerungen, die sich aus diesen Ergebnissen gewinnen lassen. Dabei wird auch ein Ausblick für mögliche Erweiterungen und noch zu beachtende Punkte gegeben, die nicht Ziel dieser Arbeit waren.

Im Kapitel 7 wird auf die Ergebnisse der Modelldurchläufe weiterer Gebäudekategorien näher eingegangen.

# 2

## Literatur

Die wichtigste Eingangsliteratur für diese Diplomarbeit ist „Cost Optimality (Discussing methodology and challenges within the recast Energy Performance of Buildings Directive)“ [2]. In diesem Dokument wird der Bausektor als jener identifiziert, der ein beträchtliches Potenzial für die kosteneffektive Reduzierung von Treibhausgasemissionen bietet und somit ein wichtiger Bereich für Klimaschutzmaßnahmen ist. Das maximale Einsparpotential im Bausektor wurde noch nicht vollständig erkannt. Sowohl die Qualität der Maßnahmen, als auch die Schnelligkeit der Umsetzung (insbesondere bei der Gebäudesanierung) zeigen, dass Verbesserungsmöglichkeiten bestehen. Die Forschung zeigt, dass finanzielle und ökologische Ziele nicht unbedingt ein Widerspruch sind, sondern sich gegenseitig unterstützen können.

Für eine wirtschaftliche Bewertung wird die Methode des Kapitalwertes vorgeschlagen. Der Kapitalwert ist eine Standardmethode für die finanzielle Bewertung von langfristigen Projekten. Im Berechnungsleitfaden der Europäischen Gebäuderichtlinie werden folgende Kosten berücksichtigt:

- Energiekosten
  - für Raumwärme, Kühlung, Belüftung und Licht
  - Berücksichtigung der erzeugten Energie
- Entsorgungskosten
- andere energiebezogene Baukosten (z.B. externe Beschattung)
- Wartungskosten/Instandhaltungskosten von Anlagen/Maßnahmen
- Investitionen von Anlagen (Kessel, Lüftungssystem etc.) und
- Investitionen der Gebäudehülle (Fenster, Wärmedämmung)

Auch mit der Kapitalwertmethode wurde die ökonomische Bewertung von verschiedenen Sanierungsmaßnahmen in „Cost-Effective Refurbishment of Residential Buildings in Austria“ [8] durchgeführt. Es wird auch hier jenes Energieleistungsniveau als kostenoptimales Niveau bezeichnet, das zu den niedrigsten Kosten während des geschätzten wirtschaftlichen Lebenszyklus führt, wobei die niedrigsten Kosten durch Berücksichtigung von energiebezogenen Investitionskosten, Instandhaltungs- und Betriebskosten sowie Entsorgungskosten ermittelt werden. Derzeit basieren die meisten Entscheidungen auf den Investitionskosten und möglicherweise auf Amortisationsraten. Die

Folgen sind meist ineffiziente Gebäude mit erhöhten Energiekosten. Auch das Ziel von niedrig Energieeffizienz-niveaus ist nicht immer die beste Lösung im Hinblick auf das wirtschaftliche Best-Case-Szenario. Eine energetische Sanierung benötigt eine Anfangsinvestition, um die zukünftigen Kosten zu reduzieren. Daher können verschiedene Ziele, einerseits die billigsten Maßnahmen und andererseits Maßnahmen mit den niedrigsten zukünftigen Kosten bestehen. Die Ermittlung des Kostenoptimums bei Maximierung des wirtschaftlichen Nutzens wäre aus Investitionssicht der Idealfall. Das Kostenoptimum bedeutet jene Investitionsmaßnahmen, die innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens die niedrigsten Gesamtkosten für laufende Kosten und Investitionskosten darstellen.

Eine andere Herangehensweise wurde in „Sanierung des deutschen Gebäudebestandes auf unterschiedliche Effizienzstandards – gesamtwirtschaftliche Investitionen und Energieeinsparungen“ [9] getroffen. Als Motivation wird hier die deutsche Energiewende mit ihren ambitionierten Zielen für den Gebäudebereich genannt. Es stellen dabei die Energieeinsparverordnung sowie die Förderprogramme der Kreditanstalt für Wiederaufbau, die zentralen Politikinstrumente für den Gebäudebereich dar, mit denen Effizienzstandards für die Gebäudesanierung vorgegeben werden. Es stellt sich die Frage, mit welchen Investitionen und Einsparungen die energetische Sanierung des gesamten Gebäudebestandes auf unterschiedliche Effizienzstandards verbunden ist. Ziel dieser Arbeit ist es die gesamtwirtschaftlichen Investitionen und Einsparung unter Berücksichtigung der heterogenen Gebäudestruktur und kostenoptimaler Sanierungsstrategien auf Einzelgebäudeebene zu quantifizieren. Das Resultat stellen die Investitionen und die jeweiligen U-Werte der einzelnen Bauteile zur Erreichung des definierten Standards für jedes Referenzgebäude dar. Aufgrund der Heterogenität hinsichtlich des energetischen Ausgangszustandes der Gebäudegeometrie und auch der Nutzungsart zeigt sich eine große Bandbreite in den spezifischen Investitionen sowie in den resultierenden Einsparungen. Der Vergleich der unterschiedlichen Effizienzstandards zeigt, dass Mehrinvestitionen in unterschiedlicher Höhe ergriffen werden müssen um die Effizienzstandards zu erreichen. Eine Sanierung des gesamten Gebäudebestandes auf das Effizienzniveau der geltenden Energieeinsparverordnung würden den jährlichen Heizwärmebedarf um 398 TWh senken. Bezogen auf das Jahr 2008 entspricht das einer Einsparung von 53%. Würde eine Sanierung des gesamten Gebäudebestandes auf das Effizienzniveau des Förderprogrammes der Kreditanstalt für Wiederaufbau stattfinden, resultiert eine zusätzliche jährliche Einsparung von 72 TWh.

Methoden zur Auswahl von Wärmedämmstoffen für kostengünstige, nachhaltige und energieeffiziente Nachrüstung von Gebäuden werden in [10] beschrieben. Eine praktikable Lösung für das Erzielen von Energieeinsparungen in bestehenden Gebäuden ist eine Veränderung der Gebäudekonstruktion. Das Einbringen von Dämmstoffen ist eine praktische und zugleich kostengünstige Lösung zur energetischen Sanierung von Gebäuden. Die Menge an Energie, die von Heizungssystemen benötigt wird um den thermischen Wohnkomfort innerhalb eines Gebäudes zu gewährleisten, hängt stark davon ab, wie effektiv die Gebäudehülle ist. Diese Literatur gibt eine ausführliche Auskunft über den aktuellen Stand der Wärmedämmstoffe. Die Wärmedämmstoffe werden in Bezug auf die ökologische und finanzielle Perspektive, die Ökobilanz bzw. die Lebenszykluskosten bewertet. Die optimale Isolationsdicke wird berechnet, indem zwischen den optimalen wirtschaftlichen Ergebnissen und der maximal erreichbaren Energieleistung abgewogen

wird. Dabei wird die optimale Dämmdicke definiert, die den maximalen Nutzen aus Investitionen und Energiekosteneinsparungen bietet.

Eine ökonomische Bewertung der langfristigen Entwicklung des Wärmebedarfs und der netzgebundenen Versorgung von Gebäuden als Fallstudie für Wien ist die Arbeit von Fritz [6]. Das Kernziel dieser Arbeit ist es, mögliche Wege für die zukünftige Entwicklung des Wärmebedarfs von Gebäuden und die Wechselwirkung mit der Wirtschaftlichkeit der netzgebundenen Wärmeversorgung bis 2050 aufzuzeigen. Dabei muss die Analyse zwei Perspektiven kombinieren. Zum einen die Perspektive der Bauherren hinsichtlich der Investitionsentscheidungen bei thermischen Sanierungen und die Veränderung der Technologien für Raumheizung und Warmwasser im Bestand. Auf der anderen Seite die Perspektive der Netzbetreiber hinsichtlich der Investitionen in den Ausbau und der Erweiterung der bestehenden netzgebundenen Versorgungsinfrastruktur.

Eine Energiebedarfsanalyse für Raumkonditionierung und Warmwasseraufbereitung als Fallstudie für den österreichischen Gebäudebestand ist die Arbeit von Müller [11]. Dabei wurde ein dynamisches bottom-up techno-sozio-ökonomisches Simulationstool entwickelt. Mit diesem Tool können verschiedene Anforderungen und ihre Auswirkungen auf den Energiebedarf, den Endenergiebedarf bewertet werden.

Welche Energieeinsparungen mit einer teilweisen Sanierung und welche mit einer umfassenden Sanierung von Gebäuden erreicht werden können untersucht die österreichische Energie Agentur mit der Kosten-Nutzen-Analyse von energetischen Gebäudesanierungen in Österreich [12]. Dabei werden für drei Bauperioden jeweils drei Gebäudetypen definiert. Mit Simulationen wurden die erwartbaren Energieeinsparungen für eine Teilsanierung im Vergleich zu einer umfassenden Wohnhaussanierung berechnet und anschließend monetär bewertet. Weiters wurden die volkswirtschaftlichen Auswirkungen analysiert. Bei Gebäuden der ersten und zweiten Bauperiode können bei einer Teilsanierung ca. 30% und bei einer umfassenden Sanierung ca. 70% des Endenergiebedarfs eingespart werden. Bei der dritten Bauperiode sind die Einsparungen aufgrund des guten Baustandards erwartungsgemäß geringer. Am Beispiel eines Einfamilienhauses beträgt die Energieeinsparungen bei einer umfassenden Sanierung mit Erneuerung des Heizsystems 77%. Wird die umfassende Sanierung ohne Erneuerung des Heizsystems durchgeführt beträgt die Energieeinsparung nur 48%. Die Teilsanierung, das heißt die oberste Geschossdecke und das energietechnische System werden saniert, erzielt eine Energieeinsparung von 44%. Die Kosten einer umfassenden Sanierung sind um einen Faktor 3-4 höher als für die einer Teilsanierung. Werden die Investitionskosten auf die Energieeinsparungen bezogen, sind diese für die Gebäude der ersten beiden Bauperioden oder bei der Teilsanierung um 10-20% niedriger als bei einer umfassenden Sanierung. In der dritten Bauperiode erhöhen sich die spezifischen Kosten für die Energieeinsparung aufgrund des bereits guten Bauzustands beträchtlich. Bei diesen Gebäuden gibt es Kostenvorteile für die Variante der Teilsanierungen.



# 3

# Eingangsdaten und Annahmen

## 3.1 Gebäudebestand Wien

Die Daten über den Gebäudebestand von Wien des Jahres 2015 stammen aus der Dissertation von Fritz [6]. Dieser Gebäudebestand umfasst alle seit 1890 bis 2008 gebauten Gebäude in Wien. Der Neubau, also jene Gebäude die nach 2008 in Wien gebaut wurden, werden in dieser Diplomarbeit nicht berücksichtigt. Der Gebäudebestand ist in 14 Gebäudekategorien gegliedert, welche die Nutzung der Gebäude beschreibt, zu sehen in Tabelle 1. Diese Gebäudekategorien unterteilen sich weiter in insgesamt 260 Gebäudeklassen, die die Bauzeit und die Zeitpunkte bereits getätigter Sanierungsmaßnahmen wiedergeben. Eine Gebäudeklasse setzt sich somit aus der Kombination der Nutzung, der Baualtersklasse und des Zeitraumes einer bereits erfolgten Sanierung zusammen und ergibt dadurch den spezifischen Heizwärmebedarf je Gebäudeklasse.

Alle 14 Gebäudekategorien fließen in das Optimierungsmodell ein. Die Gebäudekategorien Einfamilienhäuser, kleine Mehrfamilienwohngebäude und große Mehrfamilienwohngebäude werden einzeln in den Ergebnissen angeführt. Die Gebäudekategorien Büros in Wohngebäuden und Bürogebäude (klein und groß zusammengefasst) werden im Kapitel 7 angeführt. Die anderen Gebäudekategorien werden in dieser Diplomarbeit unter der Bezeichnung Rest zusammengefasst.

*Tabelle 1: Anteil an Gebäuden der verschiedenen Nutzungen im Gebäudebestand von Wien 2015.  
Quelle: Fritz, 2016 [6]*

<b>Nutzung</b>	<b>Anteil [%]</b>	<b>Nutzung</b>	<b>Anteil [%]</b>
Bürogebäude groß	1,04	Hotels und Gastwirtschaften klein	0,51
Bürogebäude klein	3,58	Krankenhäuser etc. öff.	0,01
Büros in Wohngebäuden	10,04	Mehrfamilienwohngebäude groß	16,75
Einfamilienhäuser	51,58	Mehrfamilienwohngebäude klein	11,83
Handel groß	0,06	Schulen etc. öff.	0,86
Handel klein	1,52	Werkstätten_Hallen u.a. Industrie- Gewerbe u. Infrasturckturgebäude groß	0,08
Hotels und Gastwirtschaften groß	0,05	Werkstätten_Hallen u.a. Industrie- Gewerbe u. Infrasturckturgebäude klein	2,10

Eine Übersicht auf die in dieser Diplomarbeit eingegangen Gebäudekategorien und deren Baualtersklassen ist in Abbildung 3-1 und Tabelle 2 gegeben.

*Tabelle 2: Übersicht der Baualtersklassen und ihre Anteile am Gebäudebestand.*

<b>Baualtersklassen</b>	<b>Anteile am Gebäudebestand</b>
1890-1918	18,82%
1919-1944	14,36%
1945-1965	11,67%
1966-1979	11,22%
1980-1992	19,06%
1993-2002	2,36%
2003-2006	1,98%
2006-2008	20,53%

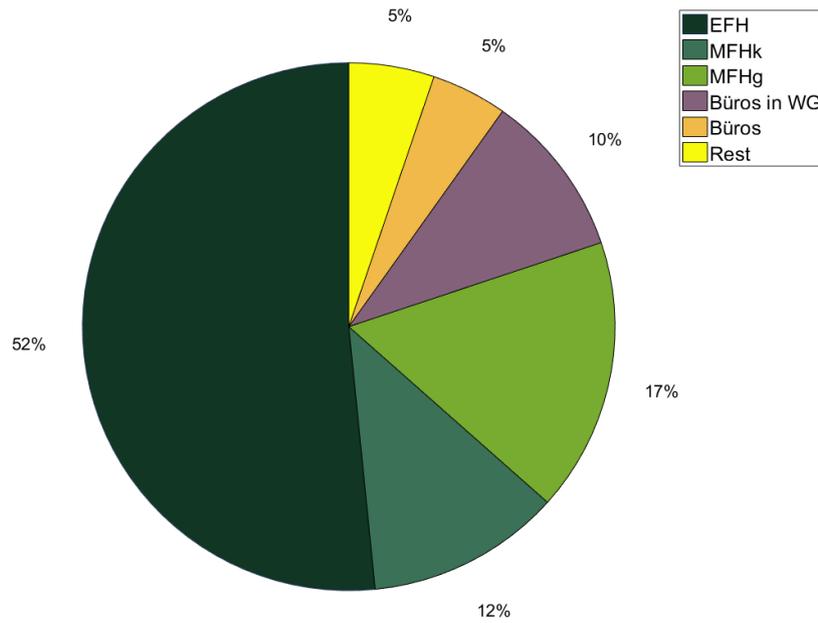


Abbildung 3-1: Anteile bezogen auf die Anzahl der Gebäude der verwendeten Gebäudekategorien.

Wie die Anzahl der Gebäude pro Bauzeit und Nutzung verteilt ist, wird in Abbildung 3-2 dargestellt. Die größte Anzahl an Gebäuden wurde 2006-2008 gebaut. Gefolgt von den Errichtungsperioden 1980-1992 und 1890-1918. Bis auf die Bauzeit 1890-1918 ist die Gebäudekategorie Einfamilienhaus mit dem größten Anteil an Gebäuden vertreten. Tabelle 3 gibt Auskunft über die Verteilung der Anzahl an Wohnungen in den einzelnen Gebäudekategorien.

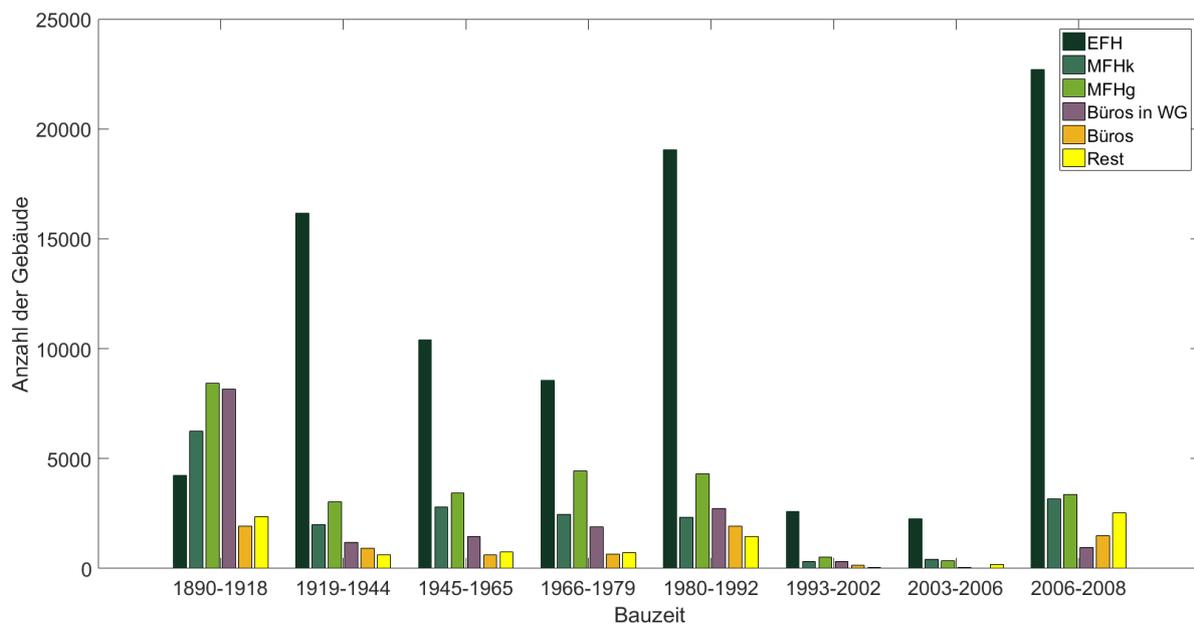


Abbildung 3-2: Anzahl der Gebäude pro Bauzeit und Nutzung.

Tabelle 3: Anteile der Wohnungen pro Gebäudekategorie

Gebäudekategorie	Anteile an Wohnungen
Einfamilienhaus	8%
Mehrfamilienwohngebäude klein	4%
Mehrfamilienwohngebäude groß	39%
Büros in Wohngebäuden	10%
Bürogebäude	7%
Rest	32%

Der Tabellendatensatz enthält neben der Kategorisierung und Klassifizierung auch Annahmen über den energetischen Zustand (HWB) der Gebäudeklassen und die Geometriedaten, wie Grundfläche, Bruttogeschossfläche (BGF), Außenwandfläche ohne Fensterfläche und Fensterfläche und wurde im Rahmen der Arbeit von Fritz [6] auf den Wärmebedarf der Stadt Wien für das Jahr 2012 kalibriert.

Da in dem Tabellendatensatz des Wiener Gebäudebestandes keine Information zur Art des Daches (Flachdach oder Steildach) gegeben ist, wurde die vereinfachte Annahme getroffen, dass alle Gebäudedächer mit einem Flachdach versehen sind und somit nur eine Art der Gebäudekomponente Dach berücksichtigt wird. In den vorhandenen Gebäudedaten sind auch keine Angaben über das Heizsystem und die Warmwasseraufbereitung gegeben. Jedoch sind die Energieträger für Raumwärme von Wien anteilig gegeben (wird in Abschnitt 3.3 betrachtet).

## 3.2 Maßnahmen der Gebäudekomponenten und technische Lebensdauer

In dieser Diplomarbeit werden nur Maßnahmen berücksichtigt, welche die Gebäudehülle betreffen. Es gibt Instandhaltungsmaßnahmen, die keine Verbesserung der thermischen Qualität der Gebäudekomponenten bewirken, die dann durchgeführt werden müssen, wenn die technische Lebensdauer der Komponenten erreicht wird. Zusätzlich gibt es Maßnahmen, welche die thermische Qualität der Gebäudekomponenten verbessern. Ein Maßnahmenbündel setzt sich aus wärmedämmenden Maßnahmen der Gebäudekomponenten Kellerdecke, Dach, Fassade und Fenster zusammen.

Für diese 4 Gebäudekomponenten gibt es unterschiedliche Sanierungstiefen auf die im Abschnitt 3.2.2 näher eingegangen wird. Die Lebensdauer der Gebäudekomponenten wurde einheitlich mit 30 Jahren angenommen und entspricht den üblichen Sanierungszyklen von Gebäuden.

### 3.2.1 Investitionskosten der Maßnahmen der Gebäudekomponenten

Die Investitionskosten für die Renovierung der Gebäudekomponenten wurden nach einer Literaturrecherche aus [8] übernommen. Die Kostenfunktionen für die Investitionskosten der Gebäudekomponenten Kellerdecke, Dach und Fassade, wurden mit einer äquivalenten thermischen Leitfähigkeit von  $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$  berechnet. Dies entspricht der durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeit von Mineralfaserdämmstoffen [13].

Tabelle 4: Kostenfunktionen für Investitionen der Gebäudekomponenten [EUR/m<sup>2</sup>]. Quelle: Stocker, Koch, 2017

Gebäudekomponente	Kostenfunktion (x=Dämmstoffdicke [cm])
Kellerdecke	$1,25 * x + 30,75$
Dach	$4,11 * x + 104,14$
Fassade	$2,81 * x + 96,88 + 3,00$
Gebäudekomponente	Kostenfunktion (x=U-Wert [W/m <sup>2</sup> K])
Fenster	$-141,89 * x + 504,05$

Jede Kostenfunktion besteht aus fixen Kosten, und den variablen Kosten der Dämmstoffdicke. Die fixen Kosten fallen somit auch bei den Instandhaltungsmaßnahmen an. Bei der Gebäudekomponente Fassade wurden die Kosten für ein notwendiges Gerüst mit 3€/ m<sup>2</sup> berücksichtigt.

Die Sanierungstiefen, die Schritte der Dämmstoffdicke der Gebäudekomponente, werden in Abschnitt 3.2.2 erläutert. Die verwendeten Dämmstoffdicken entsprechen mit den am Markt erhältlichen Dämmstoffdicken überein.

Die Kosten für die Fenster hängen zum einem vom Rahmenmaterial und zum anderen von der Qualität der Verglasung ab. In der übernommenen Kostenfunktion [8] wurde ein Mittelwert verwendet, da in der Studie des Instituts Wohnen und Umwelt [14] nicht alle Rahmenmaterialien berücksichtigt worden sind.

### 3.2.2 Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten

In Abbildung 3-3 sind die Effizienzmaßnahmen der Gebäudekomponenten Kellerdecke, Dach und Fassade anhand der spezifischen Investitionen pro Quadratmeter Bauteilfläche in Abhängigkeit der Dämmstoffdicke bzw. in Abbildung 3-4 in Abhängigkeit des U-Wertes dargestellt. Für die Gebäudekomponente Fenster sind die Effizienzmaßnahmen anhand der spezifischen Investitionen pro Quadratmeter Bauteilfläche in Abhängigkeit des U-Wertes in Abbildung 3-5 dargestellt.

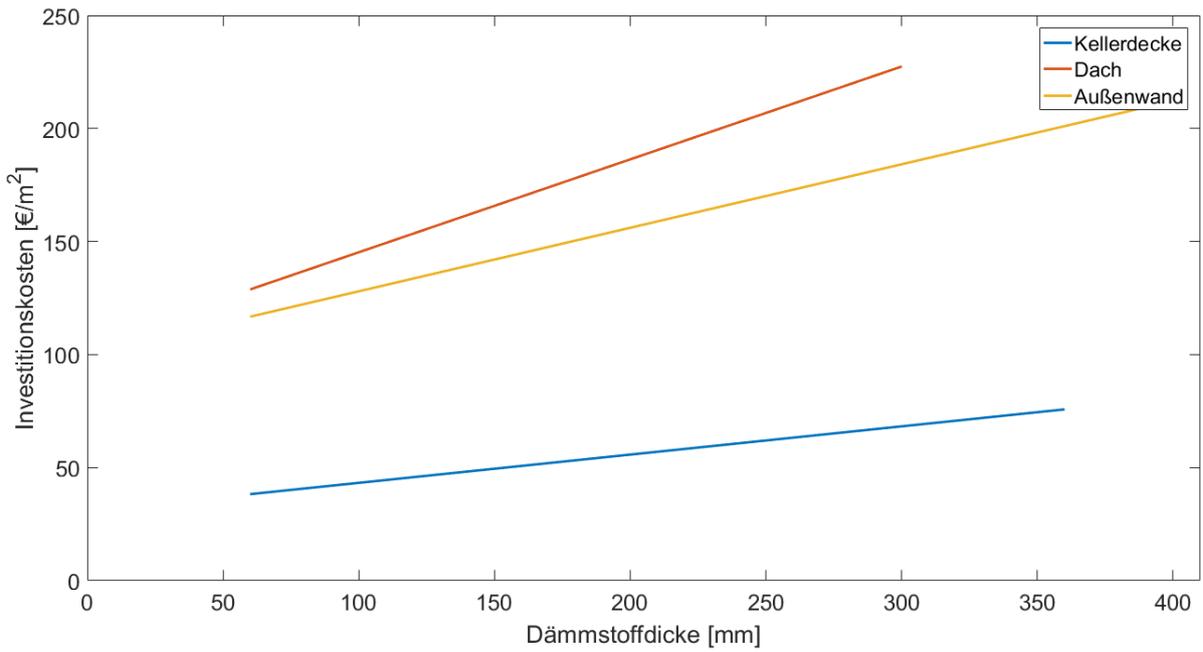


Abbildung 3-3: Spezifische Investition von Effizienzmaßnahmen der Gebäudekomponenten Kellerdecke, Dach und Fassade in Abhängigkeit der Dämmstoffdicke

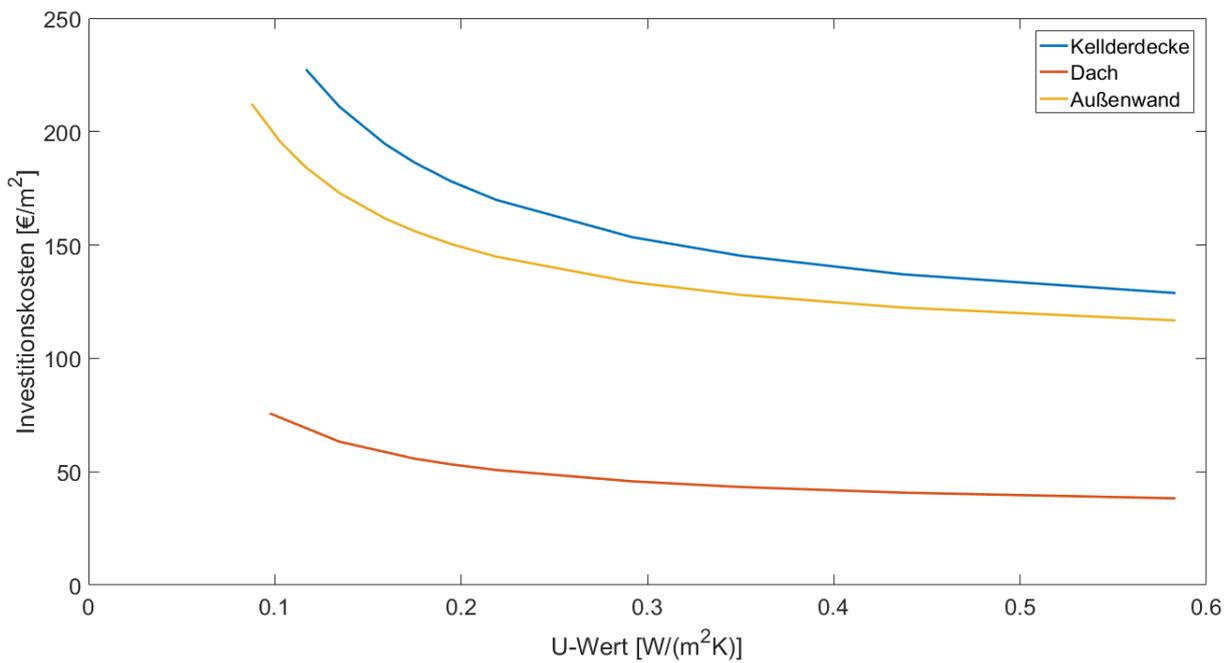


Abbildung 3-4: Spezifische Investition von Effizienzmaßnahmen der Gebäudekomponenten Kellerdecke, Dach und Fassade in Abhängigkeit des U-Werts

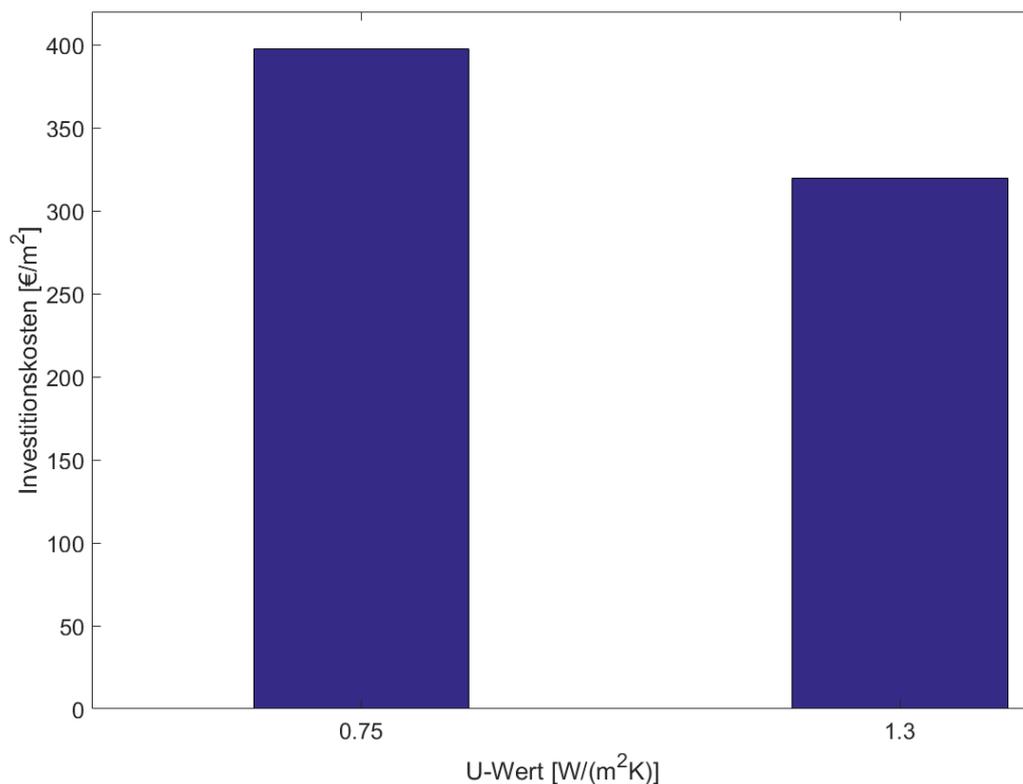


Abbildung 3-5: Spezifische Investition von Effizienzmaßnahmen der Gebäudekomponente Fenster in Abhängigkeit des U-Werts

Die Sanierungstiefen der einzelnen Gebäudekomponenten sind in den nachfolgenden Tabellen (Tabelle 5 bis Tabelle 8) genau beschrieben. Bei der jeweils ersten Sanierungsstufe ist die Instandhaltung der Gebäudekomponente mit ihren Kosten berücksichtigt.

Tabelle 5: Sanierungstiefen der Gebäudekomponente Kellerdecke

Dämmstoffdicke [mm]	U-Wert [W/(m²K)]	Kosten [€/m²]
Instandhaltungsmaßnahme		30,75
60	0,5833	38,25
80	0,4375	40,75
100	0,3500	43,25
120	0,2917	45,75
160	0,2188	50,75
180	0,1944	53,25
200	0,1750	55,75
260	0,1346	63,25
360	0,0972	75,75

Tabelle 6: Sanierungstiefen der Gebäudekomponente Dach

Dämmstoffdicke [mm]	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	Kosten [€/m <sup>2</sup> ]
Instandhaltungsmaßnahme		104,14
60	0,5833	128,80
80	0,4375	137,02
100	0,3500	145,24
120	0,2917	153,46
160	0,2188	169,90
180	0,1944	178,12
200	0,1750	186,34
220	0,1591	194,56
260	0,1346	211,00
300	0,1167	227,44

Tabelle 7: Sanierungstiefen der Gebäudekomponente Fassade

Dämmstoffdicke [mm]	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	Kosten [€/m <sup>2</sup> ]
Instandhaltungsmaßnahme		99,88
60	0,5833	116,74
80	0,4375	122,36
100	0,3500	127,98
120	0,2917	133,60
160	0,2188	144,84
180	0,1944	150,46
200	0,1750	156,08
220	0,1591	161,70
260	0,1346	172,94
300	0,1167	184,18
340	0,1029	195,42
400	0,0875	212,28

Tabelle 8: Sanierungstiefen der Gebäudekomponente Fenster

U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	Kosten [€/m <sup>2</sup> ]
Instandhaltungsmaßnahme	220,27
1,3	319,59
0,75	397,63

### 3.3 Energieträgermix

Für den Gebäudebestand Wien wurde basierend auf Daten von Statistik Austria [4] und Fritz, 2016 [6] folgende Annahmen für den Energieträgermix zur Bereitstellung der Raumwärme für das Jahr 2015 getroffen und während des Betrachtungszeitraums als konstant angenommen.

*Tabelle 9: Anteile jedes Energieträgers am Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser*

Energieträger	Anteil
Gas	47%
Fernwärme	40%
Strom	7%
Öl	4%
Wärmepumpe	1%
Solar	1%

In Wien werden auch andere Energieträger, wie Holz, Pellets und Kohle zur Bereitstellung der Raumwärme verwendet, jedoch werden diese im Modell nicht extra berücksichtigt und sind mit dem Energieträger Öl zusammengefasst. Die Anteile der Energieträger bleiben im Betrachtungszeitraum konstant.

### 3.4 Energiepreise

Für die verwendeten Energiepreise und ihre Entwicklung konnte in dieser Diplomarbeit auf bestehende Daten zurückgegriffen werden. Dabei handelt es sich um zwei Energiepreisentwicklungen, welche aus den Nettopreisen der Haushaltsenergiepreise von Statistik Austria [15] und den relativen Veränderungen der Energiegroßhandelspreise für den Zeitraum 2050 angepasst wurden [6]. Abbildung 3-6 stellt eine Energiepreisentwicklung dar, welche ein „Business-as-Usual“-Szenario darstellt. Abbildung 3-7 zeigt ein Klimaschutzszenario, bei dem hohe Energiepreise für fossile Energieträger angenommen wurden. Im Jahr 2050 sind die Energiepreise der fossilen Energieträger Öl und Gas in diesem Klimaschutzszenario um 47% bzw. um 97% höher als im „Business-as-Usual“-Szenario. In beiden Energiepreisszenarien sind die CO<sub>2</sub> Preise und deren Entwicklung berücksichtigt [16].

