

## **DISSERTATION**

# **Modellierung der Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im österreichischen Wohngebäudebestand unter der Annahme verschiedener Optimierungsziele**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Reinhard Haas  
E373  
Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Dipl.-Ing. Ernst Schriefl  
Matrikelnr.: 8726382  
Benedikt-Schellinger-Gasse 21/40  
1150 Wien

Wien, im Februar 2007



## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie sich Treibhausgasemissionen, Energieverbrauch und Technologiewahl im Bereich Raumheizung und Warmwasserbereitung für existierende Wohngebäude in Österreich bis zum Jahr 2020 entwickeln könnten unter der Annahme, dass entweder

- monetäre Kosten
- soziale Kosten (= Summe von monetären und externen Kosten)
- Treibhausgasemissionen
- Energieverbrauch

unter bestimmten beschränkenden Rahmenbedingungen eines Referenz-Szenarios minimiert werden. Ausgehend von diesem Referenz-Szenario werden bestimmte Parameter wie Energiepreisniveaus, Höhe von Austausch-/Renovierungsraten oder der externen Kosten variiert und deren Auswirkungen untersucht. Weiters werden verschiedene Varianten von energiepolitischen Instrumenten wie unterschiedliche Fördermodelle oder CO<sub>2</sub>-Steuern definiert und deren Effekte analysiert.

Die Analysen werden mit einem Computermodell durchgeführt, welches den Bestand an Wohngebäuden und Heiz-/Warmwasserbereitungssystemen auf einem hohen Disaggregierungsniveau (in über 800 sogenannte „Gebäudesegmente“) abbildet. Jedes dieser Gebäudesegmente wird einem jährlichen Entscheidungsalgorithmus unterworfen, in dem aus einer breiten Palette an Wahlmöglichkeiten jene Technologie / Maßnahme gewählt wird, welche im Sinne des gewählten Optimierungszieles unter Berücksichtigung maximaler Lebensdauern von Systemen/Bauteilen den Gesamtaufwand (Annuität der Investition plus laufender Aufwand) minimiert.

Unter Annahme des Referenz-Szenarios werden im Fall „minimiere monetäre Kosten“ die jährlichen Emissionen von Treibhausgasen für Raumwärme und Warmwasserbereitung um ca. 33% reduziert (Vergleich 2020 – 2002). Weitere Reduktionen der Treibhausgasemissionen sind bei Anwendung der Ziele „minimiere soziale Kosten“ und „minimiere Treibhausgasemissionen“ möglich, allerdings sind die Kosten für jede zusätzliche eingesparte Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent (im Vergleich zum Fall „minimiere monetäre Kosten“) für den Fall „minimiere soziale Kosten“ um den Faktor 3,1 niedriger als bei Anwendung des Ziels „minimiere Treibhausgasemissionen“.

In jedem Simulationsfall unter den Preisannahmen des Referenz-Szenarios erfolgt ein massiver Wechsel weg von Ölheizungen, der Anteil von Erdgas wächst allerdings bei „minimiere monetäre Kosten“ und geringer ausgeprägt bei „minimiere soziale Kosten“. Gemäß den Modellresultaten können durch Förderungen (Investitionszuschüsse) die Treibhausgasemissionen markant reduziert werden, allerdings existiert ein deutlicher Trade-Off zwischen Effizienz und Effektivität verschiedener Fördermodelle. Alleinige Förderungen für Maßnahmen an der Gebäudehülle könnten zu einem höheren Einsatz von Strom-Direktheizungen (welche bei sinkenden Heizlasten wirtschaftlicher werden) führen, auf diesen möglichen Effekt ist bei der Gestaltung von Förder-Instrumenten Rücksicht zu nehmen. Die Höhe der Austausch-/Renovierungsraten ist ein mitentscheidender Faktor bei der Geschwindigkeit potenzieller Emissionsreduktionen, auf die durch Fördermodelle oder andere (informativische) Instrumente eingewirkt werden sollte. CO<sub>2</sub>-Steuern haben im Modell eine deutliche Wirkung, wobei mindestens ein Steuersatz zwischen 20 und 50 EUR/t CO<sub>2</sub>-Äquivalent zu wählen ist.



## Abstract

This thesis deals firstly with the research question how greenhouse gas emissions, energy consumption and technology choice for space and water heating in the existing residential building stock may develop until the year 2020, assuming that either

- monetary costs
- social costs
- greenhouse gas emissions
- energy consumption

are minimised given the framework conditions of a reference-scenario. The effects of variations in certain parameters like energy prices or replacement/renovation rates are investigated thereafter as well as the effects of introducing policy instruments like investment subsidies or CO<sub>2</sub>-taxes.

The analyses are based on a computer model which models the stock of residential buildings and heating / domestic hot water systems in a rather disaggregated manner. For each year of the simulation period it is decided for each building segment if everything (regarding building shell and heating / domestic hot water system) stays as it is or if a new heating technology respectively a measure to improve the building shell is chosen according to the target of minimising overall costs / overall emissions / overall energy consumption (depending on the target).

Under the conditions of the reference scenario greenhouse gas emissions are reduced by 33% (comparing 2020 with 2002) when applying the target „minimise monetary costs“.

Further reductions of greenhouse gas emissions are occurring when applying the objectives „minimise social costs“ and „minimise greenhouse gas emissions“ whereas the costs for each additional saved ton of emissions is cheaper with „minimise social costs“ by a factor of 3,1.

There is a massive tendency away from oil heating with each optimisation target but the share of natural gas rises in the case of „minimise monetary costs“ and also – but more slightly – in the case „minimise social costs“. According to the model results greenhouse gas emissions can be reduced distinctly by introducing investment subsidies but there is a significant trade-off between efficiency and effectiveness of subsidy schemes.

If only building shell measures are subsidised it has to be taken care that no trend towards electric heating arises because electric heating may become the most economic option for some types of better insulated buildings. Trying to influence renovation- / replacement rates is a crucial task either by creating certain incentives like subsidies and / or by several types of information measures. CO<sub>2</sub>-taxes have (at least in the model) the expected emissions-reducing effect if the the level of the tax is at least between 20 and 50 EUR per ton CO<sub>2</sub>-equivalent.



## **Danksagung**

Bedanken möchte ich mich bei

- meinem Betreuer Prof. Reinhard Haas, der es mir ermöglichte, diese Arbeit zu verfassen und an einem Forschungsprojekt mitzuarbeiten, das als Basis für diese Arbeit diente,
- meinem zweiten Begutachter Prof. Wolfgang Streicher für seine Bereitschaft, als Zweitbegutachter und –prüfer zu fungieren und für einige Hinweise und Anmerkungen zu technischen Fragestellungen,
- meinen Kollegen Lukas Kranzl, Andreas Müller, Peter Biermayr und Michael Stadler für zahlreiche Anregungen, Kommentare und Hilfestellungen,
- meiner Freundin Renate Obermayer für Aufmunterung, Zuwendung und Geduld (auch wenn es in den letzten Monaten und Jahren nicht immer leicht war, diese aufzubringen),
- meinen Eltern, die mir während der Zeit meiner Diplomstudien ein relativ sorgenfreies Studieren ermöglichten und es auch sonst nicht – wenn nötig – an Unterstützung mangeln ließen,
- allen Menschen, die dazu beitrugen, in mir einen kritischen und auch wissenschaftlich orientierten Geist zu wecken.



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVATION.....