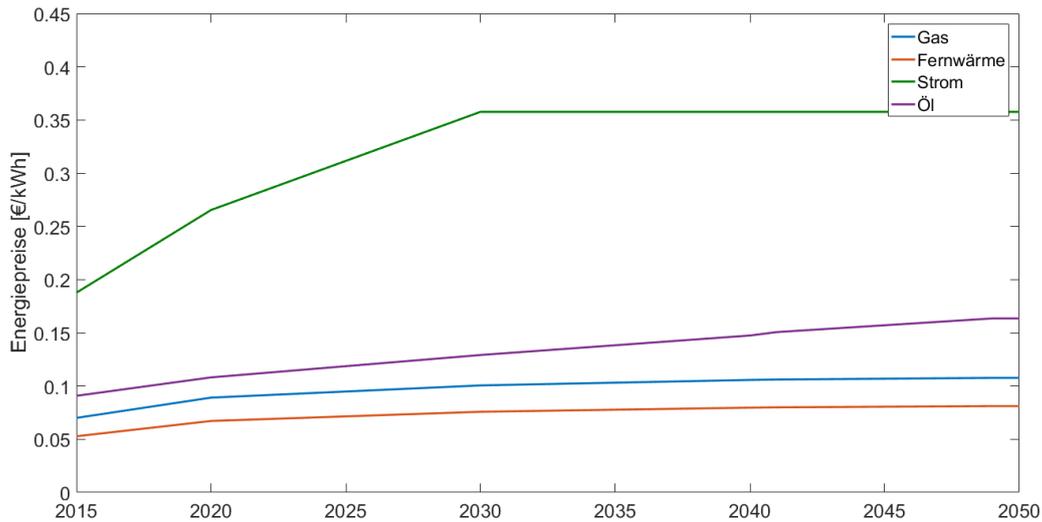


Abbildung 3-6: Energiepreisentwicklung „Business-as-Usual“- Szenario, Quelle: Fritz, 2016

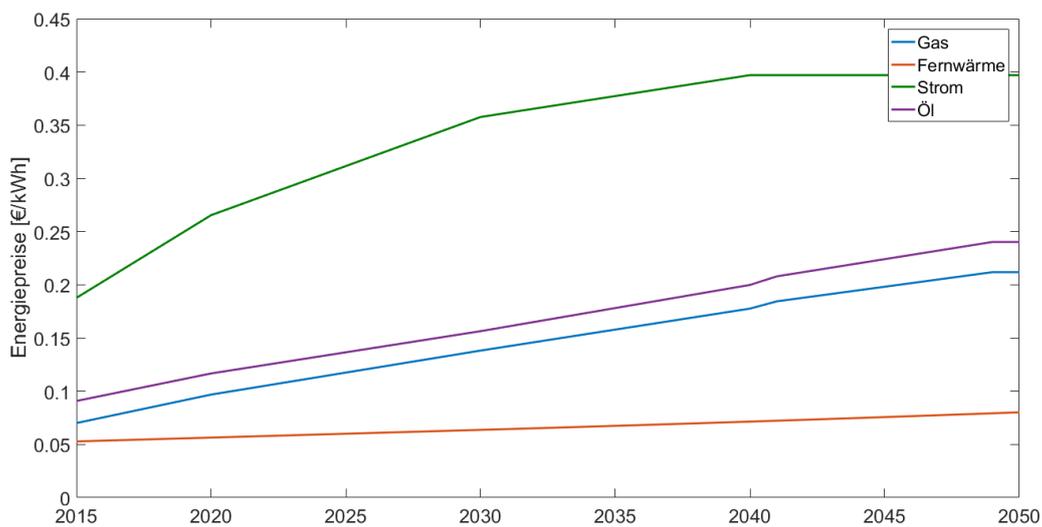


Abbildung 3-7: Energiepreisentwicklung mit hohen Preisen für fossile Energieträger. Quelle: Fritz, 2016

### 3.5 Jahresnutzungsgrade

Um den Endenergieverbrauch für Raumwärme der Gebäude zu ermitteln, ist es notwendig die Heizsysteme zu spezifizieren. Da der Datensatz des Gebäudebestandes keine Information über das Heizsystem der Gebäude enthielt, wurde anhand der Energieträger und deren typischen Heizsystemen die Jahresnutzungsgrade nach [17] und [18] vereinfacht angenommen. Obwohl eine Investition neuer Heizsysteme nicht berücksichtigt wird, wird aber sehr wohl angenommen, dass nach einer Sanierung im Betrachtungszeitraum der Wert der Jahresnutzungsgrade verbessert wird. Beide Werte sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Jahresnutzungsgrade vor und nach einer Sanierung

Energieträger	Alt	Neu
Gas	70%	85%
Fernwärme	80%	93%
Strom	95%	98%
Öl	65%	85%
Wärmepumpe	3	3.6
Solar	40%	50%

### 3.1 CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren

Um die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Endenergieverbrauchs der Gebäude ermitteln zu können, wurden folgende CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren verwendet. Sie werden im Betrachtungszeitraum als konstant angenommen.

Tabelle 11: CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für verschiedene Energieträger. Quelle Fritz, 2016 [6].

Energieträger	Spezifischen CO <sub>2</sub> -Emissionen [kg/kWh]
Gas	0,252
Fernwärme	0,19
Strom	0,157
Öl	0,34
Wärmepumpe	0,157
Solar	0



# 4

## Methode

In diesem Kapitel soll der methodische Teil dieser Diplomarbeit erläutert werden. Die Methode umfasst zum einen die Datenaufbereitung der Maßnahmenbündel und die Beschreibung des erstellten Optimierungsmodells.

Im Optimierungsmodell werden die mathematischen und technischen Zusammenhänge der Optimierungsaufgabe definiert mit dem Ziel, die geringsten jährlichen Energiekosten, unter der Berücksichtigung einer thermischen Sanierung und den damit verbundenen Investitionskosten herauszufinden. Dabei wird zuerst auf das Optimierungsmodell mit der Zielfunktion und den implementierten Nebenbedingungen eingegangen. Die Auswahl der Maßnahmenbündel zur Erreichung der ökonomisch optimierten Sanierung des Gebäudebestandes hängen vom energetischen Ausgangszustand der jeweiligen Gebäudeklassen ab. Als Grundlage für die Berechnung wird daher ein Gebäudebestand verwendet, welcher Daten zur Bauperiode, Zeitraum vorheriger Sanierungsmaßnahmen, spezifischen Heizwärmebedarf, Grundfläche, Brutto-Geschossfläche, Fassadenfläche und Fensterflächen enthält. Zudem besteht eine Auswahl der zu sanierenden Gebäudekomponenten (Kellerdecke, Dach, Fassade und Fenster) und der jeweiligen Sanierungstiefe. In diesem Kapitel wird auch auf die Berechnung der Renovierungszeitpunkte der Gebäudeklassen näher eingegangen.

Zur Ermittlung der ökonomisch sinnvollen Investition in die Gebäudehülle wurde ein gemischt ganzzahliges Optimierungsmodell entwickelt. Dabei wird für jede Gebäudeklasse die optimale Kombination an Maßnahmen für die Gebäudekomponenten ermittelt, welche die jährlichen Energiekosten unter der Berücksichtigung der Investitionskosten in die Gebäudehülle minimiert.

## 4.1 Analyse der Auswirkung von Maßnahmenbündel

Aus den Sanierungsmaßnahmen der vier Gebäudekomponenten mit ihren unterschiedlichen Sanierungstiefen, Kapitel 3.2.2, wurden 4290 Maßnahmenbündel für alle Gebäudeklassen erstellt. Diese ergeben sich aus den Kombinationen der Sanierungstiefen der einzelnen Gebäudekomponenten.

Welche Auswirkungen eine mögliche Anwendung dieser Maßnahmenbündel auf die energetische Kennzahl (HWB) der einzelnen Gebäudeklassen haben, wurde mit einem bestehenden Modell ermittelt [11] [19]. Dieses Modell ist ein dynamisches, stark disaggregiertes techno-sozio-ökonomisches Bottom-up- Simulationstool. Mit diesem Tool können der Energiebedarf, der Endenergiebedarf und die bereitgestellte Energie für Raumwärme, Raumkühlung und Warmwasserbereitung des Gebäudebestandes einer bestimmten Region sowie seine möglichen zukünftigen Entwicklungen beschrieben und analysiert werden.

Das Maßnahmenbündel Instandhaltung, entspricht der Instandhaltung aller vier Gebäudekomponenten, verbessert die thermische Qualität des Gebäudes nicht und hat somit auch keinen Einfluss auf den Heizwärmebedarf.

Mit dem ambitioniertesten Maßnahmenbündel werden alle vier Gebäudekomponenten mit der größten Sanierungstiefe bzw. dem niedrigsten U-Wert saniert. Dadurch kann die thermische Qualität des Gebäudes um ein Vielfaches verringert werden.

### 4.1.1 Energetische Analyse der Auswirkung von Maßnahmenbündel

Für ein Einfamilienhaus der Bauperiode 1890-1918, deren Fassadensanierung im Zeitraum von 1932-1952 stattfand, ergibt sich durch dieses ambitionierte Maßnahmenbündel eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um 93%. Ein kleines Mehrfamilienwohngedäude mit der Bauperiode 1890-1918 und einer Fassadensanierung im Zeitraum 2000-2008 erreicht ebenfalls, durch die Umsetzung des ambitioniertesten Maßnahmenpakets der Gebäudehülle, eine Minderung des Heizwärmebedarfs um 92%.

Wie die einzelnen Maßnahmenbündel die thermische Qualität der Gebäude verändern können, zeigt Abbildung 4-1. Dabei wurden alle durch die Maßnahmenbündel erreichbaren Werte des Heizwärmebedarfs in Abhängigkeit der Maßnahmenbündel der fünf ausgewählten Gebäudeklassen (Einfamilienhaus, kleines Mehrfamilienwohngedäude, großes Mehrfamilienwohngedäude, Büros in Wohngebäuden und Bürogebäude) in absteigender Reihenfolge dargestellt.

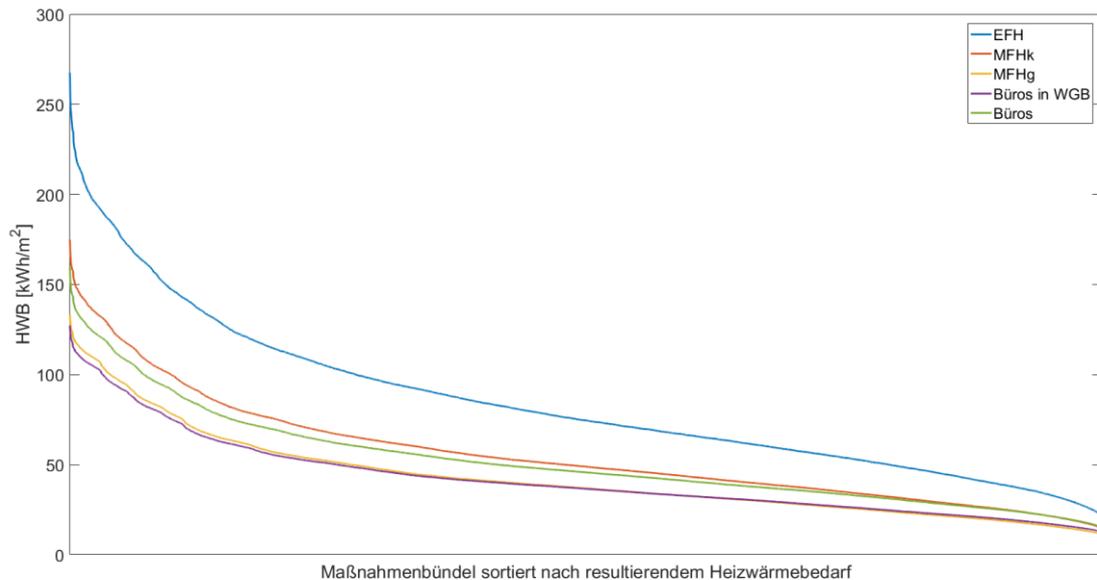


Abbildung 4-1: Resultierender Heizwärmebedarf, in absteigender Reihenfolge, durch die Anwendung aller 4290 Maßnahmenbündel für repräsentative Gebäude der Gebäudekategorien Einfamilienhaus, kleines Mehrfamilienwohngebäude, großes Mehrfamilienwohngebäude, Büros in Wohngebäuden und Bürogebäuden mit der Bauperiode 1890-1918. Die einzelnen Maßnahmenbündel unterscheiden sich durch die Kombination der verschiedenen Sanierungstiefen für die Gebäudekomponenten (Kellerdecke, Dach, Fassade und Fenster).

Für die in Abbildung 4-1 dargestellten Gebäudeklassen der Gebäudekategorien Einfamilienhaus, kleines Mehrfamilienwohngebäude, großes Mehrfamilienwohngebäude, Büros in Wohngebäuden und Bürogebäude, wurde dieselbe Bauzeit von 1890-1918 ausgewählt.

Tabelle 12 zeigt die Werte des Heizwärmebedarfs, die sich für die ausgewählten Gebäudeklassen ergeben, wenn sowohl die minimalen und die ambitionierten Sanierungsmaßnahmen aller 4 Gebäudekomponenten angewandt werden.

Werden diese ausgewählten Gebäude mit minimalen Sanierungsmaßnahmen renoviert, würde sich der Heizwärmebedarf schon um rund 40% reduzieren. Minimale Sanierungsmaßnahmen bedeuten, dass alle 4 Gebäudekomponenten mit der minimalsten Sanierungstiefe, und den geringsten Investitionskosten pro m<sup>2</sup> Bauteilfläche, saniert werden. Kellerdecke, Dach und Fassade werden dabei mit 60 mm Dämmstoffdicke versehen. Die Gebäudekomponente Fenster wird dabei mit Fenstern mit einem U-Wert von 1,3 W/(m<sup>2</sup>K) getauscht.

Würde man diese Gebäude mit den ambitioniertesten Sanierungsmaßnahmen sanieren, das heißt Maßnahmen mit den niedrigsten U-Werten der Gebäudekomponenten, kann der Heizwärmebedarf deutlich reduziert werden. Bei der ambitioniertesten Sanierung der Gebäude werden die Gebäudekomponenten mit einer Dämmstoffdicke von 360 mm für die Kellerdecke, von 300 mm für das Dach und 400 mm für die Fassade versehen. Die Gebäudekomponente Fenster wird dabei mit Fenstern mit einem U-Wert von 0.75 W/(m<sup>2</sup>K) getauscht.

*Tabelle 12: Auswirkung auf den Heizwärmebedarf für ausgewählte Referenzgebäude der Gebäudeklassen Einfamilienhaus, kleines Mehrfamilienwohngebäude, großes Mehrfamilienwohngebäude, Büros in Wohngebäuden und Bürogebäude durch zwei Maßnahmenbündel, welche eine Sanierung aller Gebäudekomponenten mit minimalen und ambitionierten U-Werten berücksichtigen.*

<b>Gebäudekategorie</b>	<b>HWB vor Sanierung</b>	<b>minimale Sanierungsmaßnahmen der Gebäudekomponenten</b>	<b>ambitionierte Sanierungsmaßnahmen der Gebäudekomponenten</b>
Einfamilienhaus	$267 \frac{kWh}{m^2}$	$159 \frac{kWh}{m^2}$	$19 \frac{kWh}{m^2}$
Kleine Mehrfamilienwohngebäude	$175 \frac{kWh}{m^2}$	$102 \frac{kWh}{m^2}$	$13 \frac{kWh}{m^2}$
Große Mehrfamilienwohngebäude	$133 \frac{kWh}{m^2}$	$78 \frac{kWh}{m^2}$	$11 \frac{kWh}{m^2}$
Büros in Wohngebäuden	$127 \frac{kWh}{m^2}$	$75 \frac{kWh}{m^2}$	$12 \frac{kWh}{m^2}$
Bürogebäude	$159 \frac{kWh}{m^2}$	$94 \frac{kWh}{m^2}$	$14 \frac{kWh}{m^2}$

In Abbildung 4-2 und Tabelle 13 werden die Auswirkungen ausgewählter Maßnahmenbündel auf den energetischen Zustand des in Abbildung 4-1 schon dargestellten Einfamilienhauses genauer untersucht. Dieses exemplarische Einfamilienhaus wurde in der Zeit von 1890-1918 errichtet und es wird angenommen, dass eine Sanierung der Fassade im Zeitraum von 1932 bis 1952 stattfand. Der energetische Ausgangszustand wurde mit einem Heizwärmebedarf von  $267 \text{ kWh/m}^2$  bemessen. In Abbildung 4-2 sind die Auswirkung einzelner ausgewählter Maßnahmenbündel farblich markiert. Diese gekennzeichneten Werte sind in Tabelle 13 näher beschrieben.

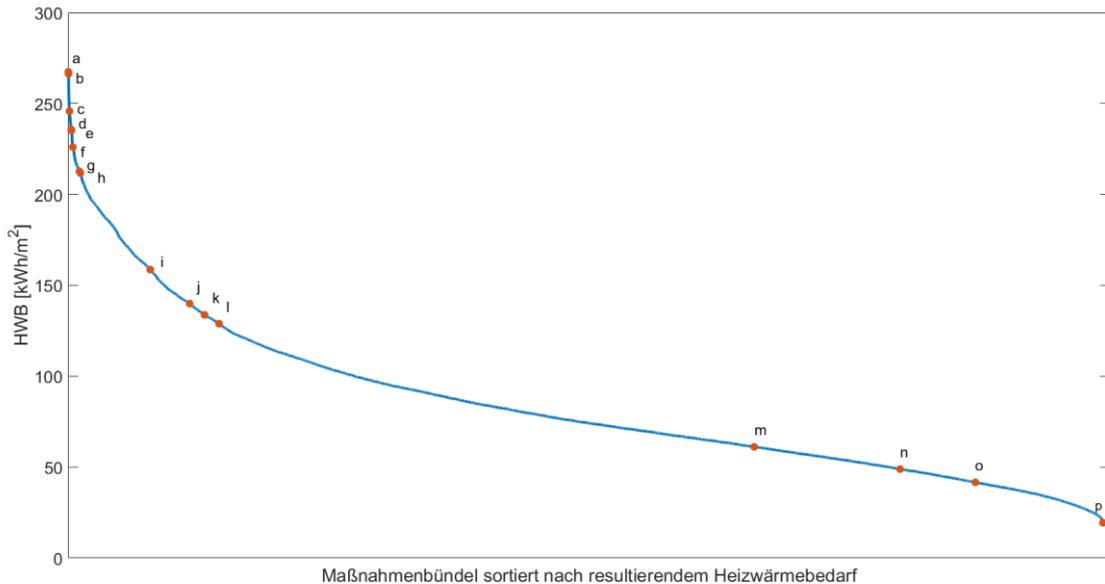


Abbildung 4-2: Resultierender Heizwärmebedarf, in absteigender Reihenfolge, durch die Anwendung aller 4290 Maßnahmenbündel für ein Einfamilienhaus (Bauperiode 1890-1918, Fassadensanierung 1932-1952) nach thermischer Sanierung mit allen Maßnahmenbündeln. Ausgewählte Maßnahmenbündel sind farblich markiert und beschriftet.

Tabelle 13 zeigt, aus welchen Maßnahmen der Gebäudekomponenten sich die in Abbildung 4-2 farblich markierten Maßnahmenbündel zusammensetzen. Dabei bedeutet Instandhaltung, dass sich die thermische Qualität der Gebäudekomponente nicht ändert. Die Bezeichnung „Min“ bedeutet, dass die Gebäudekomponenten mit der kostengünstigsten Maßnahme, der minimalen Sanierungstiefe auf die Gebäudekomponente angewandt wird und dabei die thermische Qualität der Gebäudekomponente verbessert wird. Die Abkürzung „Max“ bedeutet, dass die Gebäudekomponente mit dem ambitioniertesten Sanierungstiefe angewendet wird. Dabei verbessert sich die thermische Qualität der Gebäudekomponente mit der maximalen Sanierungstiefe.

Das Maßnahmenbündel „a“ berücksichtigt die Instandhaltung aller vier Gebäudekomponenten. Der Heizwärmebedarf bei dieser Maßnahme ändert sich dadurch nicht und beträgt 267 kWh/m<sup>2</sup>. Bei Maßnahmenbündel „b“ wird nur die Gebäudekomponente Dach mit der minimalen Sanierungstiefe, einer Wärmedämmung von 60 mm Dämmstoffdicke, berücksichtigt. Dadurch wird der Heizwärmebedarf um 0,4% vermindert. Bei Maßnahmenbündel „d“ wird jedoch wieder nur die Gebäudekomponente Dach mit der maximalen Sanierungstiefe, eine Wärmedämmung mit 300 mm Dämmstoffdicke, saniert. Dabei kann der Heizwärmebedarf schon um rund 12% vermindert werden. Maßnahmenbündel „k“ zeigt, dass eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um 50% mit nur einer Gebäudekomponente möglich ist. Dabei wird die Gebäudekomponente Fassade mit der 11. von möglichen 13 Sanierungstiefen saniert. Dies entspricht einer Wärmedämmung von 300 mm.

Tabelle 13: Resultierender Heizwärmebedarf der durch die ausgewählten Maßnahmenbündel in Abbildung 4-2 für ein repräsentatives Einfamilienhaus erreicht werden kann.

	Kellerdecke	Dach	Fassade	Fenster	HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]
a	Instandhaltung	Instandhaltung	Instandhaltung	Instandhaltung	267
b	Instandhaltung	Min	Instandhaltung	Instandhaltung	266
c	Instandhaltung	Instandhaltung	Instandhaltung	Min	246
d	Instandhaltung	Max	Instandhaltung	Instandhaltung	236
e	Min	Instandhaltung	Instandhaltung	Instandhaltung	235
f	Instandhaltung	Instandhaltung	Instandhaltung	Max	226
g	Instandhaltung	Instandhaltung	Min	Instandhaltung	213
h	Max	Instandhaltung	Instandhaltung	Instandhaltung	212
i	Min	Min	Min	Min	159
j	Max	Max	Instandhaltung	Max	140
k	Instandhaltung	Instandhaltung	11/13	Instandhaltung	134
l	Instandhaltung	Instandhaltung	Max	Instandhaltung	129
m	Instandhaltung	Max	Max	Max	61
n	Max	Max	Max	Instandhaltung	49
o	Max	Instandhaltung	Max	Max	42
p	Max	Max	Max	Max	19

Außerdem ist in der Tabelle 13 zu erkennen, dass Maßnahmen die nur eine Gebäudekomponente betreffen, eine Verminderung des Heizwärmebedarfs bewirken. Bei Maßnahmenbündel „c“ werden nur die Fenster des Einfamilienhauses, mit einem U-Wert von 1,3 W/(m<sup>2</sup>K) erneuert. Dabei kann eine Reduzierung des Heizwärmebedarfs um 7,8% erzielt werden. Geht man bei dieser Gebäudekomponente einen Schritt weiter und saniert die Fenster mit einem U-Wert von 0,75 W/(m<sup>2</sup>K), entspricht dem Maßnahmenbündel „f“, kann der Heizwärmebedarf schon um 15,4% gesenkt werden. Welche Verringerung alle anderen ausgewählten Maßnahmenbündel erzielen ist in Tabelle 13, nach größter Einsparung sortiert, aufgelistet.

#### 4.1.2 Ökonomische Auswirkungen der Maßnahmenbündel

Bisher wurden die erzielten Einsparungen als Auswirkung der Maßnahmenbündel auf die Gebäude und ihre thermische Qualität betrachtet. Dabei wurde noch keine Aussage über die Kosten der Maßnahmen getroffen. Welche Investitionskosten diese Energieeinsparungen der ausgewählten Maßnahmenbündel haben, wird nachfolgend betrachtet. Dazu wird wieder ein Einfamilienhaus herangezogen, welches 1890-1918 gebaut wurde. Eine Renovierung der Fassade fand im Zeitraum von 1932 bis 1952 statt. Diese Gebäudeklasse hat einen Heizwärmebedarf von 417 kWh/m<sup>2</sup>.

Um die Kosten pro eingesparter kWh der Maßnahmenbündel ( $KN_{mb}$ ) zu beziffern wurde folgende Berechnung durchgeführt.

$$KN_{mb} = \frac{\alpha * \sum_{Komponenten} (MK_{Komponente_{mb}} - KI_{Komponente}) * A_{Komponente}}{BGF * (HWB_{2015} - HWB_{mb})} \quad \forall mb \quad (4.1)$$

Dabei werden die Kosten für die Instandhaltung der Gebäudekomponenten ( $KI_{Komponente}$ ) von den Maßnahmenkosten der Maßnahmenbündel ( $mb$ ) je Komponente ( $MK_{Komponente_{mb}}$ ) abgezogen und mit den entsprechenden Flächen je Komponente ( $A_{Komponente}$ ) und dem Annuitätenfaktor  $\alpha$  multipliziert. Welche Reduktion die Anwendung der Maßnahmenbündel bringt, wird im Nenner der Gleichung (4.1) berechnet. Die Ersparnis des Wärmebedarfs wird durch die Multiplikation der Bruttogeschossfläche ( $BGF$ ) mit der Differenz des spezifischen Heizwärmebedarfs, dabei wird der spezifische Heizwärmebedarf des Maßnahmenbündels ( $HWB_{mb}$ ) vom spezifische Heizwärmebedarf des Jahres 2015 ( $HWB_{2015}$ ) abgezogen, berechnet.

Die Investitionskosten hängen von den jeweiligen Flächen der Gebäudekomponenten und dem energetischen Ausgangszustand des betrachteten Gebäudes ab.

Am Beispiel des Einfamilienhauses mit den Daten (Bauperiode: 1890-1918, Fassadensanierung: 1932-1952, spezifischer Heizwärmebedarf 417 kWh/m<sup>2</sup>) ergibt sich wie in Abbildung 4-3 zu sehen folgender Kostennutzen für die ausgewählten Maßnahmenbündel.

Wie hier gut zu erkennen ist, haben die 3 Maßnahmenbündel, bei (min KE, min(KE+FA) und min FA) die geringsten Kosten pro eingesparter kWh. Die Abkürzungen „min“ und „max“ geben an mit welcher Sanierungstiefe die Gebäudekomponenten Kellerdecke (KE), Dach (DA), Fassade (FA) und Fenster (FE) saniert werden. Mit „min“ werden jene Maßnahmen der Gebäudekomponenten bezeichnet, die die minimalste Sanierungstiefe aufweisen mit der eine Verbesserung der thermischen Qualität der Gebäudekomponente möglich ist. Bei den Gebäudekomponenten Kellerdecke, Dach und Fassade werden dabei Maßnahmen mit einer Dämmstoffdicke von 60 mm berücksichtigt. Bei der Gebäudekomponente Fenster werden die Fenster mit neuen Fenstern mit einem U-Wert von 1,3 W/(m<sup>2</sup>K) berücksichtigt. Bei „max“ werden die Gebäudekomponenten mit der ambitioniertesten Sanierungstiefe saniert. Dabei wird die Gebäudekomponente Kellerdecke mit einer Wärmedämmung mit der Dämmstoffdicke von 360 mm versehen. Die Gebäudekomponente Dach wird mit einer Wärmedämmung der Dämmstoffdicke von 300 mm berücksichtigt. Die Gebäudekomponente Fassade erhält eine Wärmedämmung mit der Dämmstoffdicke von 400 mm. Und die Gebäudekomponente Fenster wird mit der Maßnahme mit einem U-Wert von 0,75 W/(m<sup>2</sup>K) berücksichtigt.

Die höchsten Kosten für eine eingesparte kWh des Wärmebedarfs ergibt sich bei diesem Einfamilienhaus mit der Maßnahme, welche die ambitionierteste Sanierungstiefe der Gebäudekomponente Dach berücksichtigt.

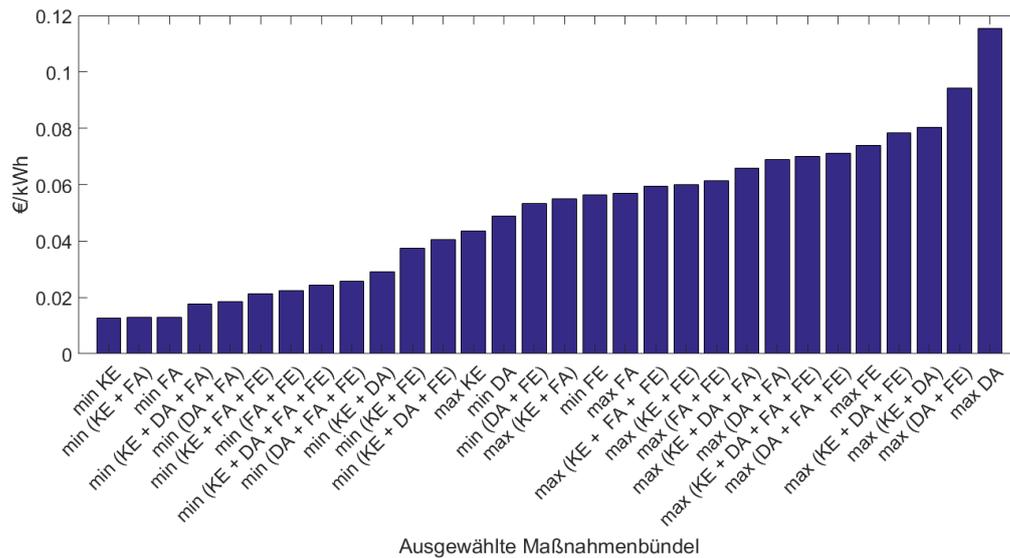


Abbildung 4-3: Kosten-Nutzen-Analyse ausgewählter Maßnahmenbündel eines Einfamilienhauses (Bauperiode: 1890-1918, Fassadensanierung: 1932-1952, Heizwärmebedarf: 417 kWh/m<sup>2</sup>).

Am Beispiel eines großen Mehrfamilienwohngebäudes (Bauperiode: 1890-1918, Fassadensanierung: 1975-1995, spezifischer Heizwärmebedarf 214 kWh/m<sup>2</sup>) ergeben sich, in Abbildung 4-4 dargestellt, folgende Kostennutzen für ausgewählte Maßnahmenbündel. Dabei ergeben sich wieder bei einer Sanierung des Daches mit der ambitioniertesten Maßnahme die höchsten Kosten pro eingesparter kWh des Wärmebedarfs. Die Reihenfolge der Maßnahmen welche den Kostennutzen der ausgewählten Maßnahmen aufsteigend sortiert, ist beim großen Mehrfamilienwohngebäude teilweise unterschiedlich als beim Einfamilienhaus. Das Maßnahmenbündel welches die maximale Sanierungstiefe der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Fenster berücksichtigt, kostet pro eingesparter kWh Wärmebedarf 5,99 ct bei der Gebäudekategorie Einfamilienhaus. Dasselbe Maßnahmenbündel kostet bei der Gebäudekategorie großes Mehrfamilienwohngebäude pro eingesparter kWh Wärmebedarf 6,56 ct.

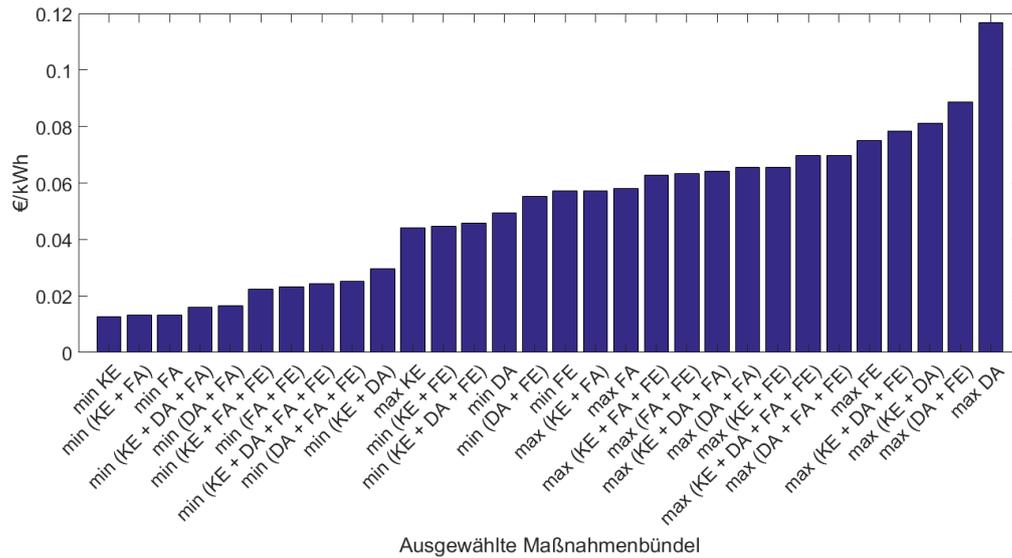


Abbildung 4-4: Kosten-Nutzen-Analyse ausgewählter Maßnahmenbündel eines großen Mehrfamilienwohngebäudes (Bauperiode: 1890-1918, Fassadensanierung: 1975-1995, Heizwärmebedarf: 214 kWh/m<sup>2</sup>).

## 4.2 Das Optimierungsmodell

Das Ziel dieser Diplomarbeit besteht darin, ökonomisch optimierte Maßnahmenbündel für den Gebäudebestand von Wien zu erhalten. Das heißt zu exogen vorgegeben Zeitpunkten muss eine Maßnahme gewählt werden. Die Maßnahmen unterscheiden sich in solche, die die thermische Qualität der Gebäudeklassen beeinflussen und jenen Maßnahmen, die nur die Instandhaltung der Gebäudehülle veranlasst. Die Instandhaltung der Gebäudehülle hat zwar geringere Investitionskosten aber sie bewirkt auch keine Verbesserung der energetischen Kennzahlen und hat somit keine Auswirkung auf die jährlichen Energiekosten.

### 4.2.1 Renovierungszeitpunkte

Wann die Gebäudeklassen im Betrachtungszeitraum (2015-2050) renoviert werden, wird exogen vorgegeben. Ausgangszeitpunkt für die Berechnung der Renovierungszeitpunkte ist das im Gebäudebestand Wien angegebene Jahr der letzten Fassadensanierung. Dabei wurde vereinfacht angenommen, dass im Jahr der Fassadensanierung, die übrigen drei Gebäudekomponenten (Kellerdecke, Dach und Fenster) auch saniert wurden. Die technische Lebensdauer der Gebäude bzw. der Gebäudekomponenten wurde bei allen Gebäuden mit 30 Jahren angenommen.

Die Berechnung der Renovierungszeitpunkte erfolgte mit:

$$Rzp_{t,b} = \begin{cases} 1, & \text{Alter}(b_{t=2015}) \geq LD \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{für } t = 2015 \text{ und } \forall b \quad (4.2)$$

$$Rzp_{t,b} = \begin{cases} 1, & LD - \text{Alter}(b_t) = 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall t > 2015, \text{ und } \forall b \quad (4.3)$$

Dabei wird das Alter der Gebäudeklasse zum Zeitpunkt  $t=2015$  ermittelt. Ist das Alter der Gebäudeklassen zu diesem Zeitpunkt größer gleich der Lebensdauer, so wird der Renovierungszeitpunkt für die Gebäudeklassen  $Rzp_{t,b}$  für das Jahr 2015 auf 1 gesetzt, zu sehen in Gleichung (4.2). Ist das Alter der Gebäudeklassen zu diesem Zeitpunkt kleiner als die Lebensdauer, so werden keine Renovierungszeitpunkte gesetzt.

Für die weitere Bestimmung der Renovierungszeitpunkte wird die Gleichung (4.3) angewandt. Sobald zu einem Zeitpunkt das Alter des Gebäudes gleich der Lebensdauer ist, wird die Variable  $Rzp_{t,b}$  auf 1 gesetzt und der Renovierungszeitpunkt für die Gebäudeklassen ermittelt.

Bei diesen Renovierungszeitpunkten im Betrachtungszeitraum wird angenommen, dass auch das Heizsystem getauscht wird. Der dadurch verbesserte Jahresnutzungsgrad wird für die Berechnung des Endenergiebedarfs berücksichtigt. Die Investitionskosten für den Heizungstausch werden aber vernachlässigt.

Da die Lebensdauer der Gebäudekomponenten aller Gebäudeklassen 30 Jahre beträgt, werden einige Gebäudeklassen, z.B.: Einfamilienhaus, Bauperiode 1980-1918 und Fassadensanierung 1932-1952), im Betrachtungszeitraum 2-mal saniert.

#### 4.2.2 Zielfunktion

Die laufenden jährlichen Kosten, setzen sich aus den Energiekosten  $EK$  und den Investitionskosten  $IK$  in die Gebäudehülle zusammen. Eine Investition in die Gebäudehülle kann eine Verminderung der laufenden jährlichen Kosten bewirken. Die laufenden jährlichen Kosten werden in der Zielfunktion (4.4) minimiert.

$$\min_t \sum_{b \in B} IK_{t,b} + EK_{t,b} \quad \forall t \quad (4.4)$$

Für jedes Jahr im Betrachtungszeitraum werden die jährlichen Kosten für alle Gebäudeklassen minimiert.

Investitionen in die Gebäudehülle sind nach Ablauf der technischen Lebensdauer zu tätigen. Durch Gleichung (4.2) und (4.3) sind die Renovierungszeitpunkte der Gebäudeklassen vorgegeben. Zu diesen Renovierungszeitpunkten ist die ökonomisch optimale Maßnahme für alle Gebäudeklassen zu treffen, Gleichung (4.5).

$$\sum_{mb \in MB} X_{t,b,mb} = Rzp_{t,b} \quad \forall t, b \quad (4.5)$$

Die binäre Entscheidungsvariable  $X_{t,b,mb}$  definiert, dass in jedem exogen vorgegebenen Renovierungszeitpunkt des Betrachtungszeitraums eine Maßnahme für die Sanierung der Gebäudehülle getroffen werden muss, wobei auch nur die Instandhaltung der Gebäudekomponenten als Maßnahme ausgewählt werden kann. Das heißt es wird das ökonomisch optimierte

Maßnahmenbündel für die Gebäudeklassen definiert, mit dem die jährlichen Kosten ein Minimum erreichen.

Die Investitionskosten der Maßnahmenbündel in die Gebäudehülle der Gebäudeklassen ( $IKmb_{t,b}$ ) ergeben sich zu:

$$IKmb_{t,b} = \sum_{mb \in MB} X_{t,b,mb} * (MK_{KE_{mb}} * A_{KE_b} + MK_{DA_{mb}} * A_{DA_b} + MK_{FA_{mb}} * A_{FA_b} + MK_{FE_{mb}} * A_{FE_b}) \quad \forall t, b \quad (4.6)$$

Dabei werden die Maßnahmenkosten der Gebäudekomponenten je Maßnahmenbündel ( $MK_{KE_{mb}}, MK_{DA_{mb}}, MK_{FA_{mb}}$  und  $MK_{FE_{mb}}$ ) mit den jeweiligen Flächen der Gebäudekomponenten je Gebäudeklasse ( $A_{KE_b}, A_{DA_b}, A_{FA_b}$  und  $A_{FE_b}$ ) multipliziert. Wobei die Entscheidungsvariable mit dem jeweiligen Produkt aus Maßnahmenkosten und Komponentenfläche multipliziert wird.

Welcher Heizwärmebedarf pro Gebäudeklasse mit dem ausgewählten Maßnahmenbündel erreicht wird, wird mittels Gleichung (4.7) bekannt.  $HWBneu_{t,b}$  gibt den Heizwärmebedarf der Gebäudeklasse an, der durch die ökonomisch optimierte Sanierung erreicht wird. In der Matrix  $HWBnS_{b,mb}$  sind die Auswirkungen der Maßnahmenbündel auf den Heizwärmebedarf der Gebäudeklassen beschrieben.

$$HWBneu_{t,b} = \sum_{mb \in MB} X_{t,b,mb} * HWBnS_{b,mb} \quad \forall t, b \quad (4.7)$$

Sobald bei einem Gebäude eine Sanierung stattfindet, wird der dadurch erreichte Heizwärmebedarf  $HWBneu_{t,b}$  für den weiteren Betrachtungszeitraum fortgeschrieben. Findet zum Zeitpunkt t keine Sanierung statt, wird auf den Wert in der Variable  $HWBVerlauf_{t,b}$  zurückgegriffen, Gleichung (4.8). Dieser wird initial mit dem Ausgangswert des Heizwärmebedarfs der Gebäudeklassen belegt, Gleichung (4.9).

$$HWB_{t,b} = Rzp_{t,b} * HWBneu_{t,b} + (1 - Rzp_{t,b}) * HWBVerlauf_{t,b} \quad \forall t, b \quad (4.8)$$

$$HWBVerlauf_{t=2015,b} = HWB_{AW_b} \quad \forall b \quad (4.9)$$

Die Investitionskosten der Maßnahmenbündel ( $IKmb_{t,b}$ ) werden mittels des Annuitätenfaktors  $\alpha$  auf den jährlich anfallenden Zahlungsstrom der Investition berechnet. Die jährlichen Zahlungsströme der Investition ( $IK_{t,b}$ ) werden auch nach einer getätigten Investition bis zum Ende ihrer Lebensdauer fortgeschrieben, Gleichung (4.10). Die Variable  $IKVerlauf_{t,b}$  wird initial mit dem Wert Null belegt, Gleichung (4.11). Sobald eine Investition getätigt wird, wird ihre Annuität in  $IKVerlauf_{t,b}$  gespeichert.

$$IK_{t,b} = Rzp_{t,b} * \alpha * IKmb_{t,b} + (1 - Rzp_{t,b}) * IKVerlauf_{t,b} \quad \forall t, b \quad (4.10)$$

$$IKVerlauf_{t=2015,b} = 0 \quad \forall b \quad (4.11)$$

Der Wärmebedarf ( $WB_{t,b}$ ) ergibt sich durch folgende Multiplikation:

$$WB_{t,b} = HWB_{t,b} * BGF_b * Gebäudeanzahl_b \quad \forall t, b \quad (4.12)$$

Dabei werden der Heizwärmebedarf ( $HWB_{t,b}$ ) mit der Bruttogeschossfläche ( $BGF_b$ ) und der Anzahl an Gebäuden je Gebäudeklasse ( $Gebäudeanzahl_b$ ) multipliziert.

Um den Endenergiebedarf ( $EEB_{t,b,et}$ ) zu bestimmen, müssen die Anteile der Energieträger ( $AnteileET_{t,et}$ ) und deren spezifischen Jahresnutzungsgrade ( $\eta_{t,et}$ ) berücksichtigt werden, zu sehen in Gleichung (4.13).

$$EEB_{t,b,et} = WB_{t,b} * \frac{AnteileET_{t,et}}{\eta_{t,et}} \quad \forall t, b, et \quad (4.13)$$

Die jährlichen Energiekosten für die Gebäudeklassen ( $EK_{t,b}$ ) ergeben sich aus der Summe der Multiplikation des Endenergiebedarfs und dessen Energiepreis ( $EP_{t,et}$ ) je Energieträger:

$$EK_{t,b} = \sum_{et \in ET} EEB_{t,b,et} * EP_{t,et} \quad \forall t, b \quad (4.14)$$

Eine kurze Beschreibung aller verwendeten Variablen und Parameter führt Tabelle 15 und Tabelle 16 auf.

Das Optimierungsmodell wählt für jede Gebäudeklasse die optimalen Maßnahmen aus um die jährlichen Kosten, die sich aus den Energiekosten und den Investitionskosten zusammensetzen, zu minimieren. Dadurch wird den Gebäudeklassen ein neuer Heizwärmebedarf zugewiesen, außer es wird die Maßnahme der Instandhaltung ausgewählt. In diesem Fall ändert sich der Heizwärmebedarf der Gebäudeklasse nicht. Im Fall einer Sanierung werden alle nötigen Informationen, wie der Heizwärmebedarf der durch das optimierte Maßnahmenbündel erreicht wird, der Index des Maßnahmenbündels ausgegeben.

Die zweiten Sanierungszeitpunkte einiger Gebäudeklassen finden frühestens 2035 statt, was sich aufgrund der Annahmen hinsichtlich der technischen Lebensdauer von 30 Jahren ergibt. Da für dieses Jahr keine Annahmen zu den Kosten und der Qualität der Dämmstoffe und somit auch keine Aussage zu ihren Auswirkungen auf den Heizwärmebedarf getroffen werden, ändert sich die Matrix  $HWBnS_{b,mb}$  für den zweiten Sanierungszeitpunkt nicht. Auch für die Kostenfunktionen der Maßnahmen der Gebäudekomponenten werden dieselben angenommen. Jedoch wird die Dämmstoffdicke um jene Dämmstoffdicke reduziert, welche beim ersten Renovierungszeitpunkt ausgewählt wurde. Wird nun als Beispiel eine Gebäudeklasse im ersten Sanierungszeitpunkt mit der

Maßnahme „60mm Fassadendämmung“ renoviert, so wird für den Fall, dass zum zweiten Sanierungszeitpunkt wieder eine Maßnahme der Gebäudekomponente Fassade getätigt wird, nur die Differenz der Dämmstoffdicke bei der Kostenfunktion der Fassade berücksichtigt. Wird also bei der zweiten Sanierung die Maßnahme 180mm gewählt, so wird bei der Kostenfunktion nur eine Dämmstoffdicke von 120mm berücksichtigt. Diese Methode wird bei den Gebäudekomponenten Kellerdecke, Dach und Fassade angewandt. Bei der Gebäudekomponente Fenster, kann diese Berechnung nicht angewendet werden, da ja im Fall einer Fenstersanierung keine Addition der Dämmstoffdicken, wie in den anderen drei Fällen möglich ist.

### 4.2.3 Investitionskosten

Investitionen in die Gebäudehülle sind mit Kosten verbunden, welche bei der Aufbringung der Maßnahme anfallen. Um die Investitionen im Modell wirtschaftlich zu bewerten, werden die Investitionskosten über die Annuitätenmethode berechnet. Dabei werden die gesamten Investitionskosten der unterschiedlichen Maßnahmen  $IK_i$  auf durchschnittliche Jahreskosten, Annuität  $An_i$ , umgelegt, die sich für die Nutzungsdauer  $LD$  der Investition unter Berücksichtigung des Zinssatzes  $z$  ergeben.

Folgende Vereinfachungen wurden getroffen:

- Die gesamte Investition wird einmalig im jeweiligen Jahr getätigt. Somit müssen keine Auf- bzw. Abzinsungen auf den Investitionszeitpunkt vorgenommen werden.
- Alle Maßnahmen haben eine einheitliche technische Lebensdauer von 30 Jahren.
- Der Zinssatz ist für alle Maßnahmen gleich und während der gesamten Lebensdauer konstant.

Die Annuität, die durch die Investition jährlich entstehenden Kosten während der Lebensdauer ergeben sich zu:

$$An_{i_t} = \alpha * IK_i \quad (4.15)$$

Der Annuitätenfaktor ergibt sich aufgrund der gleichen Lebensdauer der Maßnahmen für alle Investitionen zu:

$$\alpha = \frac{z * (1 + z)^{LD}}{(1 + z)^{LD} - 1} \quad (4.16)$$

## 4.3 Szenariendefinition

In den Szenarien wird durch Parametervariation die Auswirkung der Änderung auf die Wirtschaftlichkeit hinsichtlich unterschiedlicher Energiepreise der Energieträger analysiert.

Es werden drei Szenarien für die Energiepreise der Energieträger ausgewählt und die Auswirkungen auf die Renovierungsstrategien und den Endenergiebedarf betrachtet.

Das Energiepreisszenario 1 beinhaltet die in Abbildung 3-6 dargestellte Energiepreisentwicklung. Beim Energiepreisszenario 2 werden die Energiepreise des Jahres 2015 im Betrachtungszeitraum als konstant angenommen, zu sehen in Tabelle 14. Das Energiepreisszenario 3 beinhaltet die hohen Energiepreise für fossile Energieträger, dargestellt in Abbildung 3-7.

Tabelle 14: Energiepreise als Annahme für den Betrachtungszeitraum, Energiepreisszenario 2

Energieträger	ct/kWh
Gas	7,0
Fernwärme	5,3
Strom	18,8
Öl	9,1
Wärmepumpe	18,8
Solar	0

Tabelle 15: Verwendete Indizes, Variablen des Optimierungsmodells

Index	Einheit	Beschreibung
$b$	-	Index der Gebäudeklassen
$et$	-	Index der Energieträger
$mb$	-	Index der Maßnahmenbündel
$t$	$a$	Index des Betrachtungszeitraums in Jahren
Variable	Einheit	Beschreibung
$Alter(b_t)$	$a$	Alter der Gebäudeklassen
$EEB_{t,b,et}$	$kWh$	Endenergiebedarf je Gebäudeklasse und Energieträger
$EK_{t,b}$	$\frac{\text{€}}{a}$	Energiekosten je Gebäudeklasse
$HWB_{t,b}$	$\frac{kWh}{m^2}$	Heizwärmebedarf je Gebäudeklasse
$HWB_{neu,t,b}$	$\frac{kWh}{m^2}$	Durch das optimale Maßnahmenbündel resultierender Heizwärmebedarf je Gebäudeklasse
$HWB_{Verlauf,t,b}$	$\frac{kWh}{m^2}$	Verlauf des Heizwärmebedarfs je Gebäudeklasse
$IK_{t,b}$	$\frac{\text{€}}{a}$	Annuität der Investitionskosten der angewandten optimalen Maßnahmenbündel je Gebäudeklasse
$IK_{mb,t,b}$	€	Investitionskosten der angewandten Maßnahmenbündel je Gebäudeklasse
$IK_{Verlauf,t,b}$	$\frac{\text{€}}{a}$	Verlauf der Annuität der Investitionskosten je Gebäudeklasse
$Rzp_{t,b}$	binär	Gibt die Renovierungszeitpunkte je Gebäudeklasse an
$WB_{t,b}$	$kWh$	Wärmebedarf je Gebäudeklasse
$X_{t,b,mb}$	binär	Definiert optimales Maßnahmenbündel je Gebäudeklasse

Tabelle 16: Verwendete Parameter des Optimierungsmodells

Parameter	Einheit	Beschreibung
$A_{DA_b}$	$m^2$	Fläche der Gebäudekomponente Dach je Gebäudeklasse
$A_{FA_b}$	$m^2$	Fläche der Gebäudekomponente Fassade je Gebäudeklasse
$A_{FE_b}$	$m^2$	Fläche der Gebäudekomponente Fenster je Gebäudeklasse
$A_{KE_b}$	$m^2$	Fläche der Gebäudekomponente Kellderdecke je Gebäudeklasse
$AnteileET_{t,et}$		Anteile der Energieträger
$B$	-	Gesamtanzahl der Gebäudeklassen
$BGF_b$	$m^2$	Brutogeschossfläche je Gebäudeklasse
$EP_{t,et}$	$\frac{€}{kWh}$	Energiepreise je Energieträger und Zeit
$ET$	-	Gesamtanzahl der Energieträger
$Gebäudeanzahl_b$	1	Anzahl der Gebäude je Gebäudeklasse
$HWB_{AW_b}$	$\frac{kWh}{m^2}$	Ausgangswert des spezifischen Heizwärmebedarfs der Gebäudeklassen
$HWBnS_{b,mb}$	$\frac{kWh}{m^2}$	Möglicher Heizwärmebedarf nach Sanierung der Gebäudeklassen je Maßnahmenbündel
$LD$	A	Lebensdauer der Gebäudeklassen und Gebäudekomponenten
$MB$	-	Gesamtanzahl der Maßnahmenbündel
$MK_{DA_{mb}}$	$\frac{€}{m^2}$	Spezifische Investitionskosten der Gebäudekomponente Dach je Maßnahmenbündel
$MK_{FA_{mb}}$	$\frac{€}{m^2}$	Spezifische Investitionskosten der Gebäudekomponente Fassade je Maßnahmenbündel
$MK_{FE_{mb}}$	$\frac{€}{m^2}$	Spezifische Investitionskosten der Gebäudekomponente Fenster je Maßnahmenbündel
$MK_{KE_{mb}}$	$\frac{€}{m^2}$	Spezifische Investitionskosten der Gebäudekomponente Kellerdecke je Maßnahmenbündel
$\eta_{t,b,et}$	%	Jahresnutzungsgrad der Energieträger je Gebäudeklasse



# 5

## Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Optimierungsmodells zuerst anhand des Gebäudebestands von Wien im Betrachtungszeitraum 2015-2050 dargestellt werden. In weiterer Folge werden die Ergebnisse anhand von drei Gebäudekategorien dargestellt und näher betrachtet. Die Auswirkungen der verschiedenen Energiepreisszenarien auf die Sanierungsmaßnahmen werden in jeder ausgewählten Gebäudekategorie erläutert.

### 5.1 Einfluss von Energiepreisszenarien auf die Wärmebedarfsentwicklung des Gebäudebestandes von Wien

Der Endenergiebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme von Wien für das Jahr 2015 beträgt rund 14,9 TWh [6].

Durch den angenommenen Energieträgermix, Tabelle 9 und den Jahresnutzungsgraden, Tabelle 10, wird ein Endenergiebedarf für das Jahr 2015 von 16,3 TWh berechnet. Die Differenz zu dem in der Quelle angegebenen Wert begründet sich aufgrund der Annahmen der sehr niedrig angenommenen Jahresnutzungsgraden.

Mit dem Energiepreisszenario 1, Abbildung 3-6, ergibt sich folgender Endenergiebedarf für Raumwärme im Zeitverlauf, dargestellt in Tabelle 17.

*Tabelle 17: Endenergiebedarf für Raumwärme im Zeitverlauf, Energiepreisszenario 1*

	2015	2020	2030	2040	2050
Endenergiebedarf [TWh]	16,3	14,3	8,1	6,2	6,1

Durch die ökonomisch optimierten Sanierungsmaßnahmen im Betrachtungszeitraum kann der Endenergiebedarf für Raumwärme in Wien bis zum Jahr 2050 um 10 TWh gesenkt werden. Das entspricht einer Einsparung von 63% bezogen auf das Jahr 2015.

Tabelle 18: CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitverlauf, Energiepreisszenario 1

	2015	2020	2030	2040	2050
CO <sub>2</sub> -Emissionen [1000 t]	3612	3195	1808	1379	1344

Auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen können aufgrund der im Betrachtungszeitraum getätigten ökonomisch optimierten Sanierungsmaßnahmen um 63% verringert werden.

Wird im Modelldurchlauf das Energiepreisszenario 2 berücksichtigt, werden durch die konstanten Energiepreise keine ambitionierten Maßnahmen ausgewählt und der Endenergiebedarf für Raumwärme in Wien wird 2050 im Vergleich zum Jahr 2015 nur um 56% gesenkt.

Tabelle 19: Endenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen für Raumwärme im Zeitverlauf, konstante Energiepreise, Energiepreisszenario 2

	2015	2020	2030	2040	2050
Endenergiebedarf [TWh]	16,3	14,3	8,5	7,1	7,1
CO <sub>2</sub> -Emissionen [1000 t]	3612	3199	1889	1575	1575

Wird jedoch das Energiepreisszenario 3, Energiepreisszenario mit den hohen Energiepreisen für fossile Energieträger, berücksichtigt, kann eine noch größere Einsparung des Endenergiebedarfs erzielt werden. Durch die ökonomisch optimierten Sanierungsmaßnahmen kann der Endenergiebedarf bis zum Jahr 2050 auf 4 TWh gesenkt werden, entspricht einer Reduktion von 73%.

Tabelle 20: Endenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen für Raumwärme im Zeitverlauf, Energiepreisszenario 3

	2015	2020	2030	2040	2050
Endenergiebedarf [TWh]	16,3	14,3	7,9	5,4	4,4
CO <sub>2</sub> -Emissionen [1000 t]	3612	3195	1763	1196	986

Welche ökonomisch optimalen Maßnahmen nach Ablauf der technischen Lebensdauer der Gebäude getroffen werden um diese Reduktionen des Endenergiebedarfs zu erreichen, wird in den folgenden Kapiteln 5.2 bis 5.4 und im Kapitel 7 näher betrachtet.

## 5.2 Einfluss der Energiepreisszenarien auf die Wärmebedarfsentwicklung der Gebäudekategorie Einfamilienhaus

In Tabelle 21 sind alle Gebäudeklassen der Kategorie Einfamilienhäuser mit allen wichtigen Daten, wie Bezeichnung, Anzahl der Gebäude, Bauperiode, Zeitraum einer schon erfolgten Sanierung und der spezifischen Heizwärmebedarf aufgelistet.

*Tabelle 21: Auflistung der Einfamilienhäuser mit deren Daten*

	<b>Anzahl der Gebäude</b>	<b>Bauperiode</b>	<b>Zeitraum vorheriger Sanierung</b>	<b>HWB [kWh/m<sup>2</sup>]</b>
EFH 1	27	1890 – 1918	1890 - 19183	397.84
EFH 2	1981	1890 - 1918	1932 - 1952	267.41
EFH 3	38	1890 - 1918	1932 - 1952	417.27
EFH 4	1957	1890 - 1918	1975 - 1995	261.78
EFH 5	38	1890 - 1918	1975 - 1995	413.68
EFH 6	171	1890 - 1918	2000 - 2008	247.85
EFH 7	42	1890 - 1918	2000 - 2008	434.83
EFH 8	6745	1919 - 1944	1956 - 1976	191.04
EFH 9	5476	1919 - 1944	1961 - 1981	185.81
EFH 10	1825	1919 - 1944	1919 - 1944	427.16
EFH 11	2	1919 - 1944	1919 - 1944	422.26
EFH 12	36	1919 - 1944	1960 - 1980	385.37
EFH 13	1	1919 - 1944	1961 - 1981	367.72
EFH 14	2020	1919 - 1944	1991 - 2008	184.57
EFH 15	77	1919 - 1944	2000 - 2008	170.67
EFH 16	3	1919 - 1944	2000 - 2008	457.03
EFH 17	8260	1945 - 1965	1975 - 1995	176.65
EFH 18	921	1945 - 1965	1945 - 1965	310.43
EFH 19	1233	1945 - 1965	2000 - 2008	180.38
EFH 20	4307	1966 - 1979	1991 - 2008	163.31
EFH 21	4228	1966 - 1979	1966 - 1979	224.27
EFH 22	11	1966 - 1979	2000 - 2008	190.89
EFH 23	17218	1980 - 1992	1980 - 1992	130.33
EFH 24	1820	1980 - 1992	2000 - 2008	138.95
EFH 25	2582	1993 - 2002	1993 - 2008	102.05
EFH 26	2273	2003 - 2006	2003 - 2006	80.33
EFH 27	22718	2006 - 2008	2006 - 2008	98.27

### 5.2.1 Energiepreisszenario 1

In Abbildung 5-1 sind die Auswirkungen des Optimierungsmodells auf den spezifischen Heizwärmebedarf dargestellt, welche sich durch die Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1 ergeben. Dabei ist sehr gut zu erkennen, dass eine Verminderung des Heizwärmebedarfs bei einigen Gebäudeklassen aus ökonomischer Sicht um knappe 90% möglich ist.

Die Einfamilienhäuser EFH 26 und EFH 27 wurden 2003-2006 bzw. 2006-2008 errichtet und haben im Vergleich zu den anderen Einfamilienhäusern einen relativ niedrigen spezifischen Heizwärmebedarf als Ausgangswert. Jedoch ist es für diese Gebäudeklassen auch ökonomisch sinnvoll nach der technischen Lebensdauer in Maßnahmen, die die Gebäudehülle und somit den energetischen Zustand des Gebäudes verbessern, zu investieren. Der spezifische Heizwärmebedarf dieser Einfamilienhäuser wird durch eine ökonomisch optimierte Sanierung von den ursprünglichen 80 kWh/m<sup>2</sup> und 98 kWh/m<sup>2</sup> um 6% und 8% auf 76 kWh/m<sup>2</sup> und 91 kWh/m<sup>2</sup> vermindert.

In der Abbildung 5-1 ist der Ausgangswert des spezifischen Heizwärmebedarfs und die Auswirkungen auf den Heizwärmebedarf als Ergebnis des Optimierungsmodells dargestellt. Dabei gibt es für alle Einfamilienhäuser mindestens zwei Balken. Der blaue Balken stellt den Ausgangswert des Heizwärmebedarfs dar und der rote Balken stellt das Ergebnis des Optimierungsmodells dar. Einige Gebäudeklassen werden im Betrachtungszeitraum ein zweites Mal saniert. Werden Gebäudeklassen ein zweites Mal saniert so wird das Ergebnis der zweiten Sanierung, mit einem gelben Balken dargestellt. Da die technische Lebensdauer der Gebäude und der Gebäudekomponenten mit 30 Jahren angenommen wurden, werden Gebäude, die 2015 saniert werden, ein zweites Mal im Jahr 2045 saniert.

Nicht bei allen Einfamilienhäusern, welche ein zweites Mal im Betrachtungszeitraum saniert werden, werden Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Qualität der Gebäudehülle getroffen. In Abbildung 5-1 ist gut zu erkennen, dass bei den Einfamilienhäusern EFH 1, EFH 3, EFH 10, EFH 11, EFH 12, EFH 13, EFH 18 und EFH 21 bei der zweiten Sanierung aus ökonomischer Sicht die Instandhaltungsmaßnahmen ausgewählt wurden. Durch diese verbessert sich der spezifische Heizwärmebedarf nicht. Beim Einfamilienhaus EFH 1 wird durch die erste Sanierung ein Heizwärmebedarf von 77 kWh/m<sup>2</sup> erreicht. Eine zusätzliche mögliche Einsparung von 1 kWh/m<sup>2</sup> würde mit einem anderen Maßnahmenbündel um 41€ höhere Investitionskosten verursachen als mit der Maßnahme Instandhaltung.

Bei den Einfamilienhäusern EFH 2, EFH 8, EFH 9, EFH 17 und EFH 23 werden beim zweiten Sanierungszeitpunkt Maßnahmen ausgewählt, die den spezifischen Heizwärmebedarf weiter verringern. Beim Einfamilienhaus EFH 2 kann der spezifische Heizwärmebedarf von 267 kWh/m<sup>2</sup> nach der ersten Sanierung auf 115 kWh/m<sup>2</sup> reduziert werden. Da dieses Einfamilienhaus im Betrachtungszeitraum ein zweites Mal saniert wird und aus ökonomisch optimaler Sicht ein Maßnahmenbündel gewählt wird, welches die thermische Kennzahl verringert, reduziert sich der spezifische Heizwärmebedarf weiter auf 83 kWh/m<sup>2</sup>.

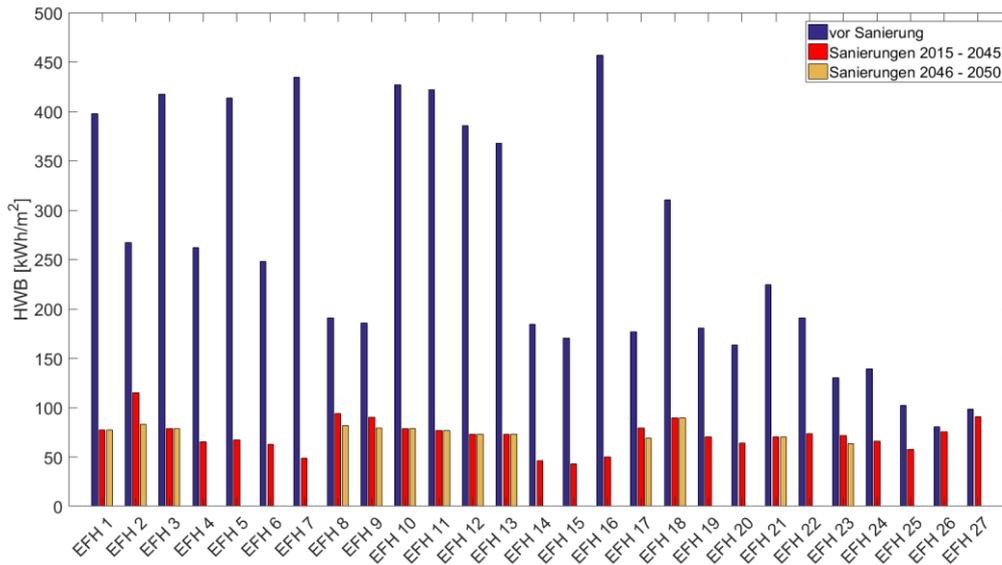


Abbildung 5-1: Heizwärmebedarf der Einfamilienhäuser vor einer optimierten Sanierung und mit den ökonomisch optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1

Die Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 zeigen den Endenergiebedarf der Jahre 2015 und 2050 in relativen und absoluten Zahlen. Das Einfamilienhaus EFH 16 hat die größte relative Einsparung des Endenergiebedarfs im Vergleich zu den anderen Einfamilienhäusern. Dieses Einfamilienhaus hat den höchsten Ausgangswert des spezifischen Heizwärmebedarfs aller Einfamilienhäuser. Der Endenergiebedarf kann aufgrund des hohen Ausgangswerts durch eine ökonomisch optimierte Sanierung um rund 90% gesenkt werden. In absoluten Zahlen, ist aufgrund der geringen Anzahl der Gebäude der Anteil, den das Einfamilienhaus EFH 16 mit seiner Einsparung zum Gesamtendenergiebedarf beiträgt, gering.

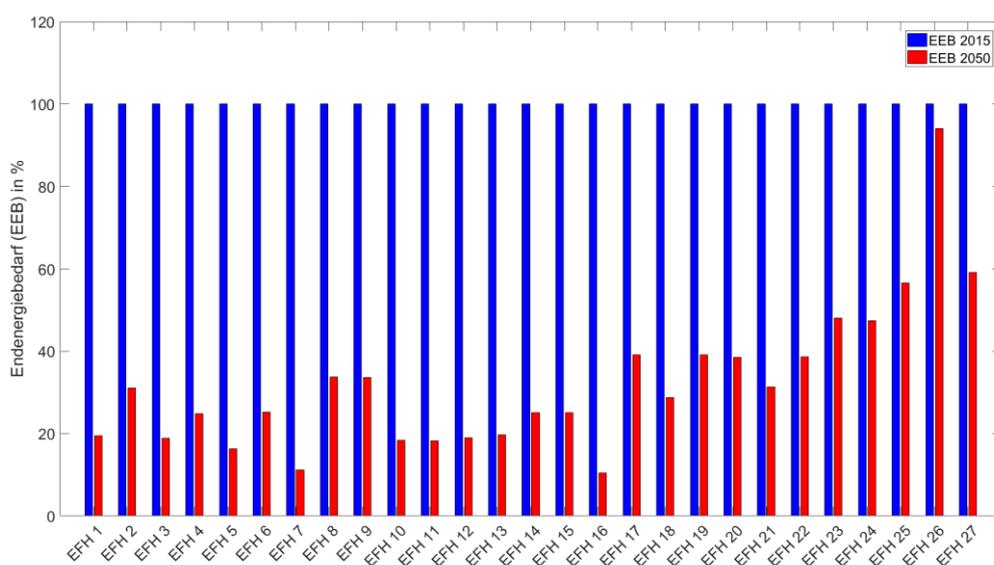


Abbildung 5-2: Relative Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen Einfamilienhäuser der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 1

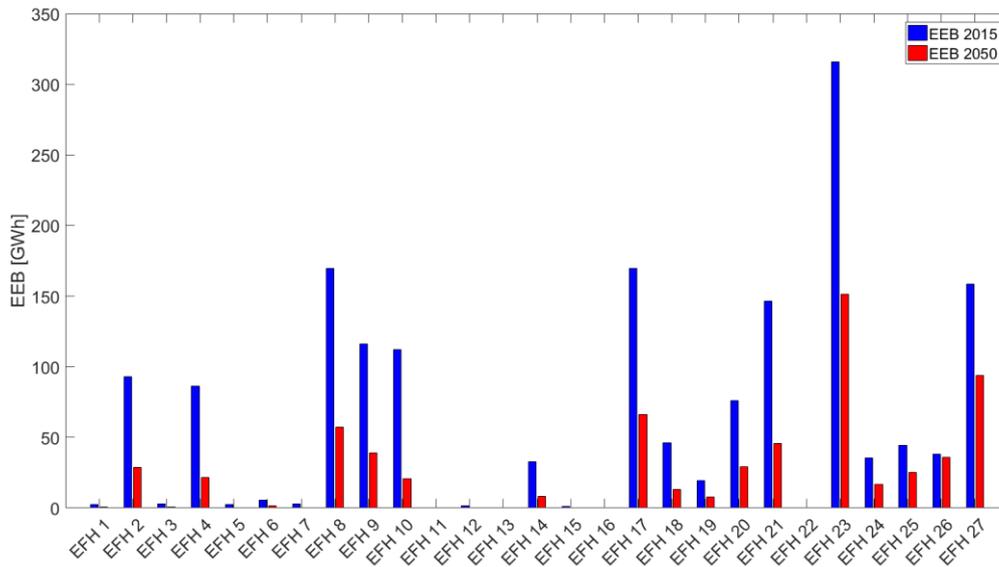


Abbildung 5-3: Absolute Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen Einfamilienhäuser der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 1

Die Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 zeigen welche Maßnahmen pro Gebäudekomponente je Gebäudeklasse aus ökonomisch optimierter Sicht ausgewählt wurden. Bei den Gebäudekomponenten Kellerdecke, Dach und Fassade zeigt die Ordinate die jeweilige Dämmstoffdicke in mm. Für die Gebäudekomponente Fenster wurde der U-Wert als Ordinate aufgetragen.

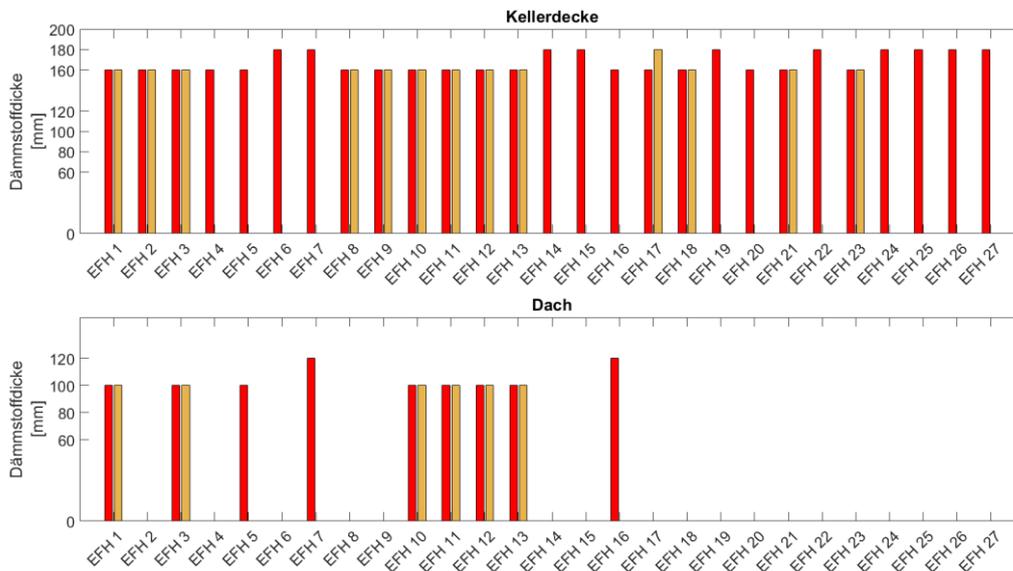


Abbildung 5-4: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Dach der Gebäudeklassen Einfamilienhäuser, Energiepreisszenario 1.

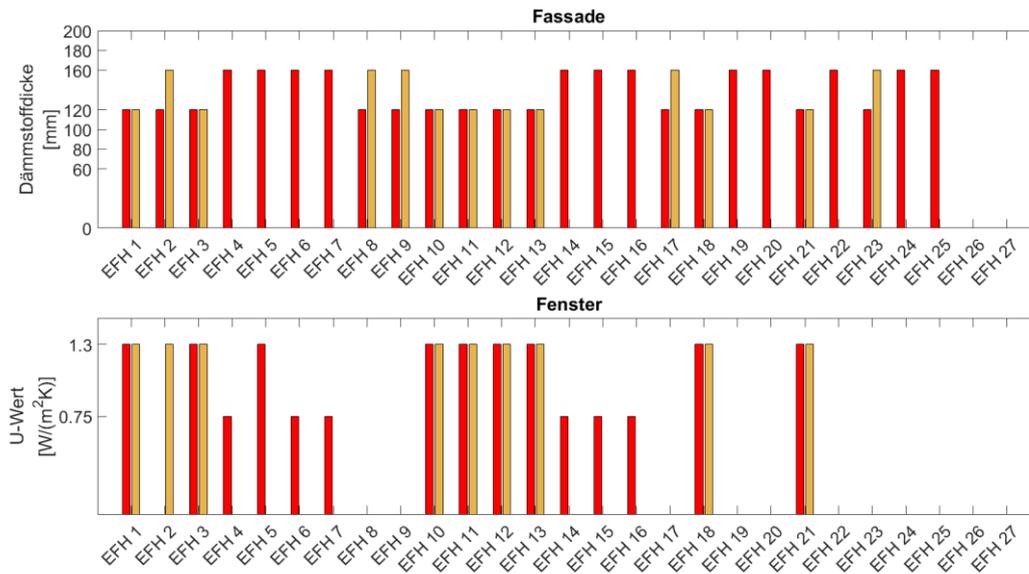


Abbildung 5-5: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Fassade und Fenster der Gebäudeklassen Einfamilienhäuser, Energiepreisszenario 1

In Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 sind für jede Gebäudekomponente die ausgewählte Sanierungstiefe dargestellt. Der rote Balken zeigt das Ergebnis der ersten Sanierung im Betrachtungszeitraum an. Der gelbe Balken stellt das Ergebnis einer zweiten Sanierung dar. Gibt es in den Gebäudekategorien nur einen roten Balken, so bedeutet das, dass diese Gebäudeklasse im Betrachtungszeitraum nur einmal saniert wird. Sind die zwei Balken gleich hoch, so wird bei der zweiten Sanierung nur die Instandhaltung der Gebäudekomponente ausgewählt.

Zu erkennen ist, dass bei allen Gebäudeklassen die Gebäudekomponente Kellerdecke saniert wird, dass durch die niedrigen Investitionskosten pro eingesparter kWh an Wärmebedarf begründet ist. Auch die Gebäudekomponente Fassade wird bei fast allen Gebäudeklassen, aufgrund der niedrigen Investitionskosten pro eingesparter kWh an Wärmebedarf, saniert. Durch die hohen Investitionskosten der Maßnahmen der Gebäudekomponenten Dach und Fenster pro eingesparter kWh an Wärmebedarf werden diese Gebäudekomponenten nicht bei allen Gebäudeklassen berücksichtigt.

Wie vorhin schon erwähnt, werden auch bei den jüngeren Einfamilienhäuser EFH 26 und EFH 27 Maßnahmen zur Verringerung des Heizwärmebedarfs getroffen. In dieser Gebäudeklasse ist als Ergebnis der Optimierung eine Sanierung der Kellerdecke ausgewählt worden, welche nach Abbildung 5-4 eine Wärmedämmung von 180 mm berücksichtigt.

Beim Einfamilienhaus EFH 1, werden gleich bei der ersten Sanierung alle 4 Gebäudekomponenten saniert. Die ökonomisch optimierten Dämmstoffdicken betragen in der Reihenfolge Kellerdecke, Dach und Fassade: 160mm, 100mm und 120mm. Die Fenster werden mit Fenstern mit einem U-Wert von 1,3 W/(m²K) getauscht. Dieses Maßnahmenbündel führt zu Reduktion des Heizwärmebedarfs von 398 kWh/m² auf 77 kWh/m² und dabei kann der Endenergiebedarf des Einfamilienhauses EFH1 um ca. 80% reduziert werden. Das Einfamilienhaus EFH 1 wird im Betrachtungszeitraum zweimal saniert. Als Ergebnis der Optimierung wird bei diesem Einfamilienhaus bei der zweiten Sanierung nur

Instandhaltungsmaßnahmen getroffen, weswegen der spezifische Heizwärmebedarf nicht weiter verringert wird.

Das Einfamilienhaus EFH 2 wird im Betrachtungszeitraum 2-mal saniert. Beim ersten Sanierungszeitpunkt werden Verbesserungen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Fassade getroffen. Dadurch verringert sich der spezifische Heizwärmebedarf um 57% auf 115 kWh/m<sup>2</sup> von ursprünglichen 267 kWh/m<sup>2</sup>. Beim zweiten Sanierungszeitpunkt dieses Einfamilienhauses werden als Ergebnis der Optimierung weitere Maßnahmen getroffen. Diesmal betreffen diese die Gebäudekomponenten Fassade und Fenster. Diese schaffen eine erneute Reduktion des Heizwärmebedarfs um 27% und somit eine Gesamtreduktion des Endenergiebedarfs von 68%.

Der Wärmebedarf für diese Einfamilienhäuser beträgt vor der ökonomisch optimierten Sanierung 1552 GWh. Nach der ersten Sanierung der Einfamilienhäuser kann der Wärmebedarf auf 809 GWh reduziert werden. Bis zum Jahr 2050, das heißt die zweiten Sanierungen einiger Einfamilienhäuser werden berücksichtigt, kann der Wärmebedarf der Gebäudekategorie Einfamilienhaus auf 689 GWh vermindert werden.

## 5.2.2 Energiepreisszenario 2

Um zu zeigen welche Auswirkungen die Energiepreise auf die ökonomisch optimierten Maßnahmenbündel haben, wurde für einen Modelldurchlauf angenommen, dass die Energiepreise während des gesamten Betrachtungszeitraum auf dem Stand von 2015 bleiben.

Durch die konstanten Energiepreise werden folgende Auswirkungen auf den spezifischen Heizwärmebedarf der Einfamilienhäuser wirksam, zu sehen in Abbildung 5-6.

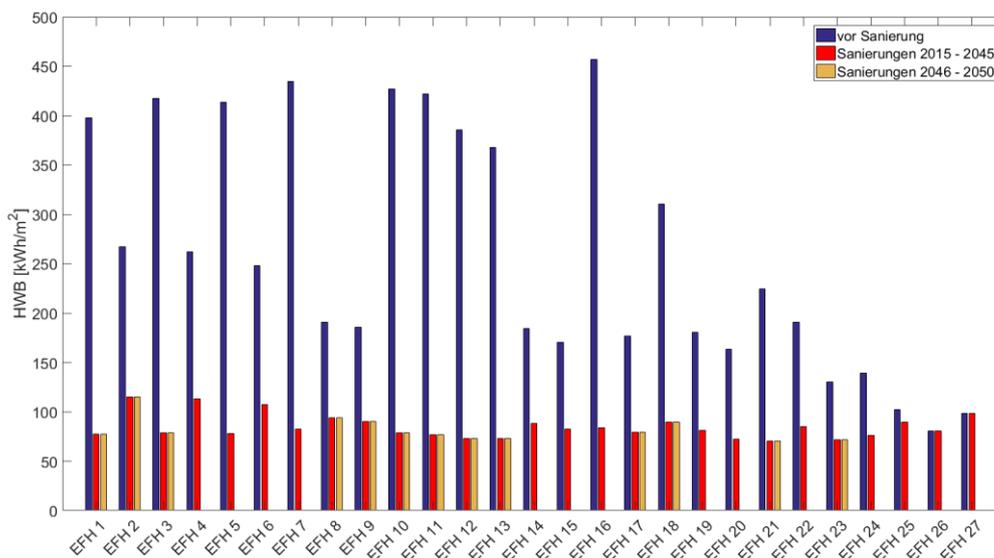


Abbildung 5-6: Heizwärmebedarf der Einfamilienhäuser vor einer optimierten Sanierung und mit den ökonomisch optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit konstanten Energiepreisen, Energiepreisszenario 2

Für all jene Einfamilienhäuser die 2015 saniert werden, ändert sich der resultierende Heizwärmebedarf im Vergleich zu den Ergebnissen des Energiepreisszenarios 1 nicht, da ja die Energiepreise für das Jahr

2015 in allen drei Energiepreisszenarios gleich sind. Für alle anderen Einfamilienhäuser deren Renovierungszeitpunkte nach 2015 fallen, haben sich die resultierenden Kennzahlen für den Heizwärmebedarf geändert. Als Beispiel wird hier das Einfamilienhaus EFH 4 näher betrachtet. Als Ergebnis der Optimierung mit konstanten Energiepreisen wird hier durch eine Sanierung ein Heizwärmebedarf von 113 kWh/m<sup>2</sup> erzielt, was einer Reduktion des Heizwärmebedarfs um 57% entspricht. Im Vergleich dazu wird mit dem Energiepreisszenario 1 der Heizwärmebedarf des Einfamilienhauses EFH 4 um 75%, auf 65 kWh/m<sup>2</sup>, verringert. Durch die konstanten Energiepreise sind aus ökonomischer Sicht keine Anreize gegeben in eine ambitioniertere Maßnahme zur Verbesserung der thermischen Qualität der Gebäudehülle zu investieren.

Auch in Abbildung 5-6 gut zu erkennen ist, dass für jene Einfamilienhäuser die im Betrachtungszeitraum 2-mal saniert werden, jeweils nur die Instandhaltungsmaßnahmen gewählt werden. Durch die konstante Energiepreisentwicklung sind die laufenden Energiekosten zu gering, um Investitionen in die Gebäudehülle zu tätigen. Auch macht es hier für die jüngeren Einfamilienhäuser EFH 26 und 27 im Gegensatz zum Energiepreisszenario 1 aufgrund der niedrigen Energiepreise keinen Sinn die Gebäudehülle zu sanieren um den spezifischen Heizwärmebedarf zu verbessern.

### 5.2.3 Energiepreisszenario 3

Bei diesem Modelldurchlauf werden die hohen Energiepreise der fossilen Energieträger berücksichtigt. Durch die hohen Energiepreise der fossilen Energieträger werden im Vergleich zum Energiepreisszenario 1, ambitioniertere Maßnahmen zur Sanierung der Gebäudehülle erwartet. Da es durch die höheren Energiepreise Sinn macht, eine größere Reduktion des Heizwärmebedarfs durch eine Sanierung zu erzielen.

In Abbildung 5-7 sind die Resultate des Optimierungsmodells anhand des Heizwärmebedarfs dargestellt.

Der Heizwärmebedarf der Einfamilienhäuser EFH 26 und EFH 27 wird durch die ökonomisch optimierte Sanierung von den ursprünglichen 80 kWh/m<sup>2</sup> bzw. 98 kWh/m<sup>2</sup> um 42% bzw. 41% auf 47 kWh/m<sup>2</sup> bzw. 57 kWh/m<sup>2</sup> gesenkt.

In Abbildung 5-7 außerdem zu erkennen ist, dass bei einigen Einfamilienhäusern (EFH1 EFH 3, EFH 10, EFH 11, EFH 12, EFH 13 und EFH 21), wie bei den Ergebnissen mit dem Energiepreisszenario 1, nur Instandhaltungsmaßnahmen zum zweiten Sanierungszeitpunkt ausgewählt werden.

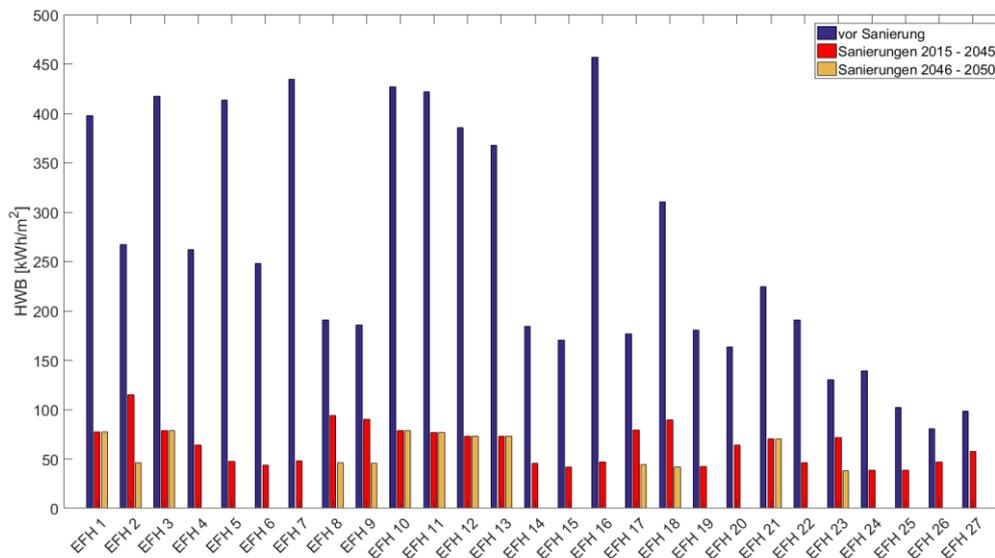


Abbildung 5-7: Heizwärmebedarf der Einfamilienhäuser vor einer optimierten Sanierung und mit den ökonomisch optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 3

Anders als beim Energiepreisszenario 1 wird hier auch zusätzlich zu den Einfamilienhäuser EFH 2, EFH 8, EFH 9, EFH 17 und EFH 23 auch das EFH 18 beim zweiten Sanierungszeitpunkt mit Maßnahmen saniert, die den spezifischen Heizwärmebedarf nochmal verringern.

Beim Einfamilienhaus EFH 2 kann der spezifische Heizwärmebedarf von 267 kWh/m<sup>2</sup> durch die Maßnahmen der ersten Sanierung auf 115 kWh/m<sup>2</sup> gesenkt werden. Jedoch wird bei der zweiten Sanierung aus ökonomischer Sicht ein Maßnahmenbündel gewählt, welches den spezifischen Heizwärmebedarf auf 46 kWh/m<sup>2</sup> reduziert.

Die Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9 zeigen den Endenergiebedarf der Jahre 2015 und 2050 in relativen und absoluten Zahlen. Beim Einfamilienhaus EFH 16 tritt die größte relative Einsparung des Endenergiebedarfs im Vergleich auf. Bei diesem Einfamilienhaus kann der Endenergiebedarf durch die ökonomisch optimierte Sanierung auf 10% des Ausgangswertes gesenkt werden. In absoluten Zahlen ist, aufgrund der geringen Anzahl der Gebäude, die Auswirkung der Einsparung gering.

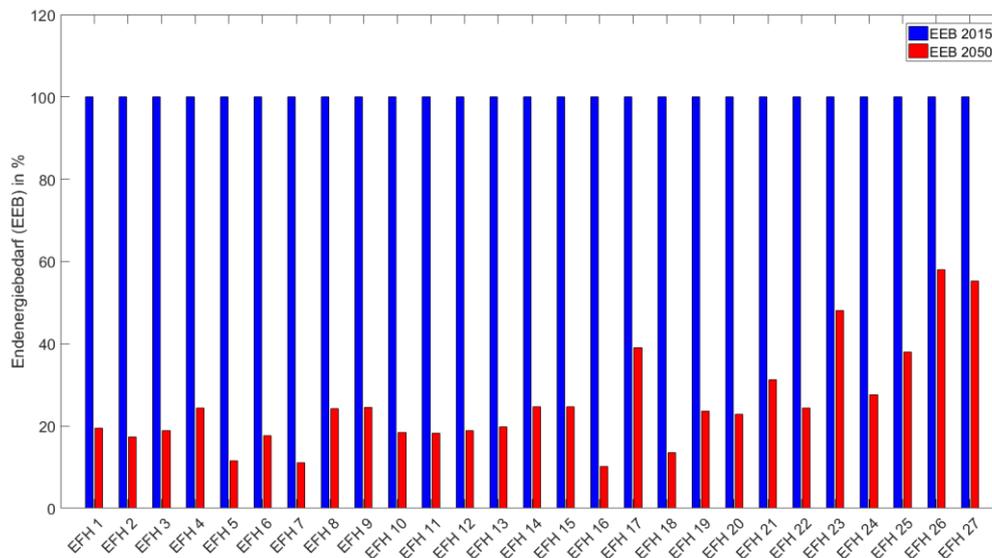


Abbildung 5-8: relative Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen Einfamilienhäuser der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 3

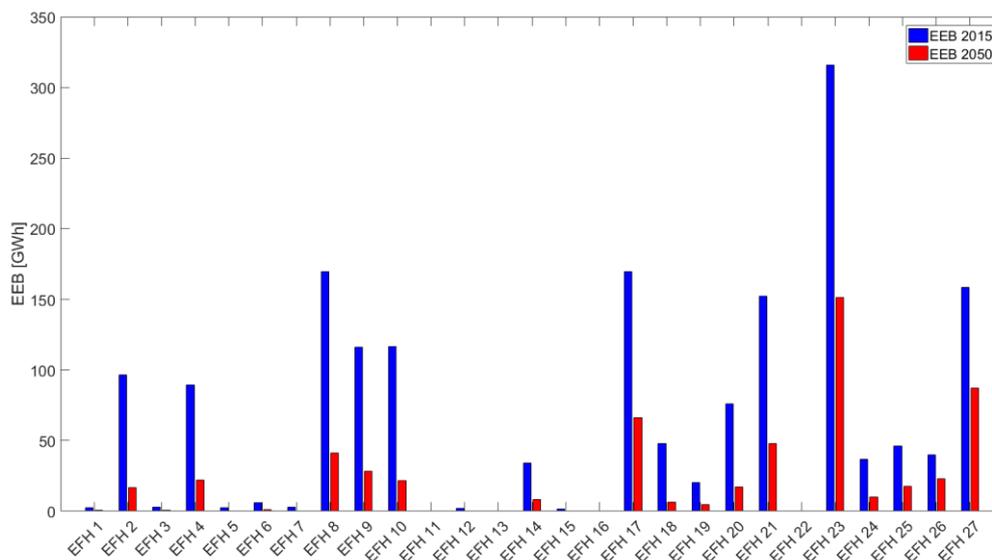


Abbildung 5-9: absolute Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen Einfamilienhäuser für die Jahre 2015 und 2050, Energiepreisszenario 3

In Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11 ist für jede Gebäudeklasse und jede Gebäudekomponente die ausgewählte Sanierungstiefe dargestellt. Der rote Balken zeigt das Ergebnis der ersten Sanierung, der gelbe Balken zeigt das Ergebnis der zweiten Sanierung.

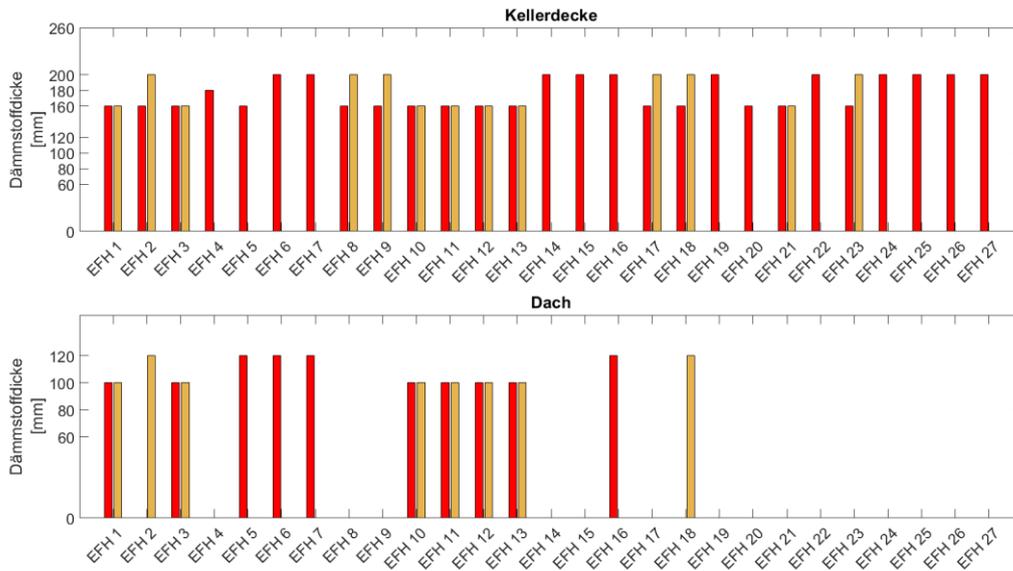


Abbildung 5-10: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Dach der Gebäudeklassen Einfamilienhaus, Energiepreisszenario 3.

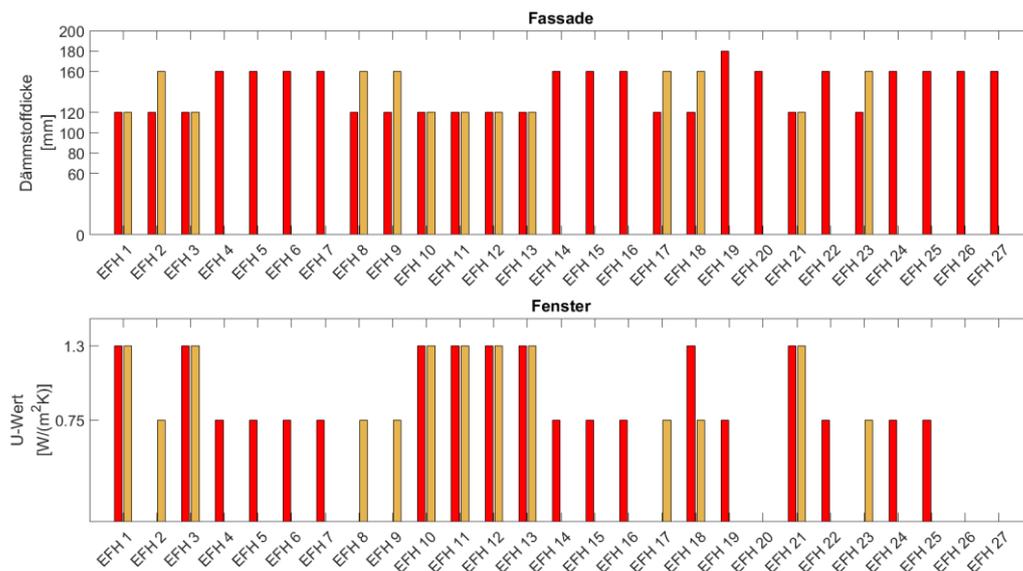


Abbildung 5-11: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Fassade und Fenster der Gebäudeklassen Einfamilienhaus, Energiepreisszenario 3

Im Gegensatz zu den Ergebnissen des Energiepreisszenario 1, werden beim Energiepreisszenario 3 bei allen Gebäudeklassen die Gebäudekomponenten Kellerdecke und Fassade saniert.

Für die jüngeren Einfamilienhäuser EFH 26 und EFH 27 werden eine Kellerdecken- und Fassadensanierung mit einer Dämmstoffdicke von 200 mm und 160 mm ausgewählt.

Das Einfamilienhaus EFH 2 wird im Betrachtungszeitraum 2-mal saniert. Bei der ersten Sanierung werden Verbesserungen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Fassade getroffen. Dadurch verringert sich der spezifische Heizwärmebedarf von 267 kWh/m<sup>2</sup> auf 115 kWh/m<sup>2</sup>. Diese Reduktion

um 57% entspricht auch jener mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenarios 1. Bei der zweiten Sanierung dieses Einfamilienhauses werden wieder Maßnahmen getroffen, welche die thermische Qualität der Gebäudeklasse beeinflussen. Diesmal werden alle vier Gebäudekomponenten saniert. Für die Kellerdecke, das Dach und die Fassade werden Wärmedämmungsmaßnahmen der Dicken 200 mm, 120 mm und 160 mm getätigt. Auch die Gebäudekomponente Fenster wird mit Fenstern mit einem U-Wert von  $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  getauscht. Durch diese Maßnahmen kann der spezifische Heizwärmebedarf auf  $46 \text{ kWh}/\text{m}^2$  reduziert werden.

Der Wärmebedarf für diese Einfamilienhäuser beträgt vor der ökonomisch optimierten Sanierung 1552 GWh. Nach der ersten Sanierung der Einfamilienhäuser kann der Wärmebedarf auf 664 GWh reduziert werden. Bis zum Jahr 2050, das heißt die zweiten Sanierungen einiger Einfamilienhäuser werden berücksichtigt, kann der Wärmebedarf der Gebäudekategorie Einfamilienhaus auf 463 GWh vermindert werden.

### 5.3 Einfluss der Energiepreisszenarien auf die Wärmebedarfsentwicklung der Gebäudekategorie kleine Mehrfamilienwohngebäude

In Tabelle 22 sind alle Gebäudeklassen der Gebäudekategorie kleine Mehrfamilienwohngebäude (MFHk) mit allen wichtigen Daten, wie weiterfolgende Bezeichnung, Anzahl der Gebäude, Bauperiode, Zeitraum einer schon erfolgten Fassadensanierung und des spezifischen Heizwärmebedarf vor der ökonomisch optimierten Sanierung aufgelistet.

*Tabelle 22: Auflistung der kleinen Mehrfamilienwohngebäude mit deren Daten*

	<b>Anzahl der Gebäude</b>	<b>Bauperiode</b>	<b>Zeitraum vorherige Sanierung</b>	<b>HWB [kWh/m<sup>2</sup>]</b>
MFHk 1	40	1890 – 1918	1890 – 1918	259.73
MFHk 2	2913	1890 – 1918	1932 – 1952	173.92
MFHk 3	60	1890 – 1918	1932 – 1952	272.78
MFHk 4	2890	1890 – 1918	1975 – 1995	172.93
MFHk	60	1890 – 1918	1975 – 1995	261.63
MFHk 6	232	1890 – 1918	2000 – 2008	174.83
MFHk 7	66	1890 – 1918	2000 – 2008	250.07
MFHk 8	211	1919 – 1944	1919 – 1944	319.07
MFHk 9	861	1919 – 1944	1956 – 1976	129.35
MFHk 10	2	1919 – 1944	1960 – 1980	306.25
MFHk 11	662	1919 – 1944	1961 – 1981	123.49
MFHk 12	238	1919 – 1944	1991 – 2008	114.74
MFHk 13	10	1919 – 1944	2000 – 2008	94.23
MFHk 14	238	1945 – 1965	1945 – 1965	216.28
MFHk 15	2229	1945 – 1965	1975 – 1995	110.60
MFHk 16	330	1945 – 1965	2000 – 2008	108.06
MFHk 17	1190	1966 – 1979	1966 – 1979	188.47
MFHk 18	1273	1966 – 1979	1991 – 2008	94.09
MFHk 19	2103	1980 – 1992	1980 – 1992	196.42
MFHk 20	214	1980 – 1992	2000 – 2008	89.65
MFHk 21	316	1993 – 2002	1993 – 2008	69.36
MFHk 22	435	2003 – 2006	2003 – 2006	67.36
MFHk 23	3151	2006 – 2008	2006 – 2008	76.65

#### 5.3.1 Energiepreisszenario 1

Die Auswirkungen des Optimierungsmodells auf den spezifischen Heizwärmebedarf sind in Abbildung 5-12 dargestellt. Die größte Reduktion des Heizwärmebedarfs kann beim kleinen Mehrfamilienwohngebäude MFHk 7 erzielt werden. Der Heizwärmebedarf reduziert sich dabei um 88% von 250 kWh/m<sup>2</sup> auf 29 kWh/m<sup>2</sup>.

Auch bei den neueren kleinen Mehrfamilienwohngebäuden MFHk 22 und MFHk 23, welche 2003-2006 und 2006-2008 errichtet wurden und schon einen geringen Ausgangswert des Heizwärmebedarfs von  $67 \text{ kWh/m}^2$  bzw.  $77 \text{ kWh/m}^2$  haben, kann durch eine ökonomisch optimierte Sanierung der Heizwärmebedarf um jeweils 6% verringert werden.

In der Abbildung 5-12 ist der Ausgangswert des spezifischen Heizwärmebedarfs und die Auswirkungen auf denselben als Ergebnis des Optimierungsmodells dargestellt. Dabei gibt es, bei jeder Gebäudekategorie, mindestens zwei Balken. Der blaue Balken mit dem Legendeneintrag „vor Sanierung“ gibt den Ausgangswert des Heizwärmebedarfs wieder. Der rote Balken mit der Legende „Sanierungen 2015-2045“ zeigt das Ergebnis der Optimierung. Wird die Gebäudeklasse kleines Mehrfamilienwohngebäude im Betrachtungszeitraum ein zweites Mal saniert, so wird der dadurch erreichte Heizwärmebedarf mit einem gelben Balken und der Legende „Sanierungen 2046-2050“ dargestellt.

Bei nicht allen kleinen Mehrfamilienwohngebäuden, die im Betrachtungszeitraum zweimal saniert werden, resultieren Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Qualität der Gebäudehülle. Bei den kleinen Mehrfamilienwohngebäuden MFHk 1, MFHk 3, MFHk 8, MFHk 10, MFHk 14 und MFHk 17 werden beim zweiten Sanierungszeitpunkt durch die ökonomisch optimierte Sanierung nur die Instandhaltungsmaßnahmen gewählt. Dadurch bleibt der spezifische Heizwärmebedarf auf dem Wert des ersten ökonomisch optimierten Sanierungsergebnisses.

Bei den kleinen Mehrfamilienwohngebäuden MFHk 2, MFHk 9 und MFHk 11 werden beim zweiten Sanierungszeitpunkt Maßnahmen ausgewählt, die den spezifischen Heizwärmebedarf weiter verringern. Beim kleinen Mehrfamilienwohngebäude MFHk 11 kann der spezifische Heizwärmebedarf von  $123 \text{ kWh/m}^2$  nach der ersten Sanierung im Jahr 2015 auf  $65 \text{ kWh/m}^2$  reduziert werden. Da das kleine Mehrfamilienwohngebäude im Betrachtungszeitraum ein zweites Mal mit einem Maßnahmenbündel saniert wird, welches die thermische Qualität der Gebäudehülle verbessert, verringert sich der spezifische Heizwärmebedarf weiter auf  $45 \text{ kWh/m}^2$ .

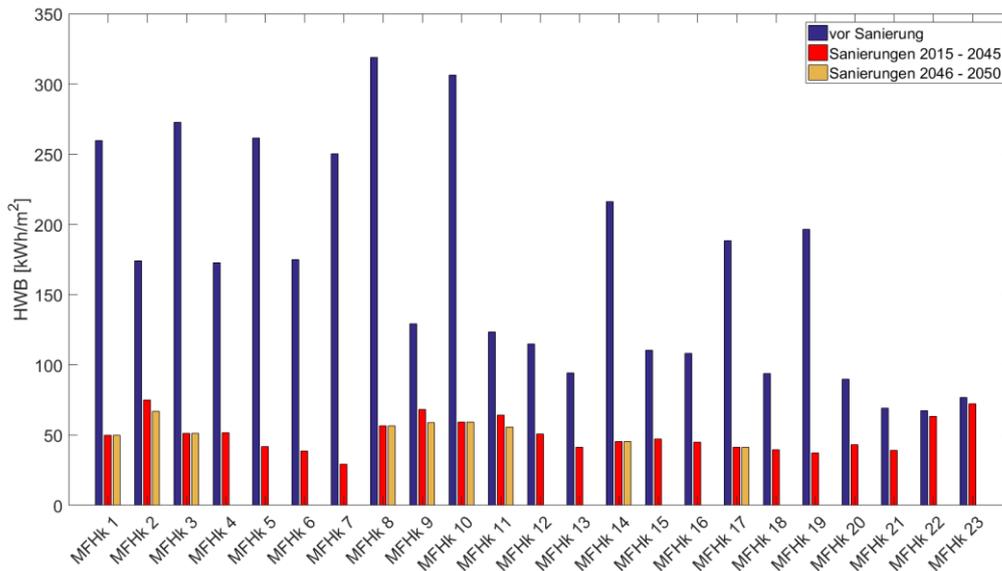


Abbildung 5-12: Heizwärmebedarf der kleinen Mehrfamilienwohngebäude vor einer optimierten Sanierung und mit den ökonomisch optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050., als Ergebnis des Optimierungsmodells mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1

Den Endenergiebedarf der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich in relativen und absoluten Zahlen zeigen Abbildung 5-13 und Abbildung 5-14. Die größte relative Einsparung des Endenergiebedarfs im Vergleich zu den anderen kleinen Mehrfamilienwohngebäuden hat das kleine Mehrfamilienwohngebäude MFHk 7. Durch die ökonomisch optimierte Sanierung kann der Endenergiebedarf um 88 % gesenkt werden. In absoluten Zahlen gesehen, trägt diese Einsparung von 9,5 GWh auf 1,1 GWh wenig zum Gesamtendenergiebedarf bei.

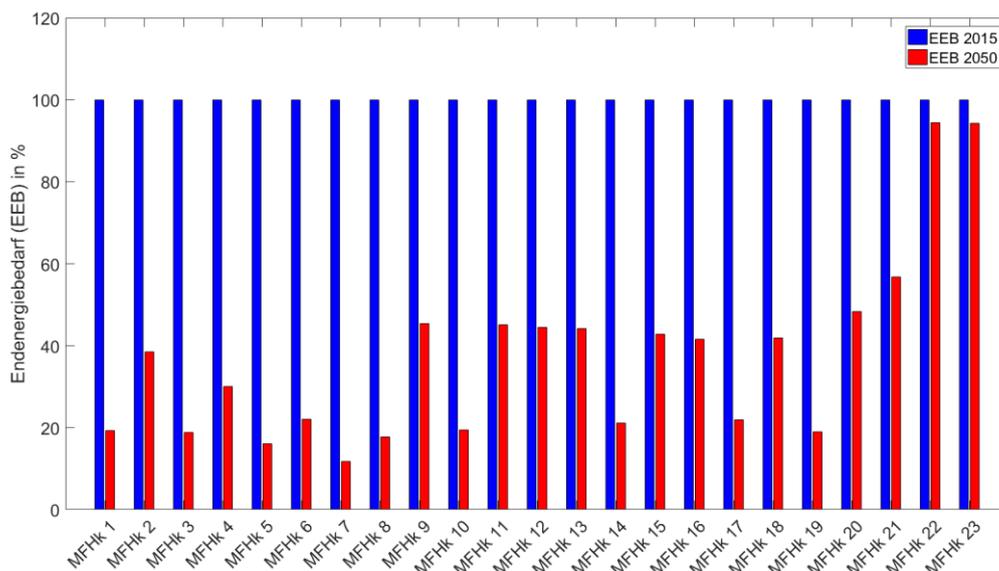


Abbildung 5-13: Relative Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen kleine Mehrfamilienwohngebäude der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 1.

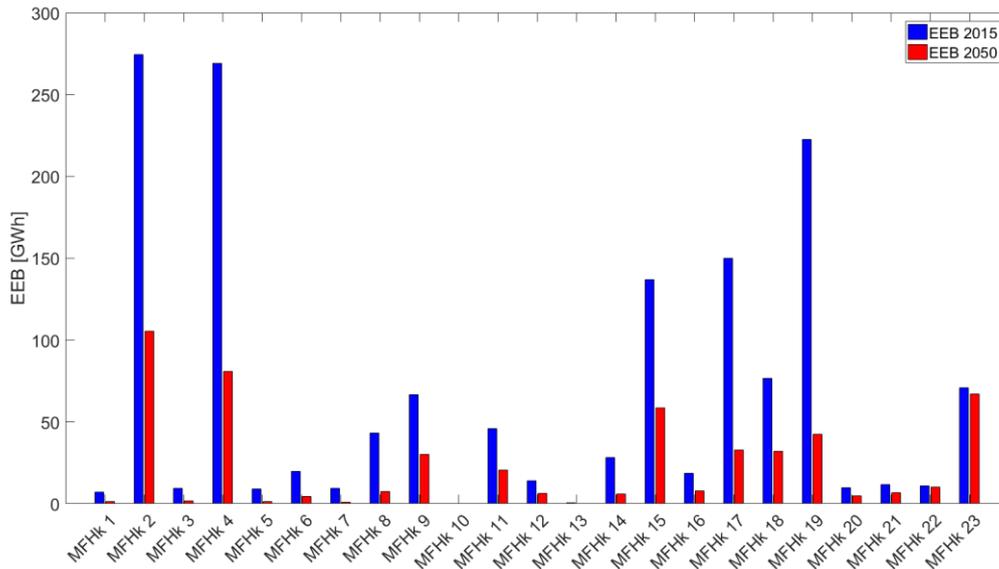


Abbildung 5-14: Absolute Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen kleine Mehrfamilienwohngebäude der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 1.

Welche Maßnahmen nun aus ökonomisch optimierter Sicht für die kleinen Mehrfamilienwohngebäude gewählt werden, zeigen Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16. Der rote Balken zeigt die Maßnahme der ersten Sanierung an. Der gelbe Balken zeigt wieder die Maßnahmen, die bei einer zweiten Sanierung gewählt werden.

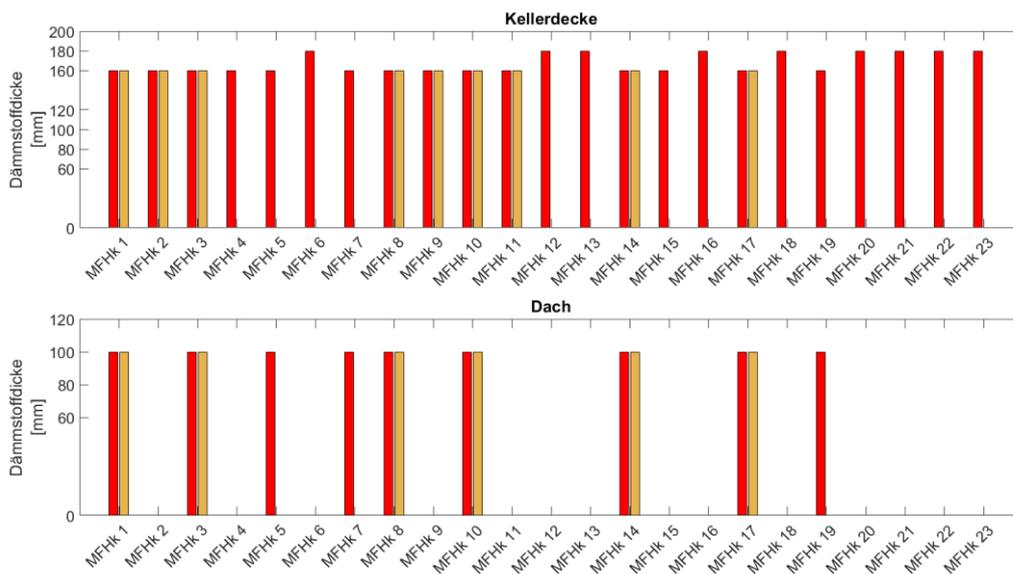


Abbildung 5-15: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Dach der Gebäudeklassen kleine Mehrfamilienwohngebäude unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1.

Auch bei den kleinen Mehrfamilienwohnhäusern wird bei jeder Gebäudeklasse die Gebäudekomponente Kellerdecke saniert.

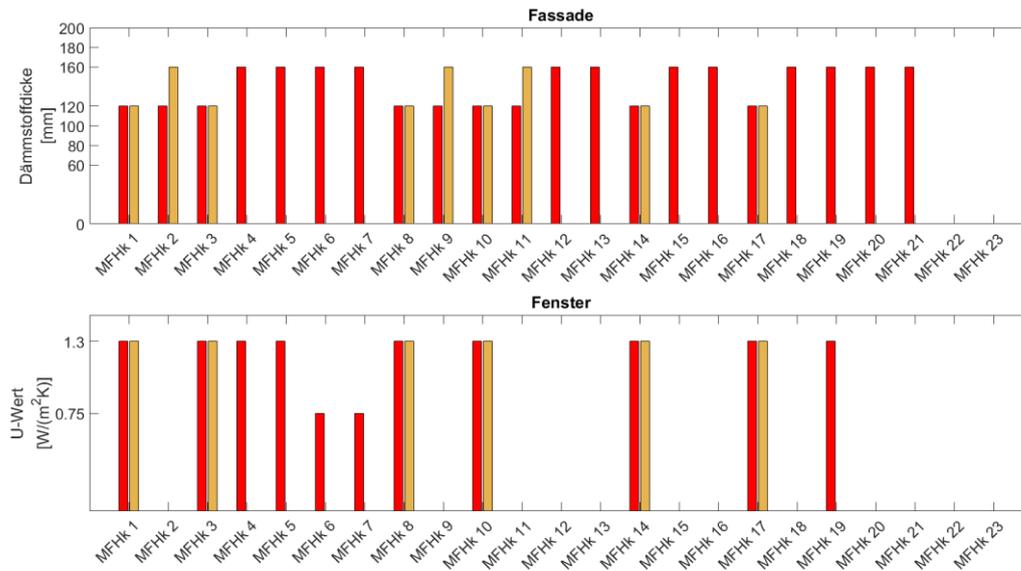


Abbildung 5-16: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Fassade und Fenster der Gebäudeklassen kleine Mehrfamilienwohngebäude unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1.

Bei den jüngeren kleinen Mehrfamilienhäusern, MFHk 22 und MFHk 23, kann durch die Sanierung der Kellerdecke mit einer Wärmedämmung von 180 mm Dämmstoffdicke eine Verringerung des Heizwärmebedarfs von 6% erzielt werden.

Beim kleinen Mehrfamilienwohngebäude MFHk 7 werden alle vier Gebäudekomponenten saniert. Die optimierten Dämmstoffdicken betragen in der Reihenfolge Kellerdecke, Dach und Fassade 160 mm, 100 mm und 160 mm. Die Fenster werden mit Fenster getuscht, die einen U-Wert von 0,75 W/(m²K) haben. Aufgrund der Sanierung der Fassade im Zeitraum 2000-2008 wird diese Gebäudeklasse im Betrachtungszeitraum nur einmal saniert. Aufgrund dieser getroffenen Maßnahmen kann der Heizwärmebedarf auf 29 kWh/m² gesenkt werden, was einer Reduktion um 88% im Bezug zum Ausgangswert entspricht.

Das kleine Mehrfamilienwohngebäude MFHk 11 wird im Betrachtungszeitraum 2-mal saniert. Beim ersten Sanierungszeitpunkt werden die Kellerdecke und die Fassade thermisch verbessert. Durch eine Wärmedämmung mit den Dämmstoffdicken von 160 mm und 120 mm verringert sich der spezifische Heizwärmebedarf um 48% auf 65 kWh/m² von 123 kWh/m². Beim zweiten Sanierungszeitpunkt dieses Mehrfamilienwohngebäudes wird die Gebäudekomponente Kellerdecke instandgehalten und die Gebäudekomponente Fassade um eine Wärmedämmung der Dicke 40 mm erweitert. Diese Maßnahme schafft eine erneute Reduktion des Heizwärmebedarfs um 7% auf 56 kWh/m².

Der Wärmebedarf für diese kleinen Mehrfamilienwohngebäude beträgt vor der ökonomisch optimierten Sanierung 1338 GWh. Der Wärmebedarf kann nach den ersten Sanierungen auf 490 GWh reduziert werden. Vergleicht man die Werte des Wärmebedarfs von 2015 mit den Werten des Wärmebedarfs von 2050, kann mit der zweiten Sanierung einiger kleinen Mehrfamilienwohngebäuden, der Wärmebedarf auf 471 GWh vermindert werden. Bezogen auf das Jahr 2015 kann der Wärmebedarf für die kleinen Mehrfamilienwohngebäude um rund 65% reduziert werden.

### 5.3.2 Energiepreisszenario 2

Auch in dieser Gebäudekategorie zeigen die konstanten Energiepreise ihre Auswirkungen auf den spezifischen Heizwärmebedarf der kleinen Mehrfamilienwohngebäude, Abbildung 5-17.

Die ausgewählten Maßnahmen jener kleinen Mehrfamilienwohngebäude, welche 2015 saniert werden, entsprechen jenen, welche mit dem Energiepreisszenario 1 ausgewählt wurden. Für all jene Mehrfamilienwohngebäude mit einem Renovierungszeitpunkt nach 2015, werden weniger ambitionierte Maßnahmenbündel getroffen. Als Beispiel wird hier auf das kleine Mehrfamilienwohngebäude MFHk 7 eingegangen. Als Ergebnis der Optimierung mit der Berücksichtigung der konstanten Energiepreise des Energiepreisszenarios 2 wird hier durch eine thermische Sanierung der Heizwärmebedarf von 47 kWh/m<sup>2</sup> erreicht, was einer Reduktion vom Ausgangswert des Heizwärmebedarfs um 81% entspricht. Mit dem Energiepreisszenario 1 konnte hier eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um 88% erzielt werden. Durch die konstanten Energiepreise wurden im Gegensatz zu den Ergebnissen des Energiepreisszenario 1 ein weniger ambitioniertes Maßnahmenbündel gewählt.

Weiters ist in der Abbildung 5-17 zu erkennen, dass für die zweiten Sanierungszeitpunkte nur Instandhaltungsmaßnahmen getroffen wurden. Die jährlichen Energiekosten sind mit den Energiepreisen von 2015 zu gering um Investitionen in die thermische Sanierung zu tätigen.

Auch bei den jüngeren kleinen Mehrfamilienwohngebäuden MFHk 22 und MFHk 23 werden nach Ablauf der Lebensdauer nur Instandhaltungsmaßnahmen getroffen, die die thermische Qualität der Gebäudehülle nicht verbessern.

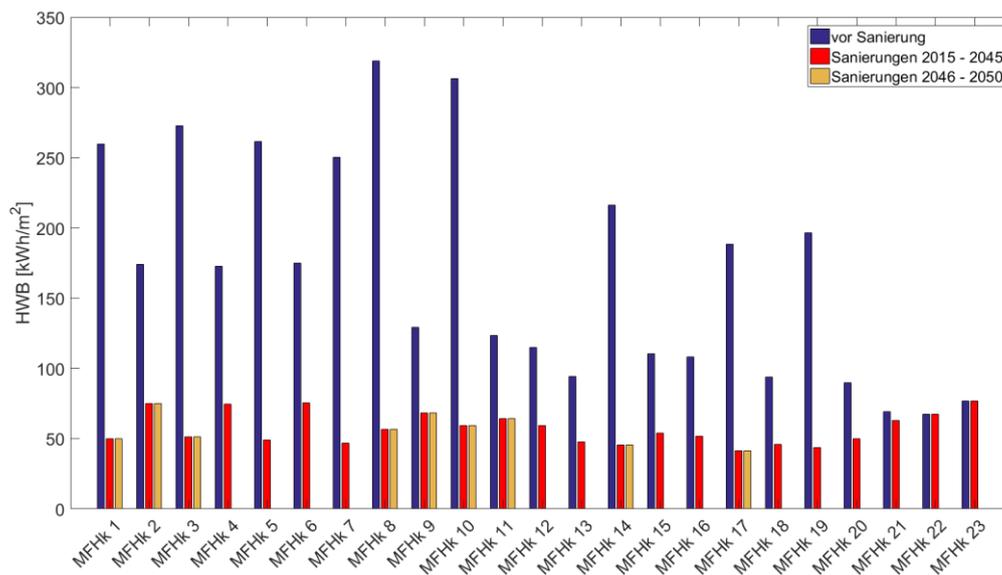


Abbildung 5-17: Heizwärmebedarf der kleinen Mehrfamilienwohngebäude vor einer optimierten Sanierung und mit den ökonomisch optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit konstanten Energiepreisen, Energiepreisszenario 2.

### 5.3.3 Energiepreisszenario 3

Durch die in diesem Energiepreisszenario berücksichtigten hohen Energiepreise der fossilen Energieträger werden ambitioniertere Maßnahmen zur Sanierung der Gebäudehülle erwartet.

Abbildung 5-18 zeigt die Ergebnisse des Optimierungsmodells anhand des spezifischen Heizwärmebedarfs.

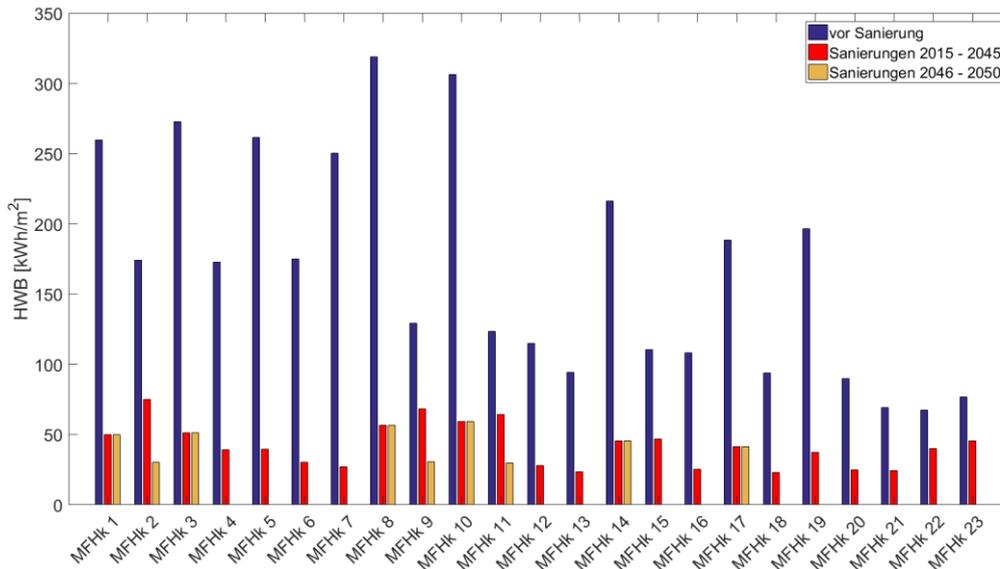


Abbildung 5-18: Heizwärmebedarf der kleinen Mehrfamilienwohngebäude vor einer optimierten Sanierung und mit den ökonomisch optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 3

Der spezifische Heizwärmebedarf der jüngeren Mehrfamilienwohngebäude MFHk 22 und MFHk 23 wird durch die ökonomisch optimierte Sanierung von den ursprünglichen 67 kWh/m<sup>2</sup> bzw. 77 kWh/m<sup>2</sup> um 40% bzw. 41% auf 40 kWh/m<sup>2</sup> bzw. 45 kWh/m<sup>2</sup> gesenkt. Mit dem Energiepreisszenario 1 konnte für diese kleinen Mehrfamilienwohngebäude nur eine Reduzierung des spezifischen Heizwärmebedarfs von jeweils 6% erzielt werden.

Bei den kleinen Mehrfamilienwohngebäuden MFHk 2, MFHk 9 und MFHk 11 werden beim jeweiligen zweiten Sanierungszeitpunkt der Gebäudeklassen Maßnahmen getroffen, die den spezifischen Heizwärmebedarf im Vergleich zu den Ergebnissen des Energiepreisszenario 1, noch weiter verringert. Das Mehrfamilienwohngebäude MFHk 2 kann seinen Heizwärmebedarf von 174 kWh/m<sup>2</sup> durch das gewählte Maßnahmenbündel der ersten Sanierung auf 75 kWh/m<sup>2</sup> und durch das gewählte Maßnahmenbündel der zweiten Sanierung auf 30 kWh/m<sup>2</sup> senken. Im Vergleich zu den Ergebnissen des Energiepreisszenarios 1 kann hier der Heizwärmebedarf um 55% reduziert werden.

Abbildung 5-20 und Abbildung 5-19 zeigen den Endenergiebedarf für die Jahre 2015 und 2050 in relativen und absoluten Zahlen. Das kleine Mehrfamilienwohngebäude MFHk 7 hat die größte relative Einsparung des Endenergiebedarfs im Vergleich zu den anderen Mehrfamilienwohngebäuden unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenarios 3. Hier kann der Endenergiebedarf durch die ökonomisch optimierten Sanierungen um rund 88% gesenkt werden. In absoluten Zahlen, ist aber der Anteil, den das Mehrfamilienwohngebäude MFHk 7 mit seinen Einsparungen zum

Gesamtenergiebedarf beiträgt, gering. Das Mehrfamilienwohng Gebäude MFHk 2 jedoch, kann seinen Endenergiebedarf durch die getroffenen Maßnahmen in absoluten Zahlen von 274 GWh auf 48 GWh reduzieren.

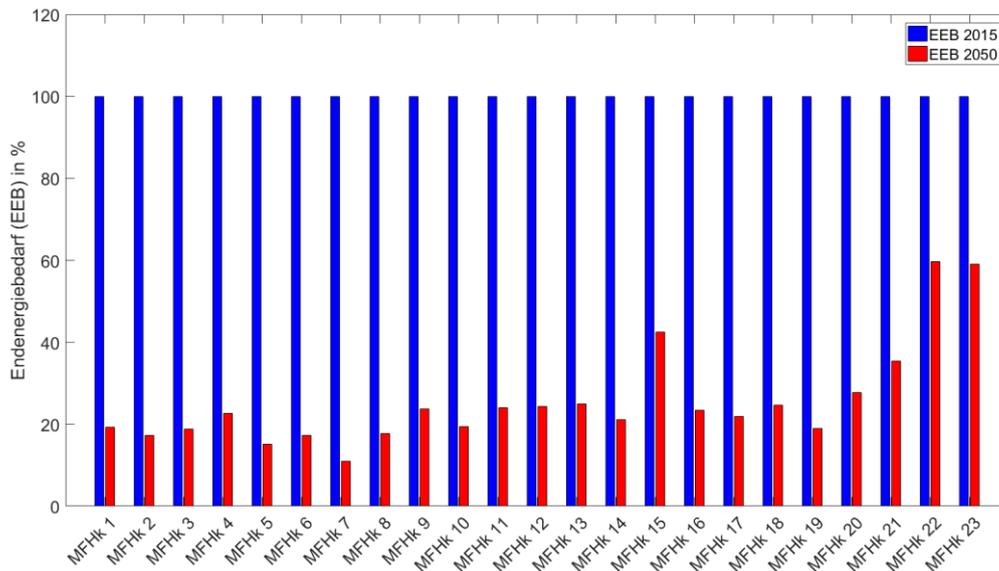


Abbildung 5-19: Relative Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen kleine Mehrfamilienwohng Gebäude der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 3

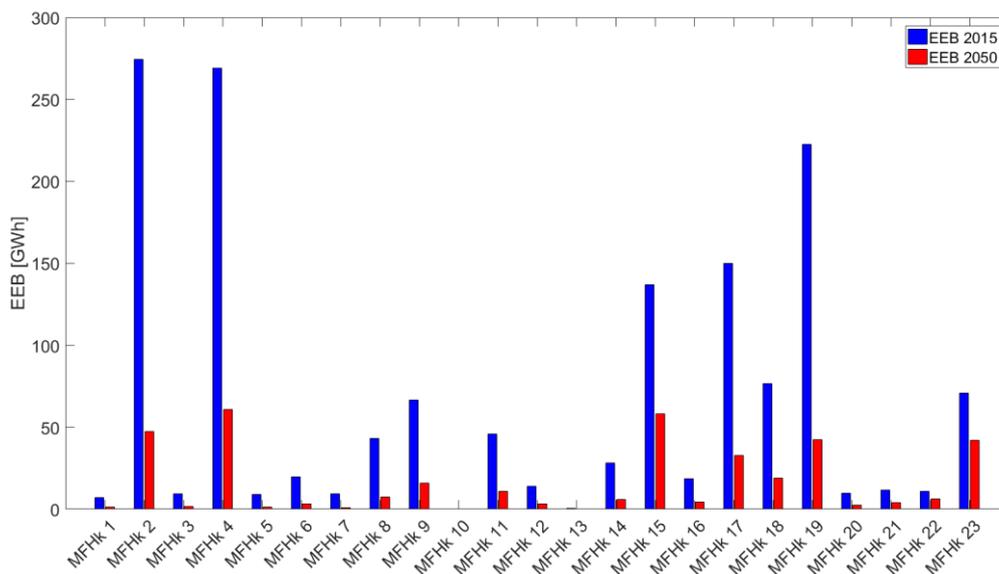


Abbildung 5-20: Absolute Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen kleines Mehrfamilienwohng Gebäude der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 3.

In Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22 sind für jede Gebäudeklasse die ausgewählten Sanierungstiefen je Gebäudekomponente dargestellt. Beim Mehrfamilienwohng Gebäude MFHk 2, werden bei der ersten Sanierung nur Maßnahmen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Fassade getroffen. Bei der Kellerdecke wird eine Wärmedämmung mit einer Dämmstoffdicke von 160 mm angebracht. Die Fassade wird mit der Maßnahme 120 mm Wärmedämmung saniert. Dies führt zu einer Reduktion des Heizwärmebedarfs auf 75 kWh/m<sup>2</sup>. Durch das Maßnahmenbündel der zweiten Sanierung kann der

Heizwärmebedarf auf 30 kWh/m<sup>2</sup> reduziert werden. Die Wärmedämmung der Gebäudekomponente Kellerdecke wird mit weiteren 20 mm gedämmt und hat insgesamt eine Wärmedämmung der Dicke von 180 mm. Die Gebäudekomponente Dach wird beim zweiten Sanierungszeitpunkt mit 120 mm gedämmt. Auch die Fassade wird mit weiteren 40mm gedämmt und erreicht damit eine Dicke der Wärmedämmung von 160 mm. Wie die Gebäudekomponente Dach werden auch die Fenster erst bei dem zweiten Sanierungszeitpunkt mit Fenster mit einem U-Wert von 0,75 W/(m<sup>2</sup>K) getauscht.

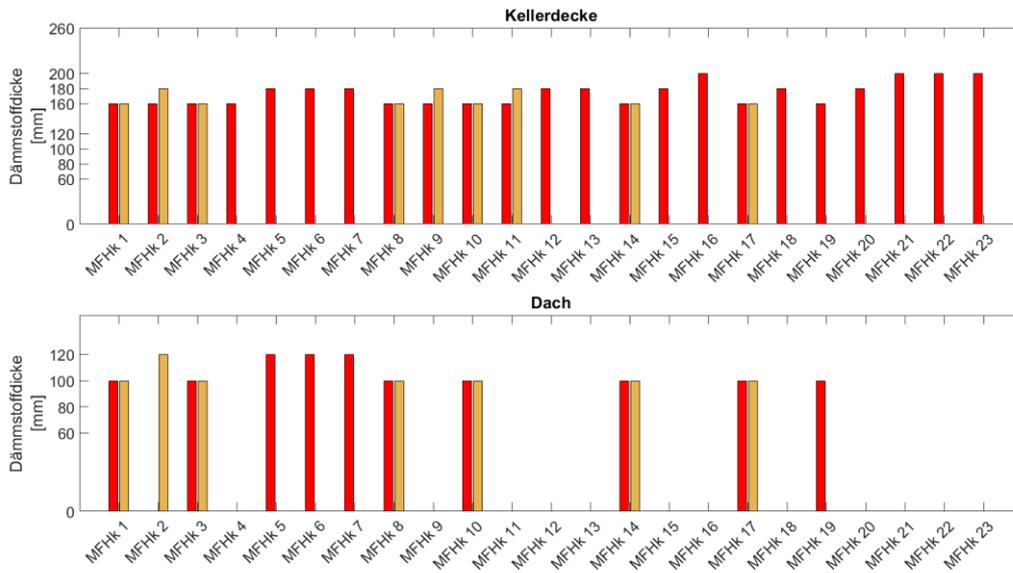


Abbildung 5-21: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Dach der Gebäudeklassen kleine Mehrfamilienwohngebäude, Energiepreisszenario 3.

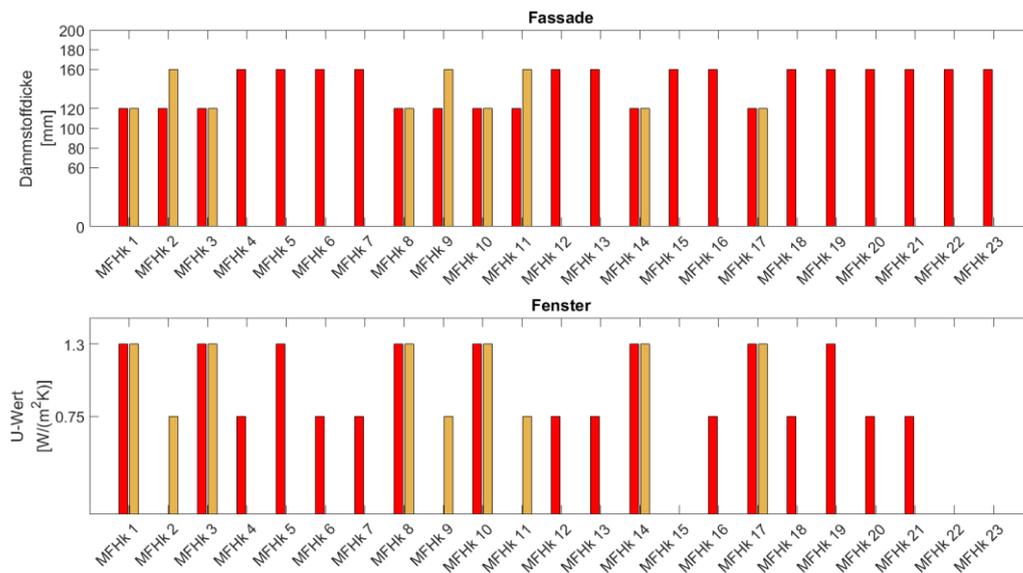


Abbildung 5-22: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Fassade und Fenster der Gebäudeklassen kleine Mehrfamilienwohngebäude, Energiepreisszenario 3

Der Wärmebedarf für diese kleinen Mehrfamilienwohngebäude beträgt vor der ökonomisch optimierten Sanierung 1338 GWh. Nach der ersten Sanierung der Gebäudeklassen kann der Wärmebedarf auf 424 GWh reduziert werden. Vergleicht man die Werte des Wärmebedarfs von 2015

mit den Werten des Wärmebedarfs von 2050, kann mit der zweiten Sanierung einiger kleinen Mehrfamilienwohngebäuden, der Wärmebedarf auf 332 GWh vermindert werden. Bezogen auf das Jahr 2015 kann der Wärmebedarf für die kleinen Mehrfamilienwohngebäude um rund 68% reduziert werden.

#### 5.4 Einfluss der Energiepreisszenarien auf die Wärmebedarfsentwicklung der Gebäudekategorie große Mehrfamilienwohngebäude

In Tabelle 23 sind alle Gebäudeklassen der Gebäudekategorie große Mehrfamilienwohngebäude (MFHg) mit allen wichtigen Daten, wie die weiterfolgende Bezeichnung, Anzahl der Gebäude, Bauperiode, Zeitraum einer schon erfolgten Fassadensanierung und der spezifische Heizwärmebedarf vor der ökonomisch optimierten Sanierung aufgelistet.

*Tabelle 23: Auflistung der großen Mehrfamilienwohngebäude mit deren Daten*

	<b>Anzahl der Gebäude</b>	<b>Bauperiode</b>	<b>Zeitraum vorherige Sanierung</b>	<b>HWB [kWh/m<sup>2</sup>]</b>
MFHg 1	63	1890 – 1918	1890 – 1918	215,77
MFHg 2	3920	1890 – 1918	1932 – 1952	132,86
MFHg 3	106	1890 – 1918	1932 – 1952	216,64
MFHg 4	3880	1890 – 1918	1975 – 1995	132,35
MFHg 5	106	1890 – 1918	1975 – 1995	213,83
MFHg 6	301	1890 – 1918	2000 – 2008	133,41
MFHg 7	59	1890 – 1918	2000 – 2008	210,25
MFHg 8	339	1919 – 1944	1919 – 1944	412,69
MFHg 9	1285	1919 – 1944	1956 – 1976	186,66
MFHg 10	9	1919 – 1944	1960 – 1980	361,24
MFHg 11	1022	1919 – 1944	1961 – 1981	185,88
MFHg 12	374	1919 – 1944	1991 – 2008	114,70
MFHg 13	7	1919 – 1944	2000 – 2008	103,35
MFHg 14	303	1945 – 1965	1945 – 1965	200,83
MFHg 15	2726	1945 – 1965	1975 – 1995	102,50
MFHg 16	401	1945 – 1965	2000 – 2008	87,26
MFHg 17	2170	1966 – 1979	1966 – 1979	181,38
MFHg 18	2276	1966 – 1979	1991 – 2008	87,07
MFHg 19	3916	1980 – 1992	1980 – 1992	144,66
MFHg 20	404	1980 – 1992	2000 – 2008	65,37
MFHg 21	530	1993 – 2002	1993 – 2008	52,35
MFHg 22	345	2003 – 2006	2003 – 2006	45,07
MFHg 23	3383	2006 – 2008	2006 – 2008	40,49

### 5.4.1 Energiepreisszenario 1

Die Resultate des spezifischen Heizwärmebedarfs des Optimierungsmodells unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1 sind in Abbildung 5-23 dargestellt. Den Endenergiebedarf der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich in relativen und in absoluten Zahlen zeigen Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25.

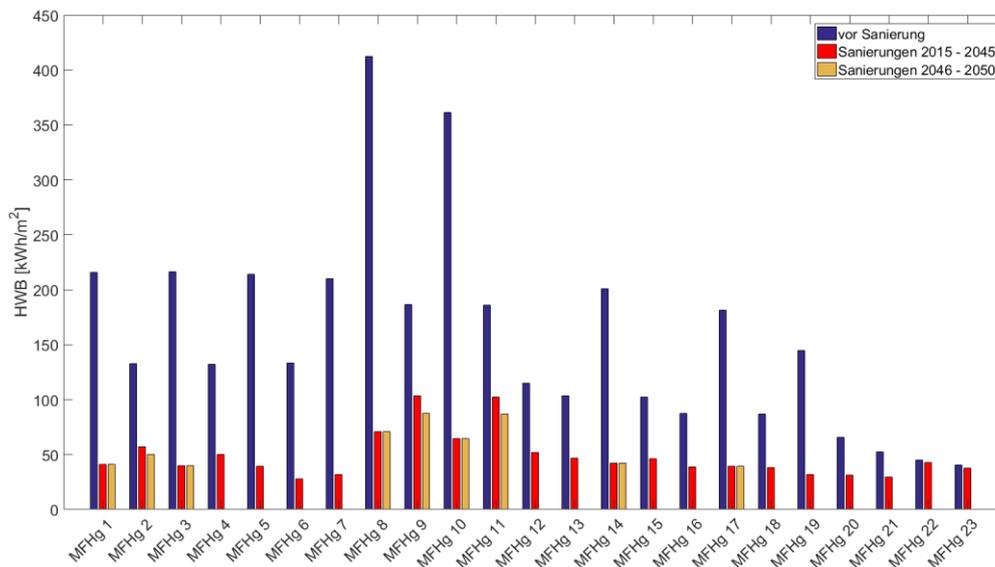


Abbildung 5-23: Heizwärmebedarf der großen Mehrfamilienwohngebäude vor einer optimierten Sanierung und mit den ökonomisch optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1

Die Abbildung 5-23 zeigt den resultierenden Heizwärmebedarf nach der ersten (roter Balken) und der möglichen zweiten (gelber Balken) Sanierung je Gebäudeklasse. Dabei ist gut zu erkennen, dass bei jeder Gebäudeklasse Maßnahmen die zu einer Verbesserung der Gebäudehülle führen getätigt werden. Auch bei den neueren großen Mehrfamilienwohngebäuden MFHg 22 und MFHg 23 die im Zeitraum von 2003 bis 2008 errichtet wurden, werden aus ökonomisch optimierter Sicht Maßnahmen getroffen, die eine Verbesserung der Gebäudehülle erzielen. Der resultierende Heizwärmebedarf und der relative Endenergiebedarf kann im Vergleich zum Endenergiebedarf des Jahres 2015 um 5% bzw. 7% reduziert werden.

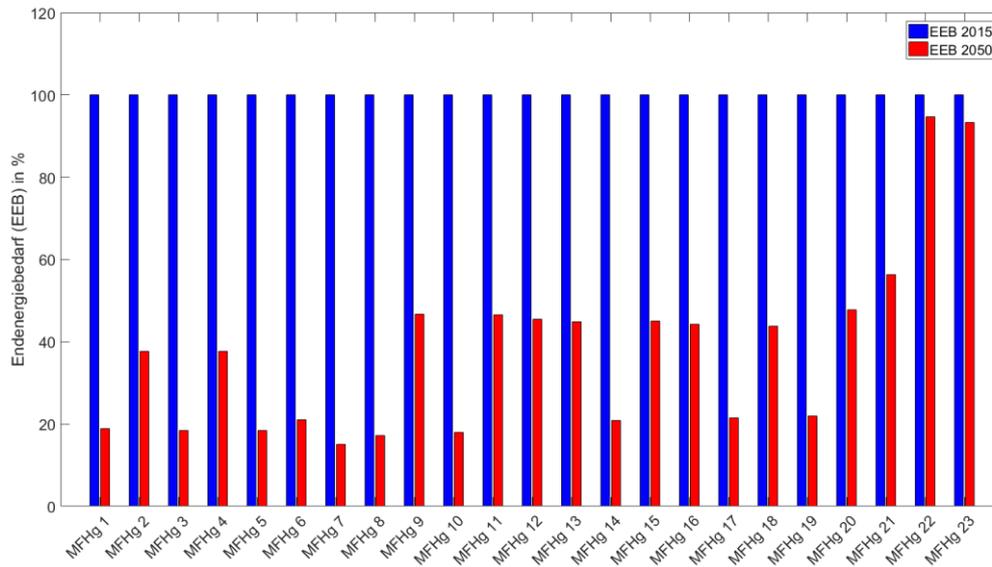


Abbildung 5-24: Relative Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen große Mehrfamilienwohngebäude der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 1

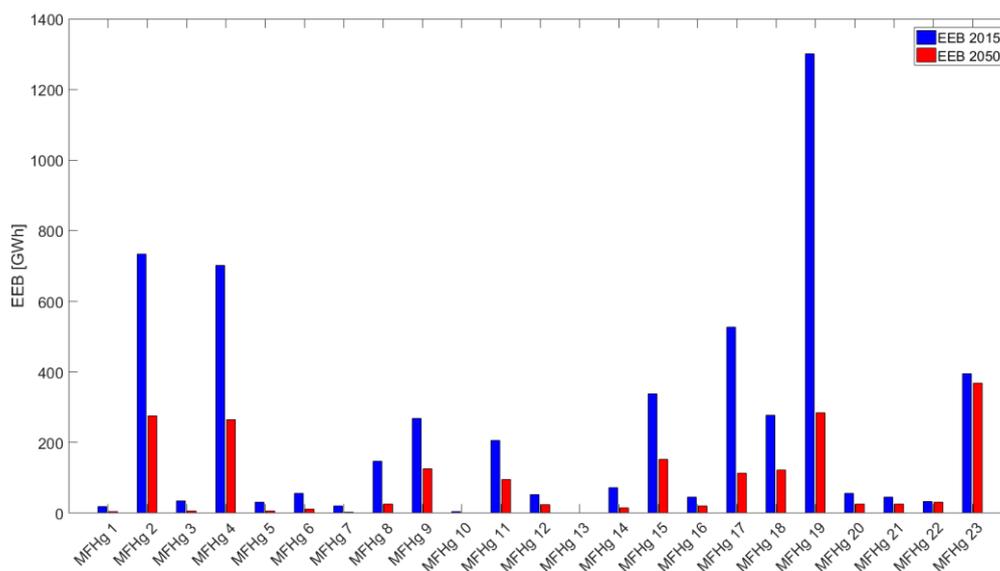


Abbildung 5-25: Absolute Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen große Mehrfamilienwohngebäude der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 1.

Die größte relative Einsparung kann durch die ökonomisch optimierte Sanierung beim großen Mehrfamilienwohngebäude MFHg 7 erzielt werden. Bei diesem großen Mehrfamilienwohngebäude reduziert sich der Wert des Heizwärmebedarfs und des Endenergiebedarfs auf 15% des ursprünglichen Wertes. Der Endenergiebedarf wird durch Maßnahmen aller vier Gebäudekomponenten von 20 GWh auf 3 GWh gesenkt.

Abbildung 5-26 und Abbildung 5-27 zeigen die Maßnahmen die je Gebäudekomponente für die großen Mehrfamilienwohngebäude getroffen wurden.

Dieses Maßnahmenbündel welches für das Mehrfamilienwohngebäude MFHg 7 ausgewählt wurde, besteht aus einer Wärmedämmung der Kellerdecke mit einer Dämmstoffdicke von 180 mm, einer Wärmedämmung des Daches mit einer Dämmstoffdicke von 120 mm und einer Wärmedämmung der Fassade mit einer Dämmstoffdicke von 160 mm. Auch die Fenster werden mit Fenstern mit einem U-Wert von 1,3 W/(m<sup>2</sup>K) getauscht.

Das große Mehrfamilienwohngebäude MFHg 11 wird im Betrachtungszeitraum 2-mal saniert. Bei der ersten Sanierung werden die Gebäudekomponente Kellerdecke und Fassade thermisch verbessert. Durch eine Wärmedämmung mit den Dämmstoffdicken von 160 mm und 120 mm verringert sich der spezifische Heizwärmebedarf um 45% auf 83 kWh/m<sup>2</sup> von 186 kWh/m<sup>2</sup>. Bei der zweiten Sanierung dieses Mehrfamilienwohngebäudes wird die Gebäudekomponente Kellerdecke instandgehalten und die Gebäudekomponente Fassade um eine Wärmedämmung der Dicke 40 mm erweitert. Das heißt die Dämmstoffdicke der Gebäudekomponente Fassade beträgt 160 mm. Dieses Maßnahmenbündel erzielt eine erneute Reduktion des Heizwärmebedarfs auf 53 kWh/m<sup>2</sup>.

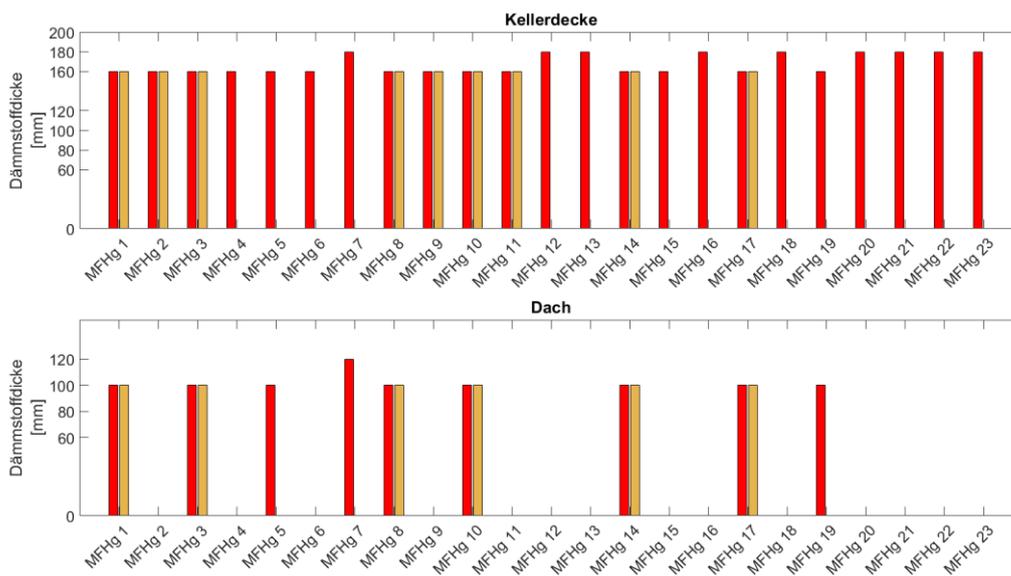


Abbildung 5-26: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Dach der Gebäudeklassen große Mehrfamilienwohngebäude unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1.

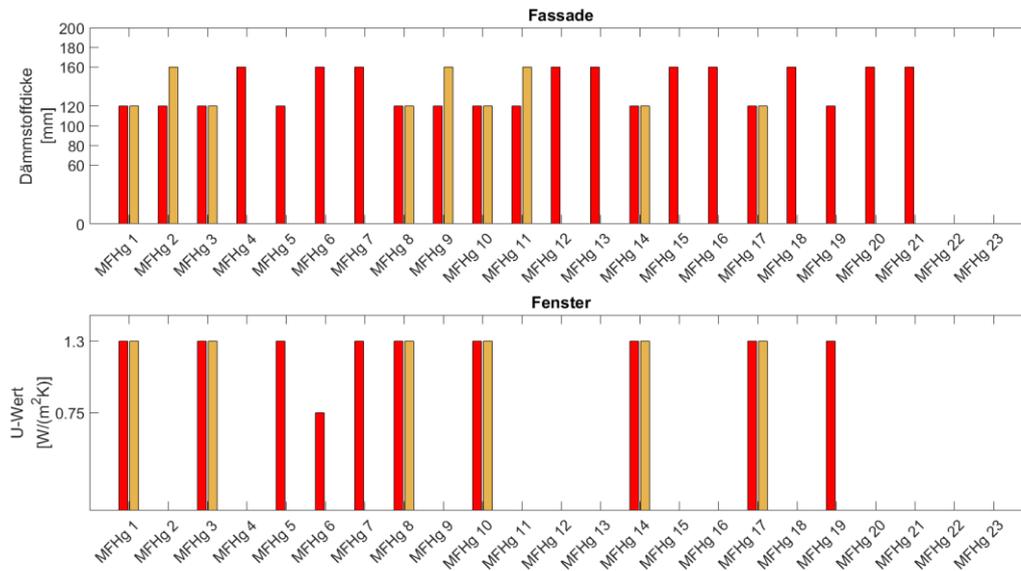


Abbildung 5-27: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Fassade und Fenster der Gebäudeklassen große Mehrfamilienwohngebäude unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1.

Der Wärmebedarf für diese großen Mehrfamilienwohngebäude beträgt vor der ökonomisch optimierten Sanierung 4773 GWh. Durch einmalige bzw. bei manchen Gebäudeklassen zweimalige Sanierung der Gebäudehülle wird der Wärmebedarf im Jahr 2050 auf 1781 GWh reduziert.

#### 5.4.2 Energiepreisszenario 2

Abbildung 5-28 zeigt die Auswirkungen des Energiepreisszenarios 2, konstante Energiepreise, auf den spezifischen Heizwärmebedarf der großen Mehrfamilienwohngebäude. Durch die konstanten Energiepreise werden bei den jüngeren großen Mehrfamilienwohngebäude MFHg 22 und MFHg 23 nach Ablauf der Lebensdauer nur Instandhaltungsmaßnahmen getroffen, die die thermische Qualität der Gebäudehülle nicht verbessern.

Wie auch schon in den vorherigen Gebäudekategorien bemerkt, fallen die ersten und zweiten Sanierungen der Gebäudeklassen in Bezug auf die Reduktion geringer aus, als mit dem Energiepreisszenario 1. Vor allem bei den zweiten Sanierungszeitpunkten, werden nur die Instandhaltungsmaßnahmen getätigt.

Als Beispiel wird hier auf das große Mehrfamilienwohngebäude MFHg 7 eingegangen. Als Ergebnis der Optimierung mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenarios 2 wird hier durch die thermische Sanierung ein Heizwärmebedarf von 171 kWh/m<sup>2</sup> erreicht, was einer Reduktion bezogen auf den Ausgangswert von 82% entspricht. Mit dem Energiepreisszenario 1 konnte hier eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um 85% erzielt werden. Aufgrund der niedrigen Energiepreise im Vergleich des Energiepreisszenarios 1 wird hier ein weniger ambitioniertes Maßnahmenbündel gewählt.

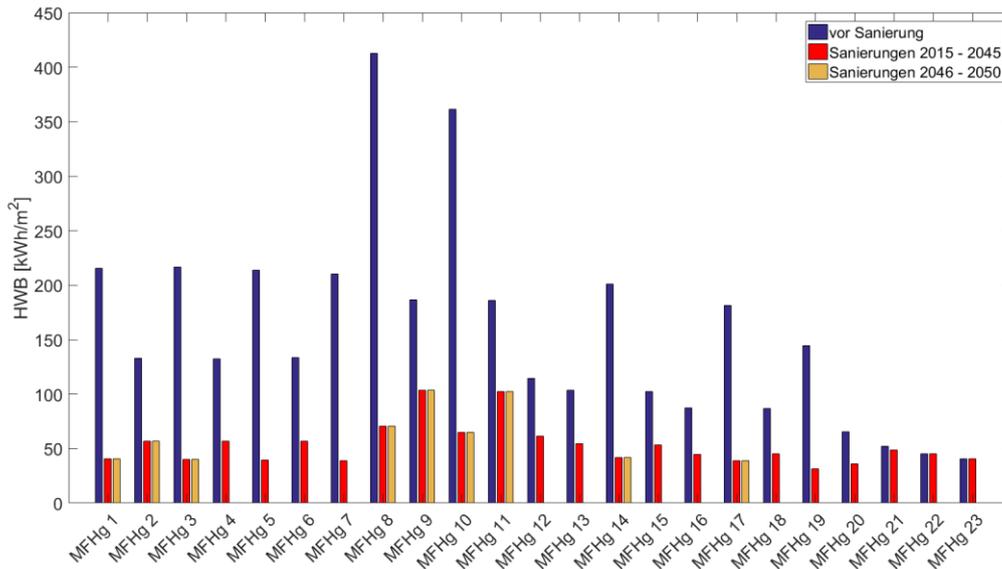


Abbildung 5-28: Heizwärmebedarf der großen Mehrfamilienwohngebäude vor einer optimierten Sanierung und mit den ökonomisch optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit konstanten Energiepreisen, Energiepreisszenario 2.

### 5.4.3 Energiepreisszenario 3

Durch die in diesem Energiepreisszenario berücksichtigten hohen Energiepreise der fossilen Energieträger werden auch hier ambitioniertere Maßnahmenbündel zur Sanierung der Gebäudehülle getroffen.

Abbildung 5-29 zeigt die Ergebnisse des Optimierungsmodells anhand des spezifischen Heizwärmebedarfs der Gebäudeklasse große Mehrfamilienwohngebäude.

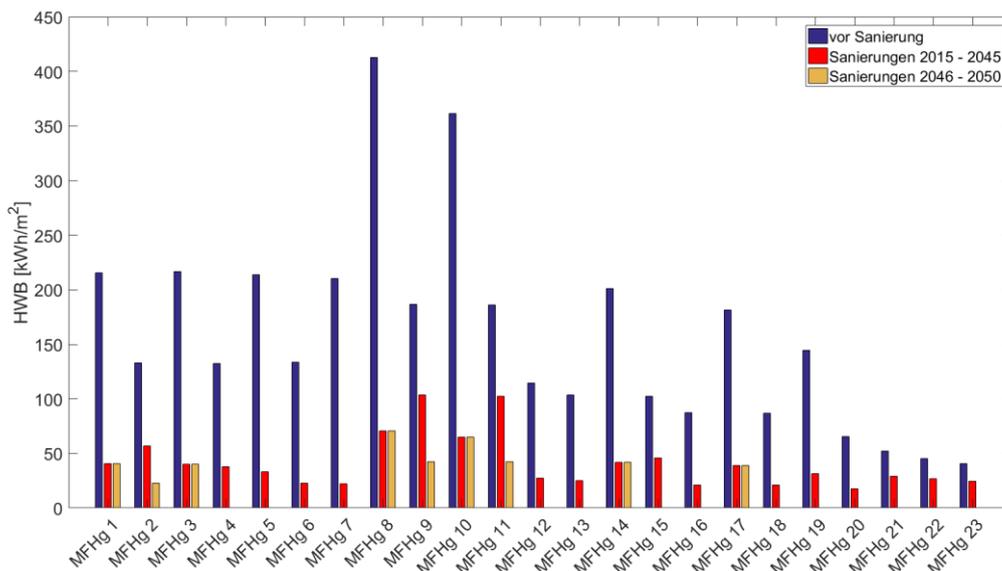


Abbildung 5-29: Heizwärmebedarf der großen Mehrfamilienwohngebäude vor einer optimierten Sanierung und mit den ökonomisch optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 3

Durch die hohen Energiepreise der fossilen Energieträger, werden auch die jüngeren Mehrfamilienwohngebäude MFHg 22 und MFHg 23 saniert. Dabei kann der spezifische Heizwärmebedarf von 45 kWh/m<sup>2</sup> und 40 kWh/m<sup>2</sup> um jeweils 40% auf 27 kWh/m<sup>2</sup> und 24 kWh/m<sup>2</sup> reduziert werden. Mit den Energiepreisszenario 1 konnte nur eine Reduktion von 5% bzw. 7% erzielt werden.

Bei den großen Mehrfamilienwohngebäuden MFHg 2, MFHg 9 und MFHg 11 werden bei der ersten Sanierung die gleichen Maßnahmenbündel ausgewählt, wie beim Energiepreisszenario 1. Bei der zweiten Sanierung werden aber unter Berücksichtigung des Energiepreisszenarios 2, viel ambitioniertere Maßnahmenbündel ausgewählt. Das Mehrfamilienwohngebäude MFHg 2 kann seinen Heizwärmebedarf von 133 kWh/m<sup>2</sup> durch das gewählte Maßnahmenbündel der ersten Sanierung auf 57 kWh/m<sup>2</sup> und durch das gewählte Maßnahmenbündel der zweiten Sanierung auf 23 kWh/m<sup>2</sup> senken. Im Vergleich zum Ergebnis des Energiepreisszenarios 1, kann hier der Heizwärmebedarf um 54% gesenkt werden.

In Abbildung 5-30 und Abbildung 5-31 wird der Endenergiebedarf der Gebäudeklassen großes Mehrfamilienwohngebäude der Jahre 2015 und 2050 in relativen und absoluten Zahlen dargestellt. Das große Mehrfamilienwohngebäude MFHg 7 hat die größte relative Einsparung des Endenergiebedarfs im Vergleich zu den anderen Mehrfamilienwohngebäuden unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenarios 3. Hier kann der Endenergiebedarf durch die ökonomisch optimierten Sanierungen um rund 89% gesenkt werden. In absoluten Zahlen ist aber der Anteil den das Mehfamilienhaus MFHg 7 mit seinen Einsparungen zum Gesamtenergiebedarf beiträgt gering. Das Mehrfamilienwohngebäude MFHg 2 kann seinen Endenergiebedarf durch die getroffenen Maßnahmenbündel in absoluten Zahlen von 734 GWh auf 127 GWh reduzieren.

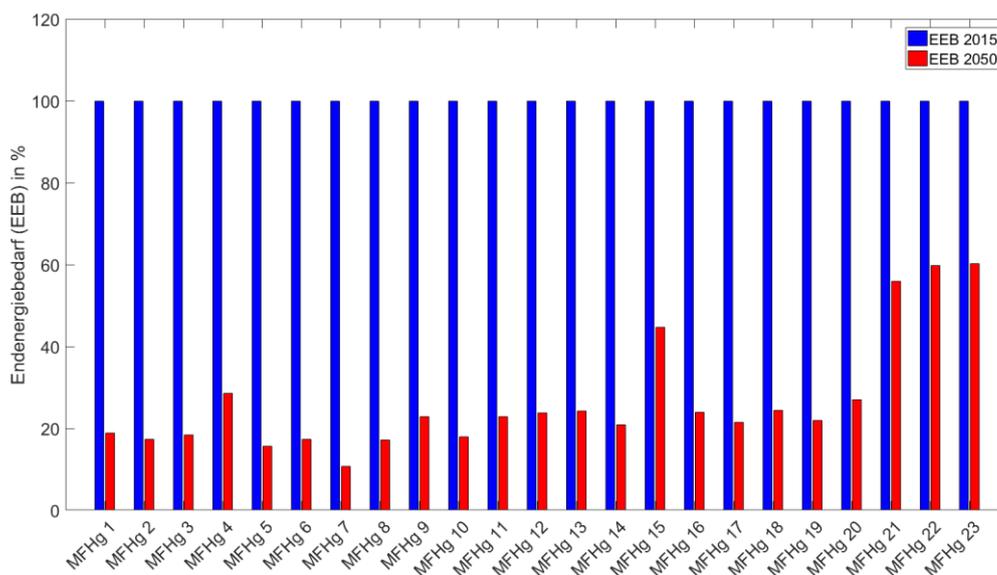


Abbildung 5-30: Relative Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen große Mehrfamilienwohngebäude der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 3

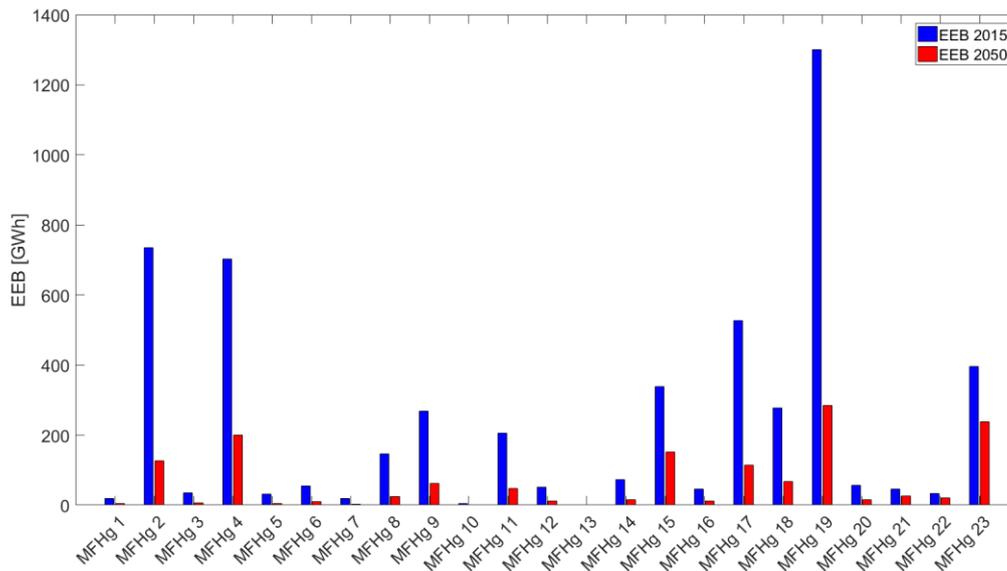


Abbildung 5-31: Absolute Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen großes Mehrfamilienwohngebäude der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 3.

Die Abbildung 5-32 und Abbildung 5-33 zeigen für jede Gebäudeklasse die getroffenen Sanierungstiefen je Gebäudekomponente. Beim Mehrfamilienwohngebäude MFHg 2 werden bei der ersten Sanierung nur Maßnahmen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Fassade getroffen. Die Kellerdecke wird mit einer Wärmedämmung der Dämmstoffdicke von 160 mm saniert. Die Fassade wird mit einer Wärmedämmung der Dämmstoffdicke von 120 mm saniert. Dies führt zu einer Reduktion des spezifischen Heizwärmebedarfs auf 57 kWh/m<sup>2</sup>. Durch das gewählte Maßnahmenbündel der zweiten Sanierung kann der Heizwärmebedarf auf 23 kWh/m<sup>2</sup> reduziert werden. Dabei wird die Gebäudekomponente Kellerdecke mit weiteren 20 mm gedämmt und hat damit eine Wärmedämmung der Dicke von 180 mm. Die Gebäudekomponente Dach wird bei der zweiten Sanierung mit einer Wärmedämmung der Dicke 120 mm saniert. Die Gebäudekomponente Fassade wird mit weiteren 40 mm gedämmt und erreicht damit eine Dicke der Wärmedämmung von 160 mm. Wie die Gebäudekomponente Dach werden auch die Fenster erst bei der zweiten Sanierung getauscht. Die alten Fenster werden mit neuen Fenstern mit einem U-Wert von 0,75 W/(m<sup>2</sup>K) getauscht.

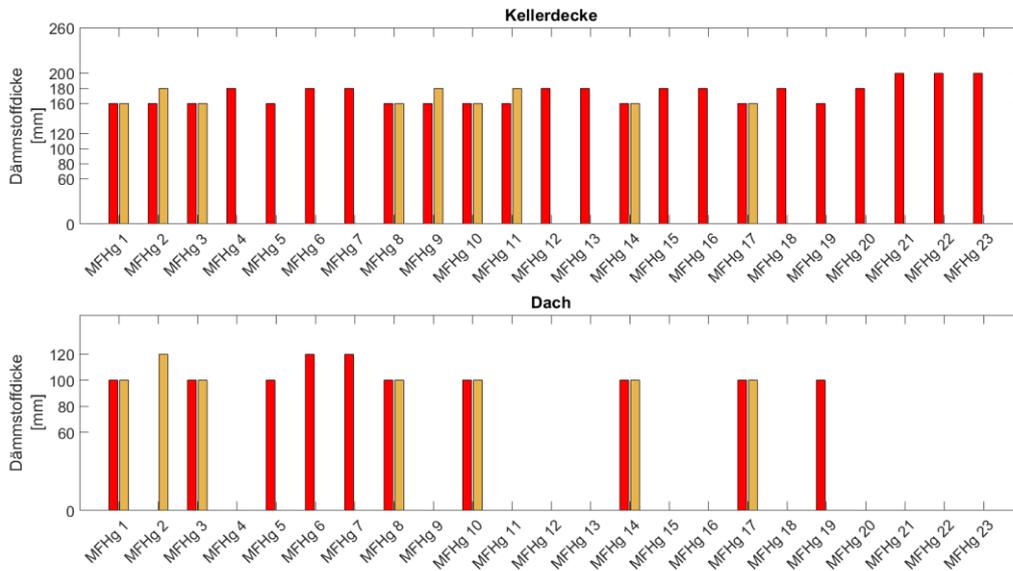


Abbildung 5-32: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Dach der Gebäudeklassen große Mehrfamilienwohngebäude, Energiepreisszenario 3.

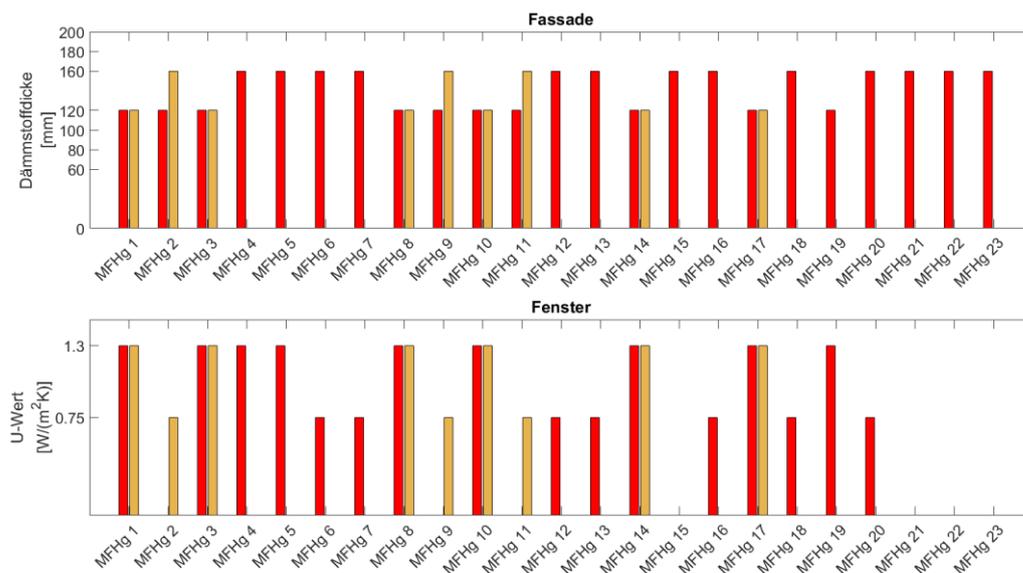


Abbildung 5-33: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Fassade und Fenster der Gebäudeklassen große Mehrfamilienwohngebäude, Energiepreisszenario 3.

Der Wärmebedarf für diese großen Mehrfamilienwohngebäude beträgt vor der ökonomisch optimierten Sanierung 4773 GWh. Nach der ersten Sanierung der großen Mehrfamilienwohngebäude kann der Wärmebedarf auf 1587 GWh reduziert werden. Bis zum Jahr 2050, das heißt die zweiten Sanierungen einiger Mehrfamilienwohngebäude werden berücksichtigt, kann der Wärmebedarf der Gebäudekategorie große Mehrfamilienwohngebäude auf 1284 GWh vermindert werden.



# 6

# Schlussfolgerungen

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die ökonomisch optimierten Sanierungsmaßnahmen die zu einer Minimierung der laufenden jährlichen Energiekosten führen zu analysieren. Dabei werden auch die Annuitäten einer Investition in die Gebäudehülle berücksichtigt.

Die Auswirkungen der ökonomisch optimierten Sanierungsmaßnahmen sind abhängig von den Energiepreisszenarien. Die drei Energiepreisszenarien unterscheiden sich in der Entwicklung der Energiepreise bis 2050. Das Energiepreisszenario 1 stellt ein „Business-as-Usual-Szenario“ dar. Beim Energiepreisszenario 2 werden die Energiepreise des Jahres 2015 im Betrachtungszeitraum als konstant angenommen. Das Energiepreisszenario 3 erwartet die höchsten Energiepreise für fossile Energieträger.

Würden die Energiepreise, wie im Energiepreisszenario 2 auf dem Niveau von 2015 bleiben, zeigen die Ergebnisse, dass es auch mit diesen niedrigen Energiepreisen ökonomisch sinnvoll ist den Gebäudebestand zu sanieren. Da die Energiepreise jedoch auf dem Niveau von 2015 bleiben, macht es bei jenen Gebäudeklassen, die im Betrachtungszeitraum aufgrund der technischen Lebensdauer der Komponenten ein zweites Mal saniert werden, aus ökonomischer Sicht keinen Sinn weitere kostenintensivere und energiebedarfsreduzierende Maßnahmen als die Instandhaltung zu treffen. Trotz der in dieser Analyse zugrundeliegenden geringsten Energiepreise, kann der Endenergiebedarf im Jahr 2015 von 16 TWh auf 7 TWh im Jahr 2050 reduziert werden, was einer Reduktion von 56% entspricht. Durch die ökonomisch optimierten thermischen Sanierungsmaßnahmen mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenarios 2 reduzieren sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 56%.

Wird die Energiepreisentwicklung des Energiepreisszenarios 1 berücksichtigt, zeigen die Ergebnisse eine deutliche Verringerung des Endenergiebedarfs. Der Endenergiebedarf kann ausgehend vom Jahr 2015 mit 16 TWh bis zum Jahr 2050 auf 6 TWh reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion des Endenergiebedarfs um 63%. Auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren sich um den gleichen Faktor, da die Anteile der Energieträger als konstant angenommen wurden.

Sind im Jahr 2050 die Energiepreise der fossilen Energieträger Gas und Öl um 47% bzw. um 97% höher als im „Business-as-usual“-Szenario, kann der Endenergiebedarf ausgehend von 16 TWh im Jahr 2015 auf 4TWh im Jahr 2050 reduziert werden, was einer Reduktion von 75% entspricht. Auch die CO<sub>2</sub>-

Emissionen mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenarios 3 reduzieren sich um den gleichen Faktor, da die Anteile der Energieträger als konstant angenommen wurden.

Das meiste Einsparungspotential, unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenarios 1, ergibt sich in der Gebäudekategorie kleine Mehrfamilienwohngebäude. Hier kann der Endenergiebedarf von 1505 GWh im Jahr 2015 um 65% auf 529 GWh im Jahr 2050 durch die ökonomisch optimierten Sanierungsmaßnahmen reduziert werden. Die geringste Einsparung des Endenergiebedarfs im Vergleich aller Gebäudekategorien kann bei der Gebäudekategorie Einfamilienhaus erzielt werden. Hier kann der Endenergiebedarf von 1706 GWh im Jahr 2015 um 60% auf 674 GWh durch die ökonomisch optimierten Sanierungsmaßnahmen reduziert werden. Bei der Gebäudekategorie Einfamilienhaus werden aus kostentechnischer Sicht mehr Gebäudeklassen mit der Maßnahme Instandhaltung bei der zweiten Sanierung ausgewählt.

Für die unterschiedlichen Gebäudekategorien werden mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenarios 1 verschiedene Sanierungsmaßnahmen ausgewählt. Bei der Gebäudekomponente Kellerdecke werden bei allen Gebäudekategorien Sanierungsmaßnahmen mit einer Dämmstoffdicke von 160 mm und 180 mm ausgewählt. Bei den Gebäudekategorien Büros in Wohngebäuden und Bürogebäude wird zusätzlich noch die Maßnahme einer Dämmung der Kellerdecke mit 120 mm als ökonomisch optimierte Sanierungstiefe ausgewählt. Auch bei der Gebäudekomponente Dach wird bei der Gebäudekategorie Büros in Wohngebäuden und Bürogebäude eine weniger ambitioniertere Sanierungstiefe aus ökonomisch optimaler Sicht bei manchen Gebäudeklassen ausgewählt. Bei der Gebäudekomponente Fassade werden für alle fünf Gebäudekategorien die Maßnahmen mit einer Dämmstoffdicke von 120mm und 160mm ausgewählt. Interessant ist auch, dass aus ökonomisch optimierter Sicht außer bei der Gebäudekategorie Büros in Wohngebäuden die Fenster mit U-Werten von 1,3 und 0,75 W/(m<sup>2</sup>K) erneuert werden. Bei der Gebäudekategorie Büros in Wohngebäuden wird aus ökonomisch optimierter Sicht nur die Maßnahme mit einem U-Wert von 1,3 W/(m<sup>2</sup>K) ausgewählt. Das heißt, bei den Gebäudekategorien Büros in Wohngebäuden und Bürogebäude werden aus ökonomischer Sicht auch weniger ambitioniertere Maßnahmen in die Gebäudekomponente getroffen.

Mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenarios 3 werden ambitioniertere Sanierungsmaßnahmen ausgewählt. Bei der Gebäudekomponente Kellerdecke und Fassade, wird aus ökonomisch optimierter Sicht zusätzlich die Sanierungsmaßnahme mit einer Dicke von 200 mm und 180 mm ausgewählt. Bei der Gebäudekomponente Dach, werden die selben Sanierungsmaßnahmen, wie mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenarios 1 getroffen. Bei der Gebäudekomponente Büros in Wohngebäuden werden nun auch die Gebäudekomponente Fenster mit der Sanierungstiefe, U-Wert von 0,75 W/(m<sup>2</sup>K) getroffen.

Auch mit der Berücksichtigung der hohen Energiepreise der fossilen Energieträger des Energiepreisszenarios 3, ergibt sich das meiste Einsparungspotential in der Gebäudekategorie kleine Mehrfamilienwohngebäude. Bei dieser Gebäudekategorie kann der Endenergiebedarf auf 373 GWh reduziert werden. Bezogen auf das Jahr 2015 ergibt das eine Reduktion um 75%. Durch die hohen Energiepreise der fossilen Energieträger werden aus ökonomischer Sicht ambitioniertere Maßnahmenbündel ausgewählt, die im Vergleich zum Energiepreisszenario 1, eine weitere Reduktion

des Endenergiebedarfs der Gebäudekategorie kleines Mehrfamilienwohngebäude von 10% erzielt. Auch bei der Gebäudekategorie Einfamilienhaus kann durch die hohen Energiepreise für fossile Energieträger eine weitere Reduktion um 6% des Endenergiebedarfs im Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Energiepreisszenario 1 erzielt werden. Dabei kann der Endenergiebedarf auf 674 GWh reduziert werden, entspricht einer Reduktion bezogen auf das 2015 um 66%.

Der Modellierungsansatz bietet Möglichkeiten für weitere Untersuchungen und weitere Analysen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt wurden.

Eine Möglichkeit für eine weitere Analyse ist, dass sich die Anteile der Energieträger im Betrachtungszeitraum ändern können. Dabei kann analysiert werden, wie sich eine Verringerung des Anteils der fossilen Energieträger bis zum Jahr 2050 auf die resultierenden Maßnahmenbündel auswirkt.

Eine Erweiterung des Optimierungsmodells wäre die Berücksichtigung der Anlagenseitigen Sanierung. Dadurch könnte es auch ermöglicht werden, dass sich die Art des Heizsystems und der Energieträger verändert. Durch die Berücksichtigung der Investitionskosten des Heizsystems können bessere wirtschaftliche Überlegungen getroffen werden. Da die jährlichen Energiekosten für die Bereitstellung der Endenergie mit einer Investition in das Heizsystem und in die Gebäudehülle eine Verminderung bewirken kann. Das heißt welche Heizsysteme sind in den Gebäudebestand installiert und wie kann eine Sanierung des Heizsystems im Optimierungsmodell berücksichtigt werden.

Eine weitere Erweiterung wäre zum Beispiel, die Berücksichtigung der unter Denkmalschutz stehenden Gebäude. In Wien gibt es ca. 1300 Gebäude die unter Denkmalschutz gestellt sind [6]. Für besondere Gebäude müssen andere Sanierungsmaßnahmen definiert werden. Da z.B. das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes nicht verändert werden darf bzw. erhebliche Mehrkosten für die Sanierung der Gebäudekomponenten getätigt werden müssen.



# 7

## Weitere Ergebnisse

### 7.1 Einfluss der Energiepreisszenarien auf die Wärmebedarfsentwicklung der Gebäudekategorie Büros in Wohngebäuden

In Tabelle 24 sind alle Gebäudeklassen der Gebäudekategorie Büros in Wohngebäuden (Büros in WGB 1) mit allen wichtigen Daten, wie der weiterfolgenden Bezeichnung, Anzahl der Gebäude, Bauperiode, Zeitraum einer schon erfolgten Sanierung und der spezifische Heizwärmebedarf vor der ökonomisch optimierten Sanierung aufgelistet.

Tabelle 24: Auflistung der Büros in Wohngebäuden mit deren Daten

	Anzahl der Gebäude	Bauperiode	Zeitraum vorherige Sanierung	HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]
Büros in WGB 1	59	1890 – 1918	1890 – 1918	194,78
Büros in WGB 2	3799	1890 – 1918	1932 – 1952	126,78
Büros in WGB 3	96	1890 – 1918	1932 – 1952	196,80
Büros in WGB 4	3760	1890 – 1918	1975 – 1995	126,01
Büros in WGB 5	96	1890 – 1918	1975 – 1995	210,52
Büros in WGB 6	289	1890 – 1918	2000 – 2008	127,20
Büros in WGB 7	54	1890 – 1918	2000 – 2008	210,35
Büros in WGB 8	120	1919 – 1944	1919 – 1944	354,18
Büros in WGB 9	515	1919 – 1944	1956 – 1976	125,76
Büros in WGB 10	10	1919 – 1944	1960 – 1980	211,15
Büros in WGB 11	389	1919 – 1944	1961 – 1981	108,55
Büros in WGB 12	137	1919 – 1944	1991 – 2008	94,88
Büros in WGB 13	3	1919 – 1944	2000 – 2008	101,84
Büros in WGB 14	120	1945 – 1965	1945 – 1965	223,25
Büros in WGB 15	1156	1945 – 1965	1975 – 1995	99,77
Büros in WGB 16	173	1945 – 1965	2000 – 2008	91,42
Büros in WGB 17	898	1966 – 1979	1966 – 1979	196,37
Büros in WGB 18	1001	1966 – 1979	1991 – 2008	93,34
Büros in WGB 19	2482	1980 – 1992	1980 – 1992	165,60
Büros in WGB 20	253	1980 – 1992	2000 – 2008	74,37
Büros in WGB 21	319	1993 – 2002	1993 – 2008	56,54
Büros in WGB 22	60	2003 – 2006	2003 – 2006	45,18
Büros in WGB 23	952	2006 – 2008	2006 – 2008	55,59

### 7.1.1 Energieszenario 1

Der spezifische Heizwärmebedarf als Ergebnis des Optimierungsmodells unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1 ist in Abbildung 7-1 dargestellt. Den Endenergiebedarf der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich in relativen und absoluten Zahlen zeigen Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3.

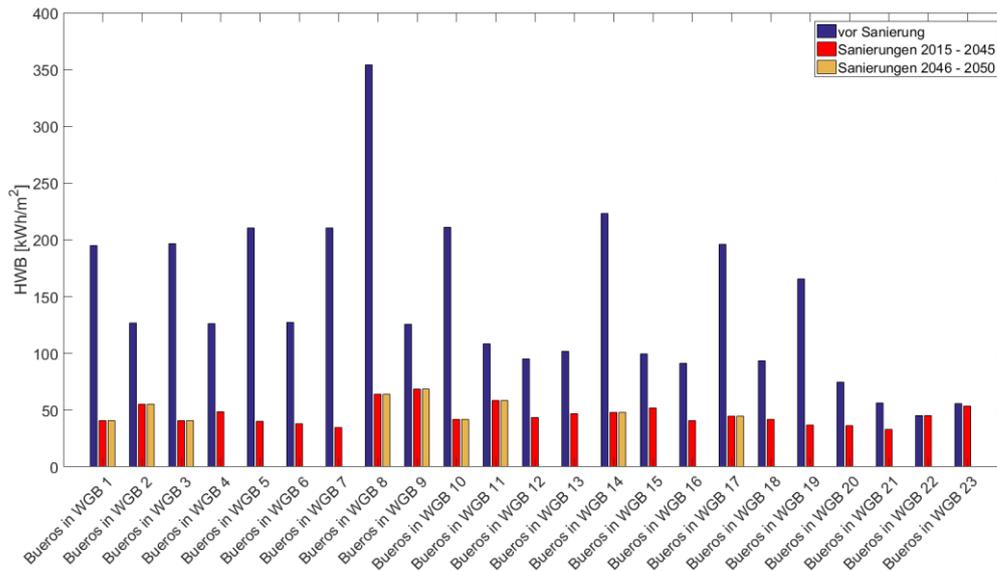


Abbildung 7-1: Heizwärmebedarf der Büros in Wohngebäuden vor einer optimierten Sanierung und mit den optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1

Die Abbildung 7-1 zeigt den resultierenden Heizwärmebedarf nach der ersten und einer möglichen zweiten Sanierung je Gebäudeklasse. Dabei ist gut zu erkennen, dass nur bei einer Gebäudeklasse (Büros in WGB 22) keine Maßnahmen zur Verbesserung der Gebäudehülle getätigt werden. In dieser Gebäudekategorie fällt außerdem noch auf, dass bei den zweiten Sanierungen der Gebäudeklassen nur Instandhaltungsmaßnahmen getätigt werden.

Die größte relative Einsparung kann durch eine optimierte Sanierung bei der Gebäudeklasse Büros in WGB 7 erzielt werden. Bei diesen Büros in Wohngebäuden reduziert sich der Wert des Heizwärmebedarfs um 84%. Der Endenergiebedarf wird durch diese gewählten Maßnahmen von 15 GWh auf 2 GWh gesenkt.

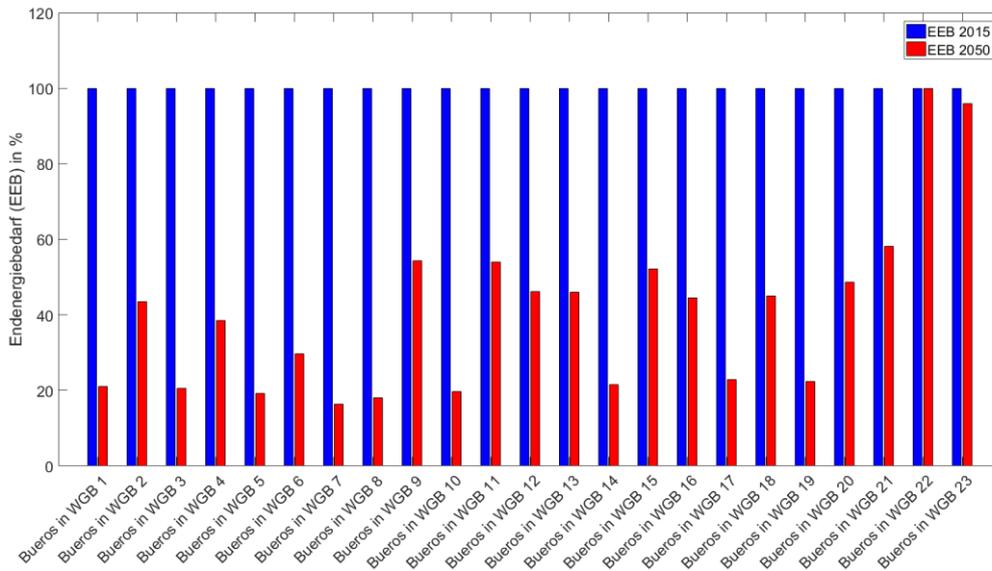


Abbildung 7-2: Relative Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen Büros in Wohngebäuden der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 1.

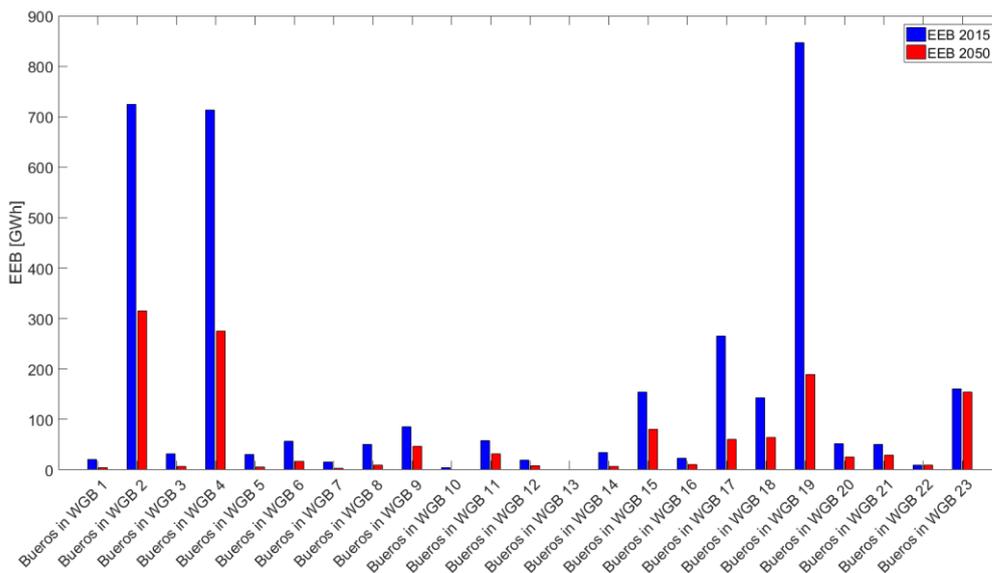


Abbildung 7-3: Absolute Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen Büros in Wohngebäuden der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 1.

Welche Maßnahmen aus ökonomisch optimierter Sicht für die Büros in Wohngebäuden getroffen wurden, zeigen die Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5.

Für die Gebäudeklasse Büros in Wohngebäuden 7 wurde ein Maßnahmenbündel ausgewählt, welches alle vier Gebäudekomponenten saniert. Dabei werden die Gebäudekomponenten Kellerdecke, Dach und Fassade mit einer Wärmedämmung mit den Dämmstoffdicken 160 mm, 100 mm und 160 mm versehen. Die Fenster werden mit Fenstern mit einem U-Wert von 1,3 W/(m<sup>2</sup>K).

Die Gebäudeklasse Büros in Wohngebäuden 2 wird im Betrachtungszeitraum 2-mal saniert. Dabei werden bei der ersten Sanierung Maßnahmen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Fassade getroffen. Durch die Aufbringung einer Wärmedämmung der Dämmstoffdicke von 160 mm bei der Gebäudekomponente Kellerdecke und 120 mm bei der Gebäudekomponente Fassade, reduziert sich der spezifische Heizwärmebedarf um 57% auf 55 kWh/m<sup>2</sup>. Bei der zweiten Sanierung im wird für diese Gebäudeklasse nur das Maßnahmenbündel Instandhaltung ausgewählt, wodurch sich der spezifische Heizwärmebedarf nicht verbessert.

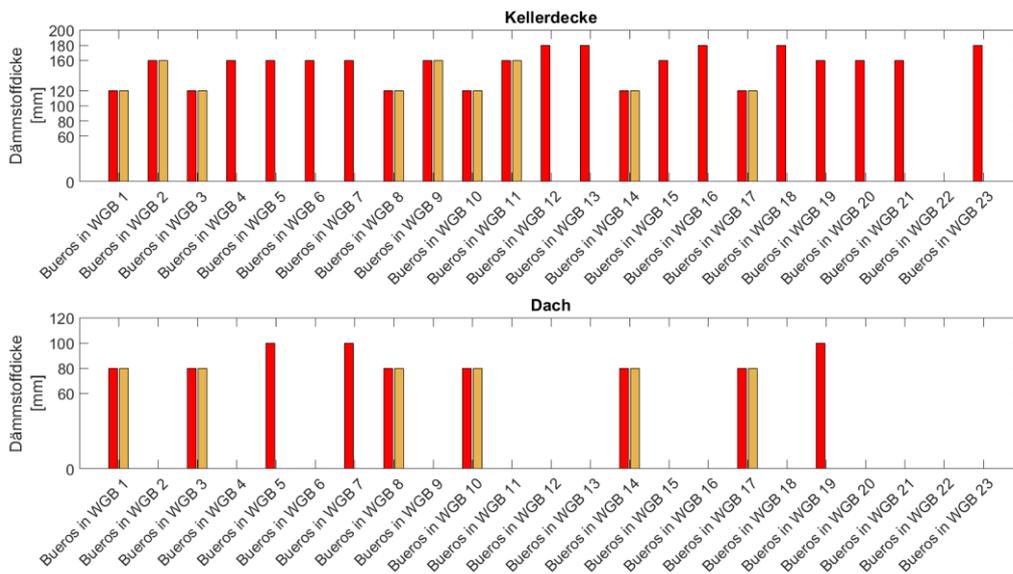


Abbildung 7-4: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Dach der Gebäudeklassen Büros in Wohngebäuden unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1.

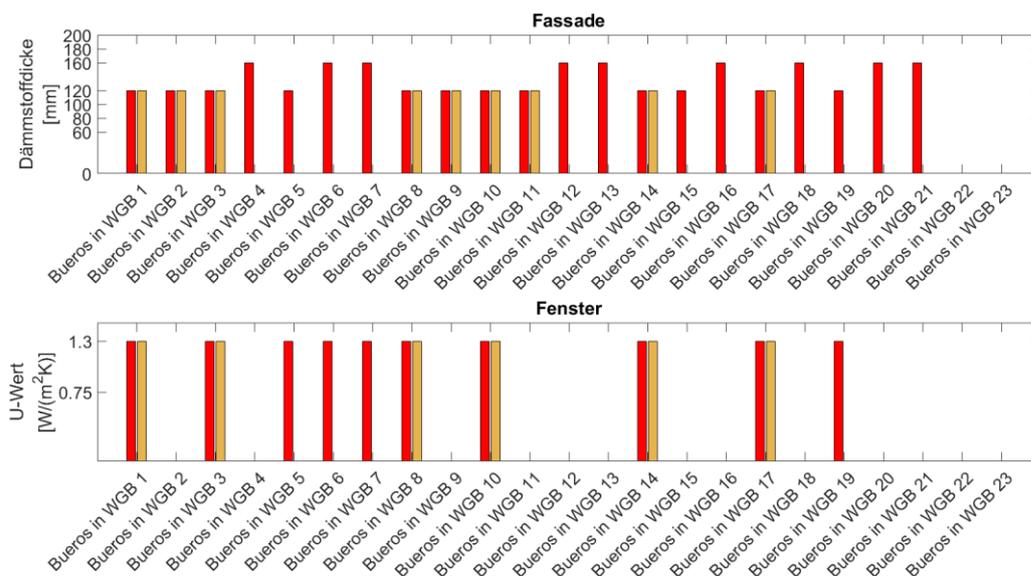


Abbildung 7-5: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Fassade und Fenster der Gebäudeklassen Büros in Wohngebäuden unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1.

Der Wärmebedarf für diese Büros in Wohngebäuden beträgt vor der optimierten Sanierung 3159 GWh. Durch die Sanierungen der Gebäudeklassen wird der Wärmebedarf im Jahr 2050 auf 1203 GWh reduziert.

### 7.1.2 Energieszenario 2

Die Abbildung 7-6 zeigt die Auswirkungen des Energiepreisszenarios 2 auf den spezifischen Heizwärmebedarf der Büros in Wohngebäuden. Durch die konstanten Energiepreise werden weniger ambitioniertere Maßnahmenbündel zur Sanierung dieser Gebäudeklassen ausgewählt.

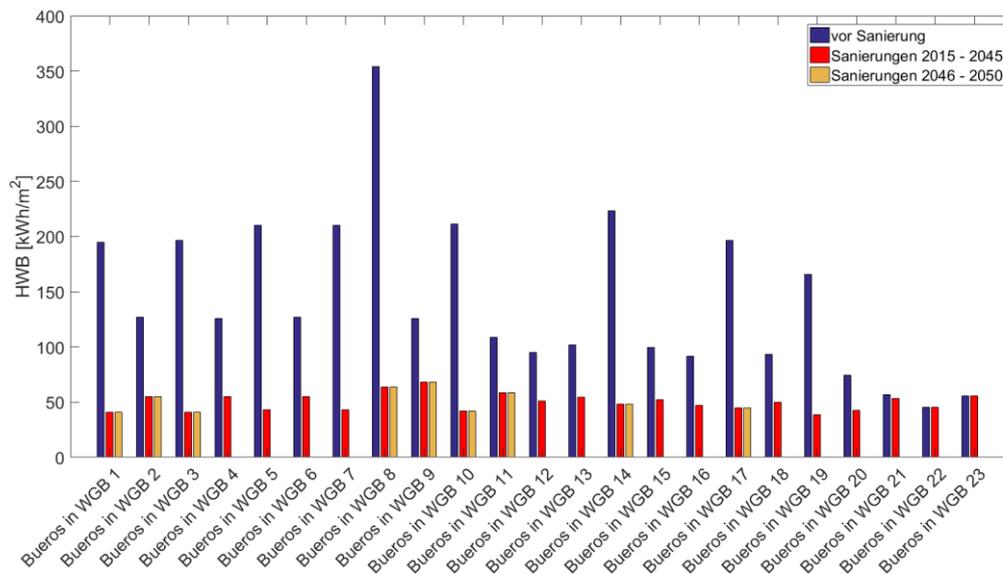


Abbildung 7-6: Heizwärmebedarf der Büros in Wohngebäuden vor einer optimierten Sanierung und mit den optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit konstanten Energiepreisen, Energiepreisszenario 2.

Als Beispiel wird hier die Gebäudeklasse Büros in WGB 21 näherbetrachtet. Durch eine Sanierung kann eine Reduktion des spezifischen Heizwärmebedarfs um 6% erzielt werden. Mit dem Energiepreisszenario 1 konnte als Vergleich bei dieser Gebäudeklasse der spezifische Heizwärmebedarf um 42% reduziert werden.

Der Wärmebedarf für diese Büros in Wohngebäuden beträgt vor der optimierten Sanierung 3159 GWh. Durch die Sanierungen der Gebäudeklassen wird der Wärmebedarf im Jahr 2050 auf 1920 GWh reduziert.

### 7.1.3 Energieszenario 3

Durch die in diesem Energiepreisszenario berücksichtigten hohen Energiepreis der fossilen Energieträger werden auch hier ambitioniertere Maßnahmenbündel zur Sanierung der Gebäudehülle getroffen.

Abbildung 7-7 zeigt die Ergebnisse des Optimierungsmodells anhand des spezifischen Heizwärmebedarfs der Gebäudeklassen Büros in Wohngebäuden.

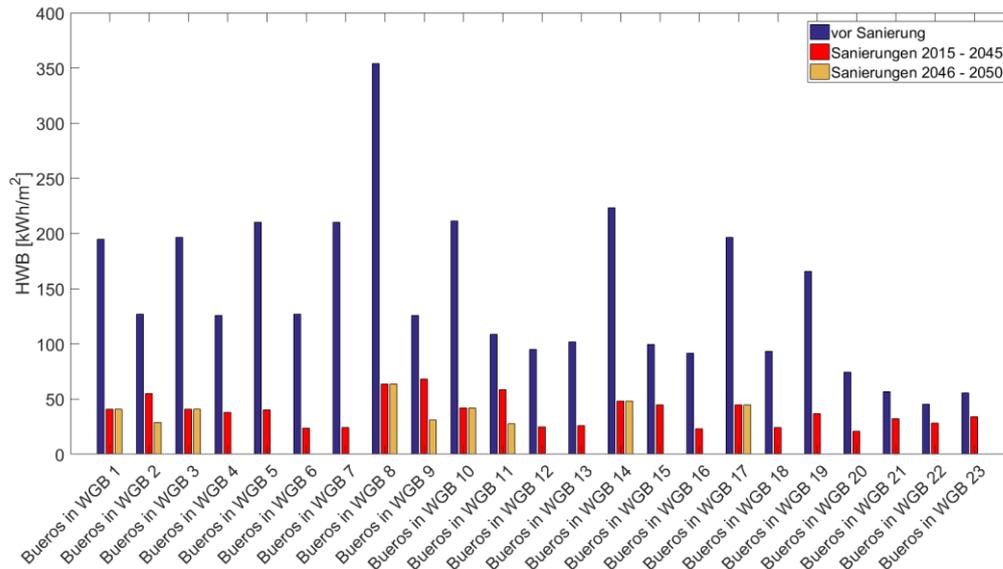


Abbildung 7-7: Heizwärmebedarf der Büros in Wohngebäuden vor einer optimierten Sanierung und mit den optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 3.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen des Energiepreisszenario 1, werden hier die Gebäudeklassen Büros in Wohngebäuden 2, 9 und 11 bei der zweiten Sanierung mit Maßnahmen saniert, die eine Verbesserung der Gebäudehülle erzielen.

Die Gebäudeklasse Büros in Wohngebäuden 2, wird bei der ersten Sanierung, das selbe Maßnahmenbündel ausgewählt, wie beim Energiepreisszenario 1. Dabei kann der spezifische Heizwärmebedarf um 57% gesenkt werden. Bei der zweiten Sanierung wird aber ein viel ambitioniertestes Maßnahmenbündel ausgewählt. Diese Gebäudeklasse kann seinen Heizwärmebedarf von 127 kWh/m<sup>2</sup> durch das gewählte Maßnahmenbündel der ersten Sanierung auf 55 kWh/m<sup>2</sup> und durch das gewählte Maßnahmenbündel der zweiten Sanierung auf 29 kWh/m<sup>2</sup> senken. Mit dem Energiepreisszenario 1 kann der Heizwärmebedarf nur auf 55 kWh/m<sup>2</sup> reduziert werden.

In Abbildung 7-8 und Abbildung 7-9 wird der Endenergiebedarf der Gebäudeklassen Büros in Wohngebäuden der Jahre 2015 und 2050 in relativen und absoluten Zahlen dargestellt. Dabei hat die Gebäudeklasse Büros in WGB 7 die größte relative Einsparung des Endenergiebedarfs. Hier kann der Endenergiebedarf durch die ökonomisch optimierten Sanierungen um rund 88% gesenkt werden. In absoluten Zahlen bewirkt diese Einsparung zum Gesamtendenergiebedarf dieser Gebäudekategorie wenig. Da hier der Endenergiebedarf nur von 15 GWh auf 2 GWh reduziert wird. Die Gebäudeklasse Büros in WGB 2 kann seinen Endenergiebedarf durch die getroffenen Maßnahmenbündel in absoluten Zahlen von 725 GWh auf 165 GWh reduzieren.

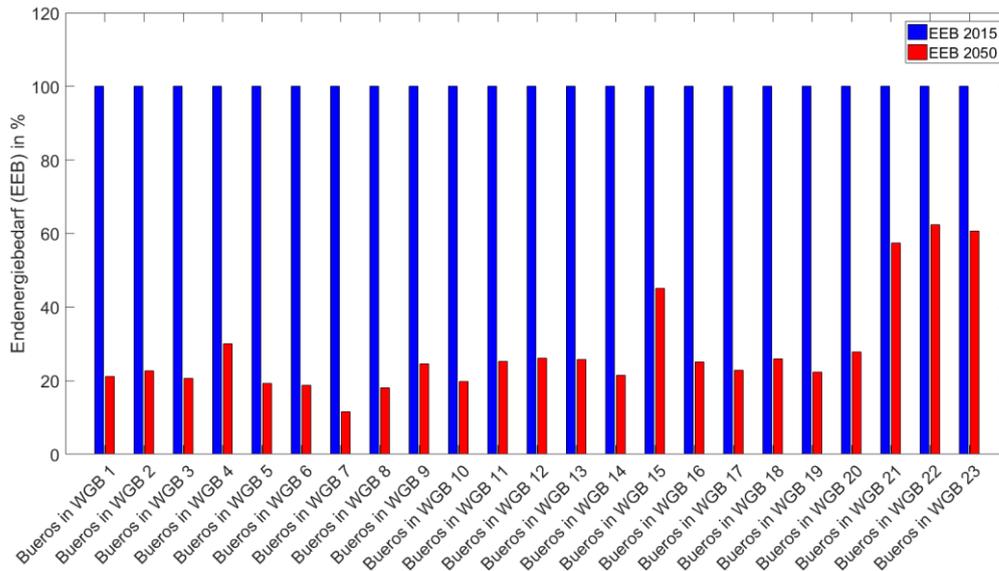


Abbildung 7-8: Relative Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen Büros in Wohngebäuden der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 3.

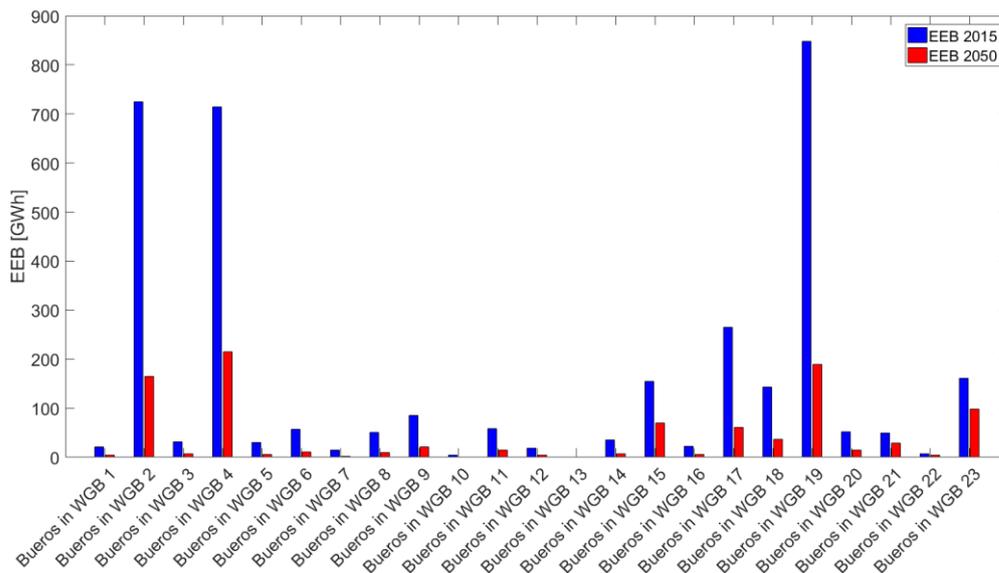


Abbildung 7-9: Absolute Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen Büros in Wohngebäuden der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario 3.

Die Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11 zeigen für jede Gebäudeklasse die getroffenen Sanierungstiefen je Gebäudekomponente. Bei der Gebäudeklasse Büros in WGB 2 werden bei der ersten Sanierung nur Maßnahmen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Fassade getroffen. Die Kellerdecke wird mit einer Wärmedämmung der Dämmstoffdicke von 160 mm saniert. Die Fassade wird mit einer Wärmedämmung der Dämmstoffdicke von 120 mm saniert. Dies führt zu einer Reduktion des Heizwärmebedarfs von 127 kWh/m<sup>2</sup> auf 55 kWh/m<sup>2</sup>. Durch das gewählte Maßnahmenbündel der zweiten Sanierung kann der Heizwärmebedarf auf 29 kWh/m<sup>2</sup> reduziert werden. Dabei wird die Gebäudekomponente Kellerdecke mit weiteren 20 mm gedämmt und hat damit eine Wärmedämmung

der Dicke von 180 mm. Die Gebäudekomponente Fassade wird mit weiteren 40 mm gedämmt und erreicht damit eine Dicke der Wärmedämmung von 160 mm. Durch die zweite Sanierung werden die alten Fenster mit neuen Fenstern getauscht. Dabei verbessert sich der U-Wert auf 0,75 W/(m<sup>2</sup>K).

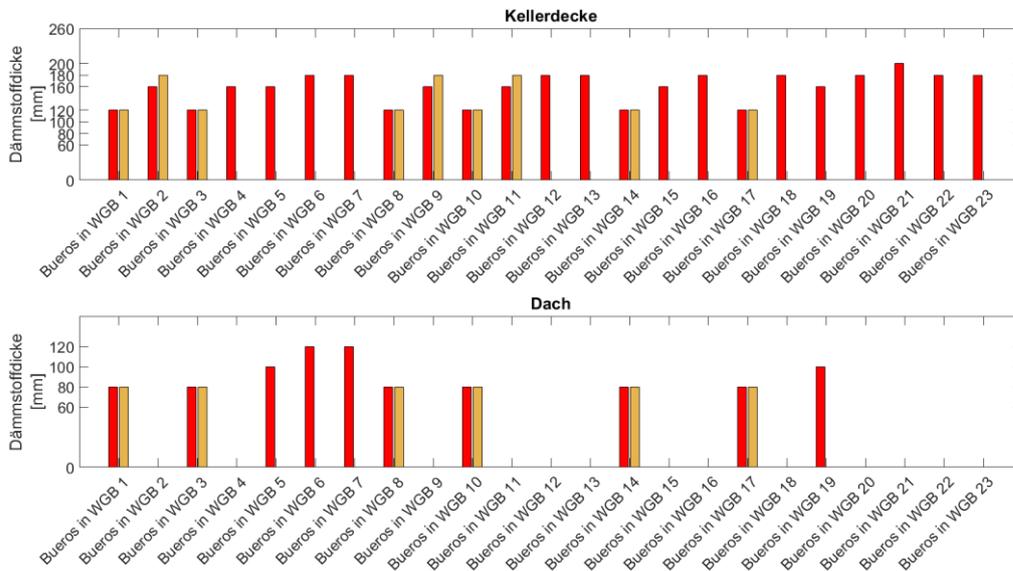


Abbildung 7-10: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Dach der Gebäudeklassen Büros in Wohngebäuden, Energiepreisszenario 3.

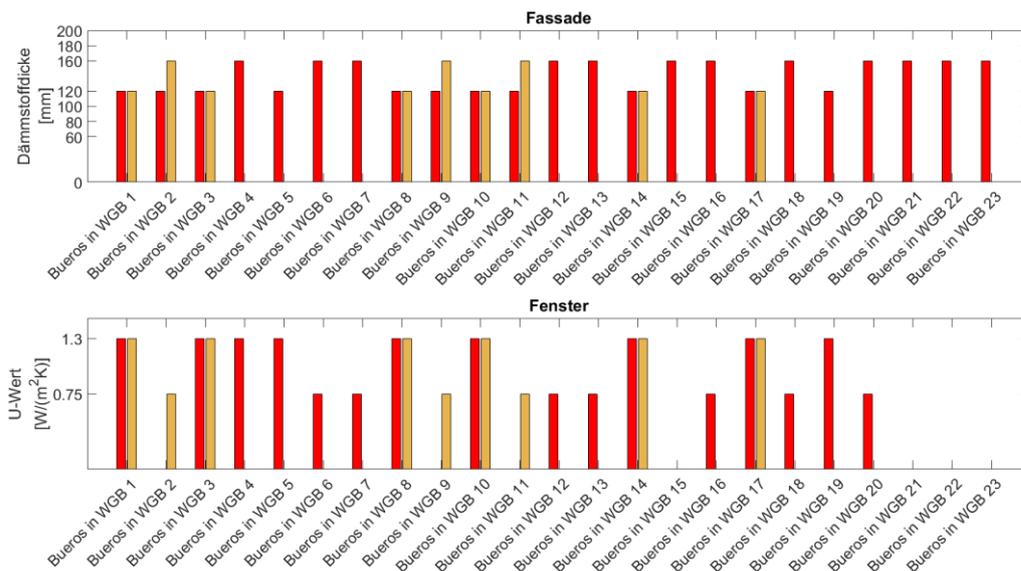


Abbildung 7-11: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Fassade und Fenster der Gebäudeklassen Büros in Wohngebäuden, Energiepreisszenario 3.

Der Wärmebedarf für diese Gebäudekategorie beträgt vor der optimierten Sanierung 3159 GWh. Nach der ersten Sanierung dieser Gebäudeklassen kann der Wärmebedarf auf 1039 GWh reduziert werden. Bis zum Jahr 2050, das heißt die zweiten Sanierungen einiger Gebäudeklassen werden berücksichtigt, kann der Wärmebedarf der Gebäudekategorie Büros in Wohngebäuden auf 867 GWh reduziert werden.

## 7.2 Einfluss von Energiepreisszenarien auf die Wärmebedarfsentwicklung der Gebäudekategorie Bürogebäude

In Tabelle 25 sind alle Gebäudeklassen der Gebäudekategorien kleine Bürogebäude und große Bürogebäude mit allen wichtigen Daten, wie Bezeichnung, Anzahl der Gebäude, Bauperiode, Zeitraum einer schon erfolgten Sanierung und der spezifische Heizwärmebedarf aufgelistet.

*Tabelle 25: Auflistung der Bürogebäude mit deren Daten*

	<b>Anzahl der Gebäude</b>	<b>Bauperiode</b>	<b>Zeitraum vorheriger Sanierung</b>	<b>HWB [kWh/m<sup>2</sup>]</b>
BG groß 1	2	1890 - 1918	1890 - 1918	139.93
BG groß 2	310	1890 - 1918	1832 – 1952	83.60
BG groß 3	13	1890 - 1918	1932 - 1952	130.01
BG groß 4	308	1890 - 1918	1975 - 1995	73.35
BG groß5	15	1890 - 1918	1975 - 1995	147.78
BG groß 6	83	1890 - 1918	2000 - 2008	79.97
BG groß 7	19	1890 - 1918	2000 - 2008	134.19
BG groß 8	65	1919 - 1944	1956 - 1976	73.25
BG groß 9	1	1919 - 1944	1960 – 1980	191.73
BG groß 10	16	1919 - 1944	1961 – 1981	85.58
BG groß 11	4	1919 - 1944	1991 - 2008	84.90
BG groß 12	2	1945 - 1965	1945 - 1965	85.42
BG groß 13	93	1945 - 1965	1975 - 1995	63.59
BG groß 14	4	1945 - 1965	2000 - 2008	70.36
BG groß 15	50	1966 - 1979	1966 - 1979	79.24
BG groß 16	95	1966 - 1979	1991 - 2008	33.71
BG groß 17	378	1980 - 1992	1980 – 1992	70.66
BG groß 18	21	1980 - 1992	2000 - 2008	23.84
BG groß 19	15	1993 - 2002	1993 - 2008	21.31
BG groß 20	8	2003 - 2006	2003 - 2006	22.39
BG groß 21	237	2006 - 2008	2006 - 2008	25.87
BG klein 1	1	1890 - 1918	1890 - 1918	141.90
BG klein 2	503	1890 - 1918	1832 – 1952	159.02
BG klein 3	18	1890 - 1918	1932 - 1952	257.20
BG klein 4	501	1890 - 1918	1975 - 1995	165.42
BG klein5	18	1890 - 1918	1975 - 1995	227.97
BG klein 6	88	1890 - 1918	2000 - 2008	154.99
BG klein 7	55	1890 - 1918	2000 - 2008	250.27
BG klein 8	78	1919 - 1944	1919 - 1944	315.85
BG klein 9	403	1919 - 1944	1956 – 1976	194.06

BG klein 10	2	1919 - 1944	1960 – 1980	355.05
BG klein 11	260	1919 - 1944	1961 – 1981	197.09
BG klein 12	109	1919 - 1944	1991 - 2008	191.25
BG klein 13	27	1945 - 1965	1945 - 1965	287.68
BG klein 14	432	1945 - 1965	1975 – 1995	146.91
BG klein 15	58	1945 - 1965	2000 – 2008	137.08
BG klein 16	203	1966 - 1979	1966 – 1979	277.17
BG klein 17	296	1966 - 1979	1991 – 2008	143.11
BG klein 18	1403	1980 - 1992	1980 – 1992	232.87
BG klein 19	126	1980 - 1992	2000 – 2008	131.48
BG klein 20	122	1993 – 2002	1993 – 2008	92.47
BG klein 21	6	2003 - 2006	2003 - 2006	61.13
BG klein 22	1255	2006 – 2008	2006 – 2008	97.03

### 7.2.1 Energieszenario 1

In Abbildung 7-12 sind die Auswirkungen des Optimierungsmodells auf den spezifischen Heizwärmebedarf dargestellt, welche sich durch die Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1 ergeben. Dabei ist zu erkennen, dass eine Verminderung des Heizwärmebedarfs bei einigen Gebäudeklassen um knappe 84% möglich ist.

Alle Gebäudeklassen der Gebäudekategorien kleines und großes Bürogebäude werden bei der ersten Sanierung unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenarios 1 mit Maßnahmen saniert, die die thermische Qualität der Gebäudehülle verbessern und den spezifischen Heizwärmebedarf verringern.

Bei den Gebäuden die ein zweites Mal saniert werden, ist es nicht bei allen Gebäudeklassen ökonomisch sinnvoll in weitere Maßnahmen, die den Heizwärmebedarf verringern, zu investieren.

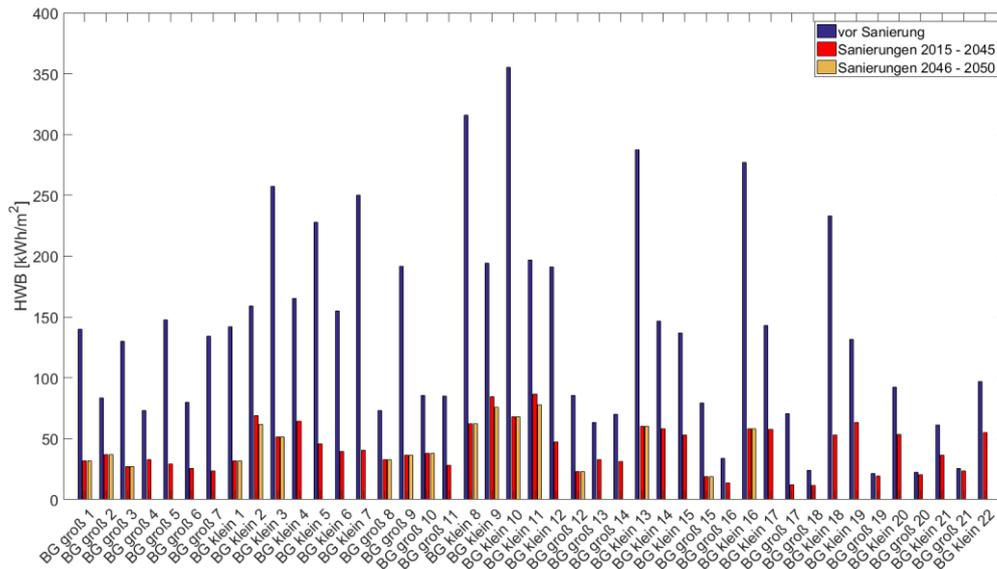


Abbildung 7-12: Heizwärmebedarf der Büros in Wohngebäuden vor einer optimierten Sanierung und mit den optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1

Die größte Einsparung im Jahr 2050 bezogen auf den Ausgangswert des Endenergiebedarfs kann beim kleinen Bürogebäude BG klein 7 erzielt werden, in Abbildung 7-13 zu sehen. In absoluten Zahlen, ist aufgrund der geringen Anzahl der Gebäude der Anteil, den das Bürogebäude BG klein 7 mit seiner Einsparung zum Gesamtendenergiebedarf beiträgt gering, in Abbildung 7-14.

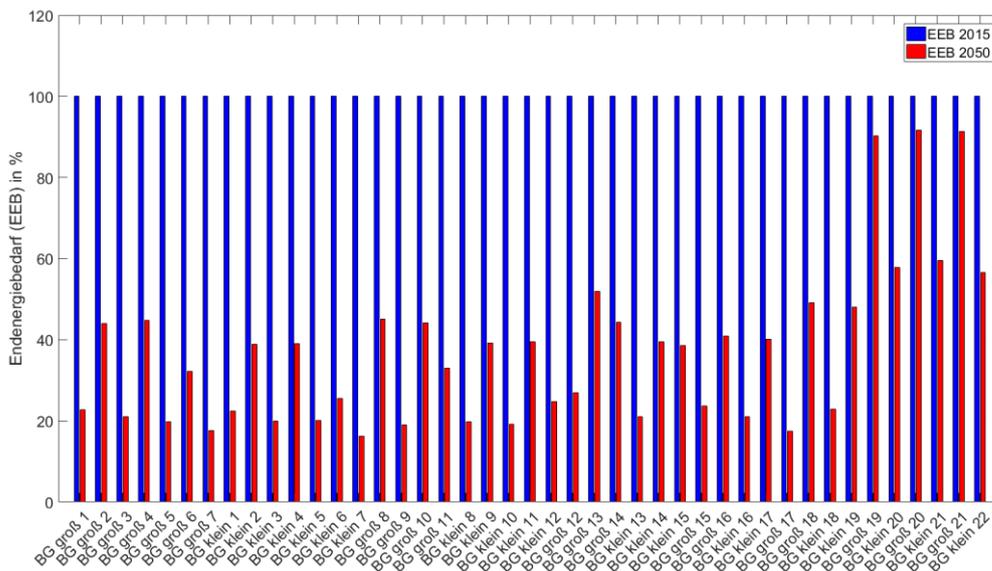


Abbildung 7-13: Relative Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen kleine und große Bürogebäude der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1.

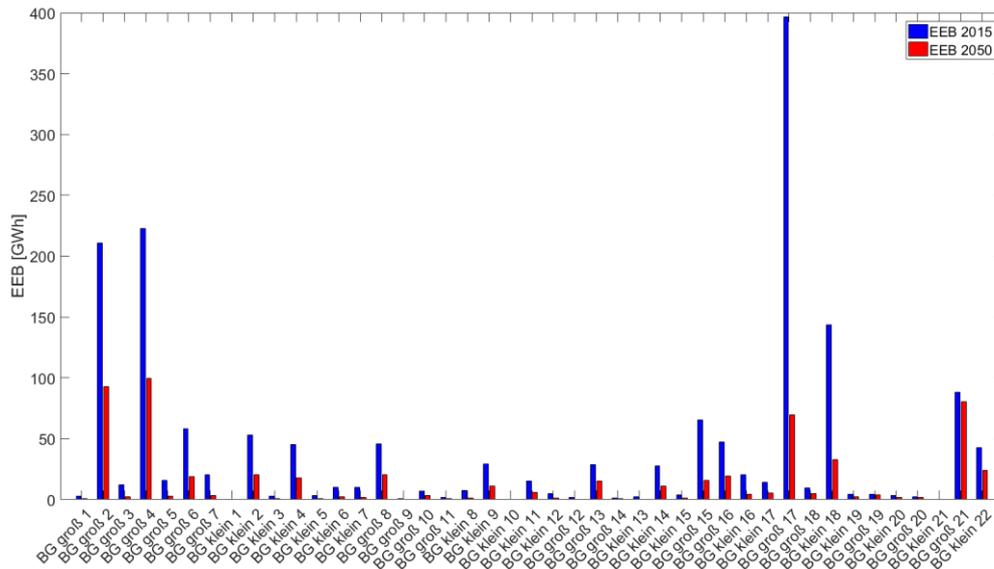


Abbildung 7-14: Absolute Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen kleine und große Bürogebäude der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich unter der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 1.

Den höchsten Wert des Endenergiebedarfs im Jahr 2015 liefert das Bürogebäude BG groß 17 mit 397 GWh. Durch die ökonomisch optimierte Sanierung kann hier der Endenergiebedarf um 83% auf 69 GWh reduziert werden.

Für jede Gebäudeklasse sind die Maßnahmen je Gebäudekomponente in Abbildung 7-15 und Abbildung 7-16 angegeben.

Um auf die Reduktion des Endenergiebedarfs des Bürogebäudes BG groß 17 zu kommen, wurde eine Wärmedämmung mit der Dämmstoffdicke 180 mm an der Gebäudekomponente Kellerdecke angebracht. Die Gebäudekomponente Dach wurde mit einer Dämmstoffdicke von 100 mm saniert. Bei der Gebäudekomponente Fassade wird eine Wärmedämmung mit der Dämmstoffdicke von 120 mm berücksichtigt. Die Gebäudekomponente Fenster wurde mit Fenstern mit einem U-Wert von 1,3 W/(m<sup>2</sup>K) erneuert.

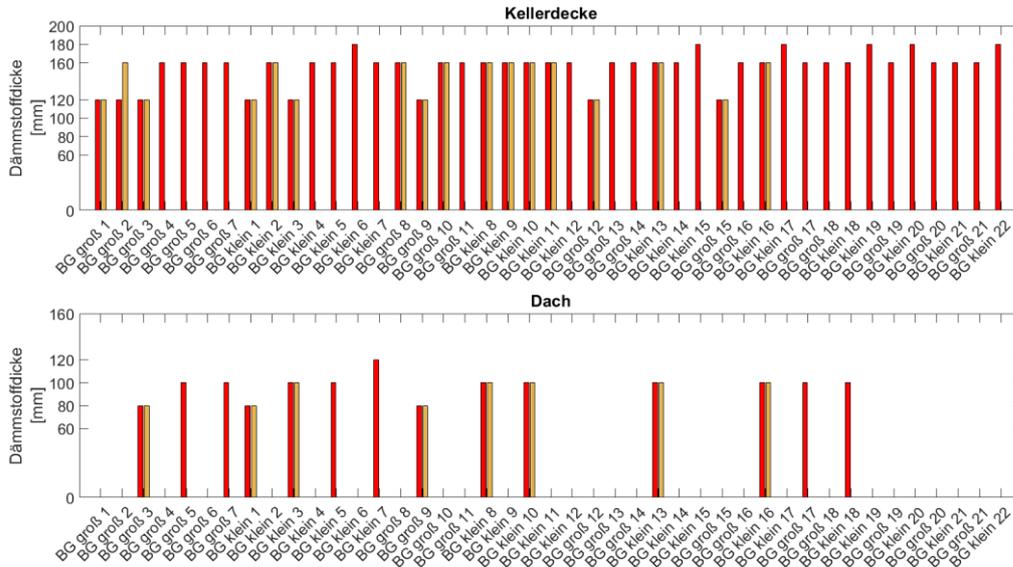


Abbildung 7-15: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Dach der Gebäudeklassen kleine und große Bürogebäude, Energiepreisszenario 1.

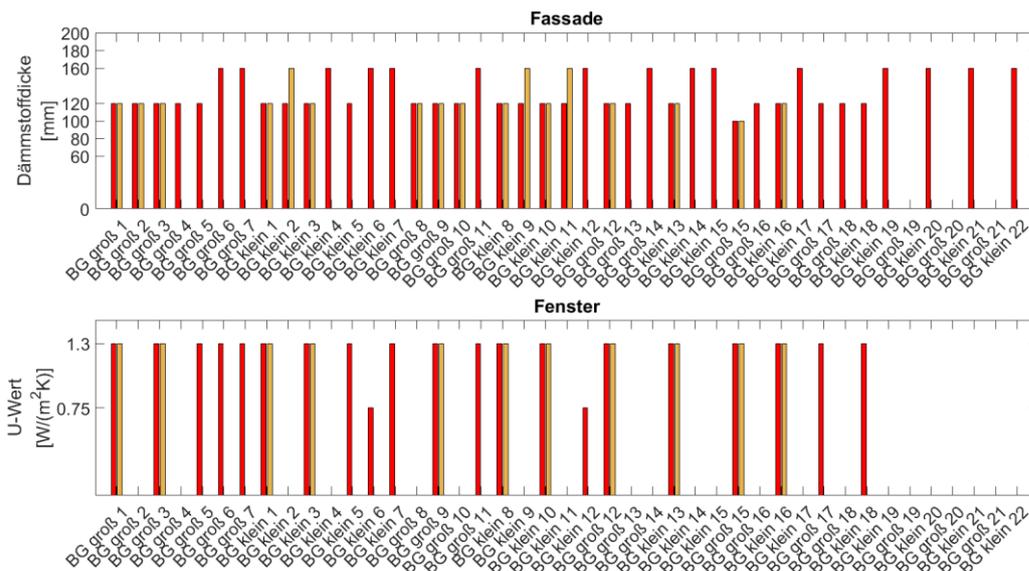


Abbildung 7-16: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Fassade und Fenster der Gebäudeklassen kleine und große Bürogebäude, Energiepreisszenario1.

Auch hier ist zu erkennen, dass bei allen Gebäudeklassen die Gebäudekomponente Kellerdecke saniert wird. Dies wird durch die niedrigen Investitionskosten pro eingesparter kWh des Wärmebedarfs begründet. Auch die Gebäudekomponente Fassade wird bei fast allen Gebäudeklassen, aufgrund der niedrigen Investitionskosten pro eingesparter kWh an Wärmebedarf, saniert. Durch die hohen Investitionskosten der Maßnahmen der Gebäudekomponenten Dach und Fenster pro eingesparter kWh an Wärmebedarf werden diese Gebäudekomponenten nicht bei allen Gebäudeklassen saniert.

## 7.2.2 Energieszenario 2

Um zu zeigen welche Auswirkungen die Energiepreise auf die ökonomisch optimierten Maßnahmenbündel haben, wurde für einen Modelldurchlauf angenommen, dass sich die Energiepreise während des gesamten Betrachtungszeitraum auf dem Stand von 2015 bleiben.

Durch die konstanten Energiepreise werden folgende Auswirkungen auf den spezifischen Heizwärmebedarf der Bürogebäude wirksam, zu sehen in Abbildung 7-17.

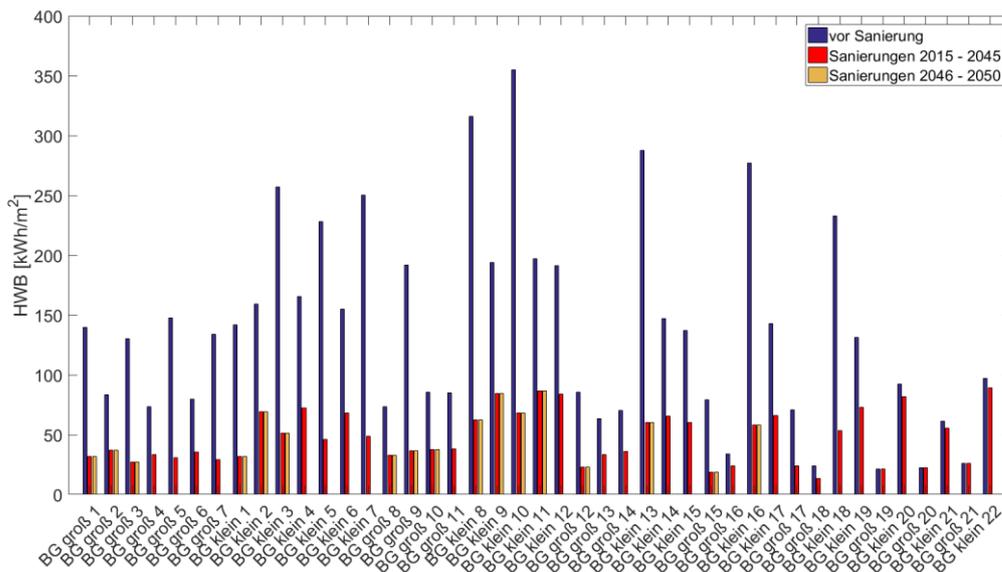


Abbildung 7-17: Heizwärmebedarf der Bürogebäude vor einer optimierten Sanierung und mit den ökonomisch optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit konstanten Energiepreisen, Energiepreisszenario 2.

Für all jene Bürogebäude die 2015 saniert werden, ändert sich der resultierende Heizwärmebedarf im Vergleich zu den Ergebnissen des Energiepreisszenarios 1 nicht, da ja die Energiepreise für das Jahr 2015 in allen drei Energiepreisszenarios gleich sind. Für alle anderen Bürogebäude deren Renovierungszeitpunkte nach 2015 fallen, werden hier weniger ambitioniertere Maßnahmen ausgewählt, wodurch sich der spezifische Heizwärmebedarf im Gegensatz zum Energiepreisszenario 1 weniger reduziert. Als Beispiel wird hier das Bürogebäude BG groß 6 näher betrachtet. Als Ergebnis der Optimierung mit konstanten Energiepreisen wird hier von ursprünglichen 80 kWh/m<sup>2</sup> durch eine Sanierung ein Heizwärmebedarf von 36 kWh/m<sup>2</sup> erzielt. Dies entspricht einer Reduktion des Heizwärmebedarfs um 55%. Im Vergleich dazu wird mit dem Energiepreisszenario 1 der Heizwärmebedarf des Bürogebäudes um 68% auf 26 kWh/m<sup>2</sup> verringert. Durch die konstanten Energiepreise sind aus ökonomischer Sicht keine Anreize gegeben in eine ambitioniertere Maßnahme zu treffen.

Außerdem ist in dieser Abbildung gut zu erkennen, dass für jene Bürogebäude, die im Betrachtungszeitraum 2-mal saniert werden, jeweils nur die Instandhaltungsmaßnahmen gewählt werden. Durch die konstante Energiepreisentwicklung sind die laufenden Energiekosten zu gering um Investitionen in die Gebäudehülle zu tätigen.

### 7.2.3 Energieszenario 3

Bei diesem Modelldurchlauf werden die hohen Energiepreise der fossilen Energieträger berücksichtigt. Durch die hohen Energiepreise der fossilen Energieträger werden im Vergleich zum Energiepreisszenario 1, ambitioniertere Maßnahmen zur Sanierung der Gebäudehülle erwartet. Da es durch die höheren Energiepreise Sinn macht, eine größere Reduktion des Heizwärmebedarfs durch eine Sanierung zu erzielen. In Abbildung 7-18 sind die Resultate des Optimierungsmodells anhand des Heizwärmebedarfs dargestellt.

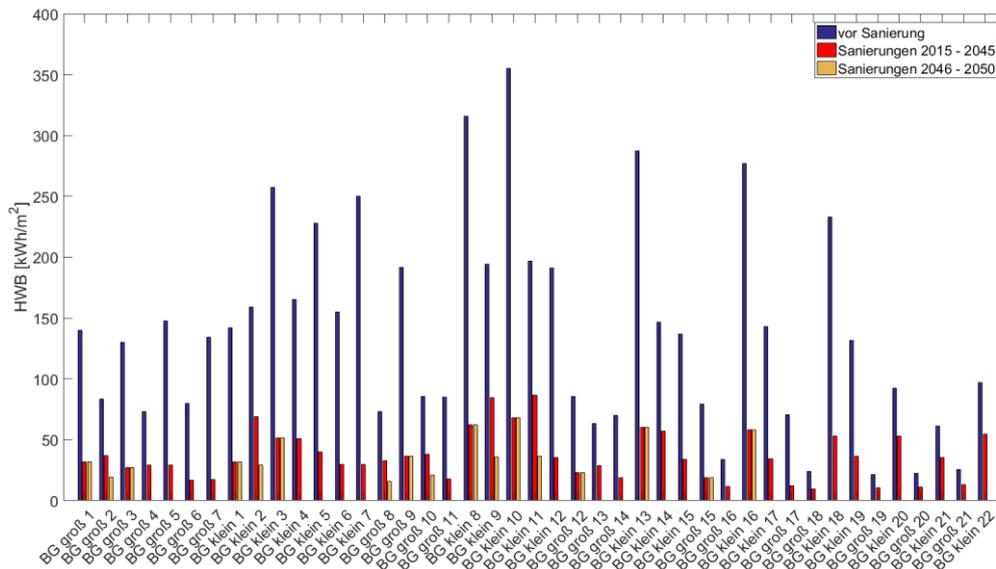


Abbildung 7-18 : Heizwärmebedarf der Bürogebäude vor einer optimierten Sanierung und mit den ökonomisch optimierten Sanierungen im Betrachtungszeitraum 2015-2050, als Ergebnis des Optimierungsmodells mit der Berücksichtigung des Energiepreisszenario 3.

Abbildung 7-19 und Abbildung 7-20 zeigen den Endenergiebedarf der Jahre 2015 und 2050 in relativen und absoluten Zahlen. Beim Bürogebäude BG klein 7 tritt, wie auch beim Energiepreisszenario 1, die größte relative Einsparung des Endenergiebedarfs im Vergleich auf. Bei diesem Bürogebäude kann der Endenergiebedarf durch die ökonomisch optimierte Sanierung um 84% gesenkt werden. In absoluten Zahlen wird der Endenergiebedarf dieser Gebäudeklasse Bürogebäude von 1688 GWh auf 457 GWh durch die ökonomisch optimierte Sanierung reduziert.

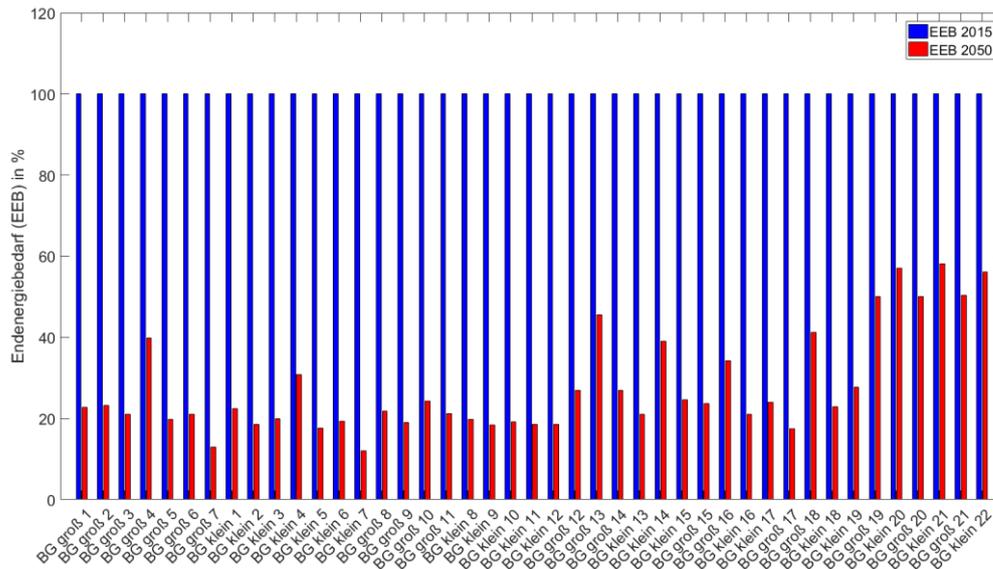


Abbildung 7-19: Relative Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen kleine und große Bürogebäude der Jahre 2015 und 2050 im Vergleich, Energiepreisszenario3.

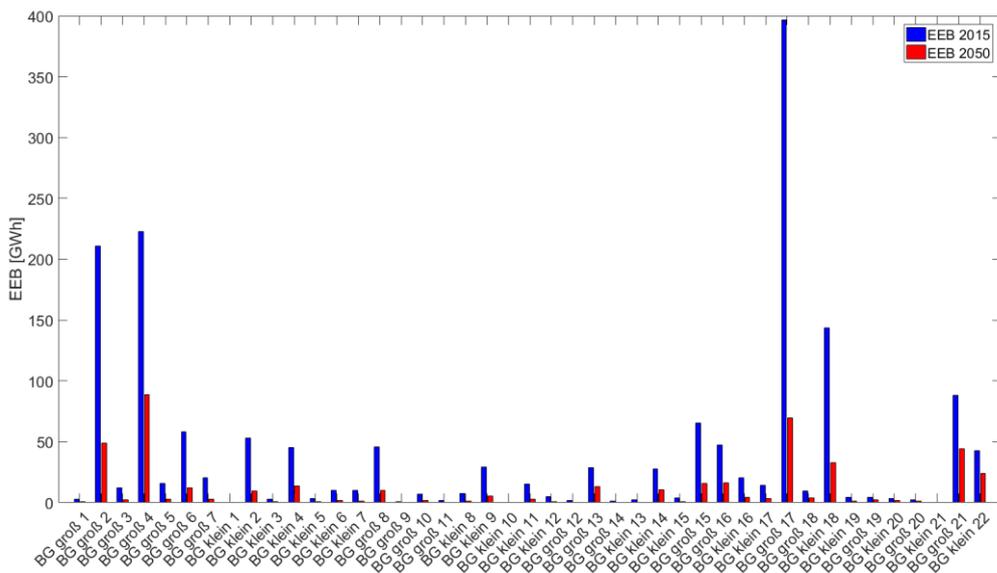


Abbildung 7-20: Absolute Einsparungen des Endenergiebedarfs der Gebäudeklassen kleine und große Bürogebäude der Jahre 2015 und 2050, Energiepreisszenario3.

Die ökonomisch optimierten Sanierungstiefen je Gebäudekomponente und Gebäudeklasse sind in Abbildung 7-21 und Abbildung 7-22 zu sehen. Um die Einsparung des Endenergiebedarfs des Bürogebäudes BG groß 7 zu erzielen wurden folgende Sanierungstiefen ausgewählt.

Die Kellerdecke wird mit einer Wärmedämmung der Dämmstoffdicke von 180 mm saniert. Die Gebäudekomponente Dach wird mit einer Wärmedämmung der Dämmstoffdicke von 120 mm saniert. Bei der Gebäudekomponente Fassade wird eine Wärmedämmung mit der Dämmstoffdicke von 160 mm berücksichtigt. Die Gebäudekomponente Fenster wurde mit Fenstern mit einem U-Wert von 0,75 W/(m<sup>2</sup>K) erneuert. Im Vergleich zu den Ergebnissen unter Berücksichtigung des

Energiepreisszenario 1, wird bei der Gebäudekomponente Kellerdecke und Dach jeweils 20 mm mehr an Dämmstoffdicke beim Energiepreisszenario 3 ausgewählt. Durch die hohen Preise der fossilen Energieträger wird für diese Gebäudeklasse im Gegensatz zum Energiepreisszenario 1, die ambitionierteste Sanierungsmaßnahme der Fenster gewählt.

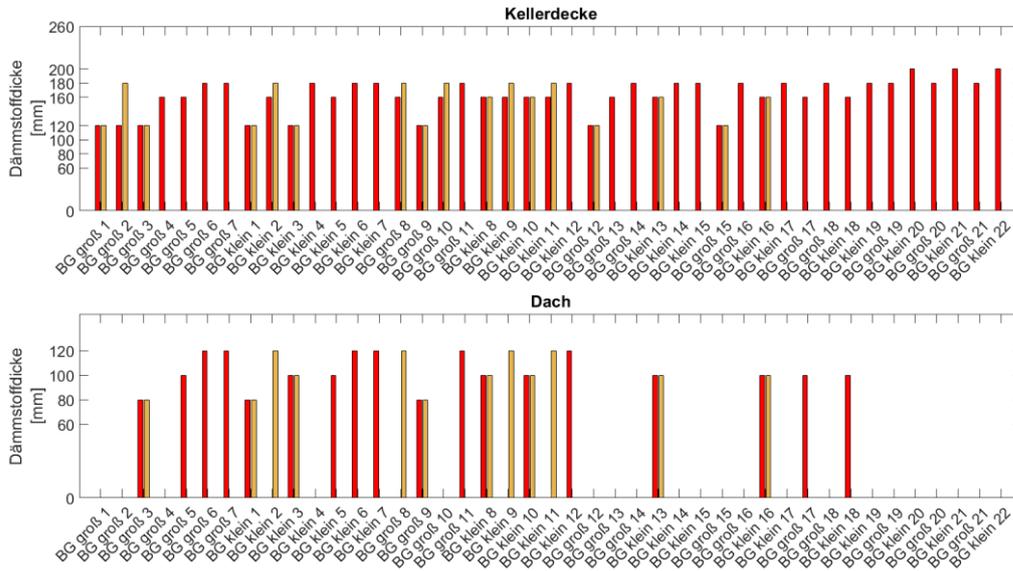


Abbildung 7-21: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Kellerdecke und Dach der Gebäudeklassen kleines und großes Bürogebäude, Energiepreisszenario 3.

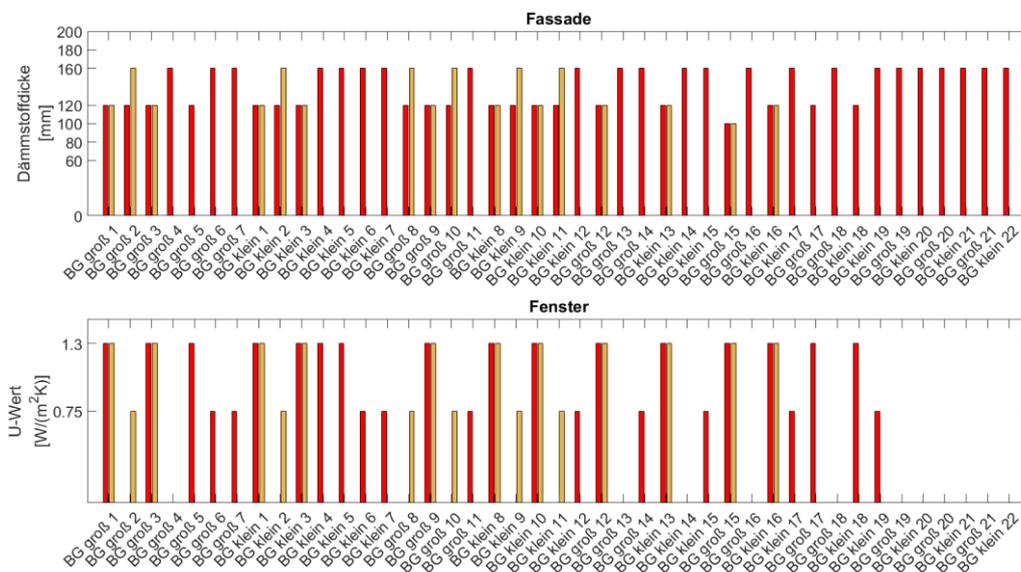


Abbildung 7-22: Resultierende Sanierungstiefen der Gebäudekomponenten Fassade und Fenster der Gebäudeklassen kleine und große Bürogebäude, Energiepreisszenario 3.

## Literaturverzeichnis

- [1] European Commission, „Buildings-European Commission,“ [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>. [Zugriff am 28 01 2018].
- [2] The Buildings Performance Institute Europe - BPIE, „www.bpie.eu,“ 2010. [Online]. Available: <http://bpie.eu/publication/cost-optimality-in-building-renovations/>. [Zugriff am 26 01 2018].
- [3] European Commission, [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_de). [Zugriff am 26 01 2018].
- [4] Statistik Austria, [Online]. Available: [https://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/energie\\_umwelt\\_innovation\\_mobilitaet/energie\\_und\\_umwelt/energie/nutzenergieanalyse/index.html](https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/nutzenergieanalyse/index.html). [Zugriff am 26 01 2018].
- [5] W. Energie, „wien.gv.at,“ [Online]. Available: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/pdf/energieflussbild-2015.pdf>. [Zugriff am 26 01 2018].
- [6] S. Fritz, *Economic Assessment of the Long-Term Development of Buildings' Heat Demand and Grid-Bound Supply*, Wien: Technische Universität Wien, 2016.
- [7] BDW, „Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort,“ [Online]. Available: [https://www.bmdw.gv.at/Ministerium/Staatspreise/Documents/energiestrategie\\_oesterreich.pdf](https://www.bmdw.gv.at/Ministerium/Staatspreise/Documents/energiestrategie_oesterreich.pdf). [Zugriff am 26 01 2018].
- [8] E. Stocker und D. Koch, „Cost-Effective Refurbishment of Residential Buildings in Austria,“ in *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting*, 2017, pp. 489-513.
- [9] J. Steinbach und F. Schultmann, „Sanierung des deutschen Gebäudebestandes auf unterschiedliche Effizienzstandards-gesamtwirtschaftliche Investitionen und Energieeinsparungen,“ in *Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*, Wien, 2015.
- [10] A. Kylili und P. Fokaides, „Methodologies for Selection of Thermal Insulation Materials for Cost-Effective, Sustainable, and Energy-Efficient Retrofitting,“ in *Cost-Effective Energy-Efficient Building Retrofitting*, 2017, pp. 23-55.
- [11] A. Müller, *Energy Demand Assessment for Space Conditioning and Domestic Hot Water: A Case Study for the Austrian Building Stock*, Wien: Technische Universität Wien, 2015.

- [12] M. Amtmann, T. Barth, M. Mitterndorfer und G. Simader, „Austrian Energy Agency,“ 10 2011. [Online]. Available: <https://www.energyagency.at/fileadmin/dam/pdf/projekte/gebäude/VoekSan-ExecutiveSummary.pdf>. [Zugriff am 25 02 2018].
- [13] W. Eicke-Hennig, „Kleine Geschichte der Dämmstoffe, Zweiter Teil,“ *Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brand*, 2011.
- [14] E. Hinz, *Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten*, Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt, 2015.
- [15] Statistik Austria, „Jahresdurchschnittspreise und -steuern für die wichtigsten Energieträger,“ 07 2015. [Online]. Available: [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/energie\\_umwelt\\_innovation\\_mobilitaet/energie\\_und\\_umwelt/energie/preise\\_steuern/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/preise_steuern/index.html). [Zugriff am 25 02 2018].
- [16] N. Rab und C. Winkler, *Szenarien für exogene Einflussfaktoren*, Wien: urbem.tuwien.ac.at, 2015.
- [17] R. Haas, *Wirtschaftliche und Ökologische Optimierung der Heizenergieversorgung - Vorlesungsunterlagen*, Wien: Haas, Reinhard, 2016/2017.
- [18] I. T. Reitmair, „heizkostenrechner.eu,“ [Online]. Available: <http://heizkostenrechner.eu/jahresnutzungsgrad-heizung.html>. [Zugriff am 07 02 2018].
- [19] Technische Universität Wien, *Invert/EE-Lab*, Wien: TU Wien, 2015.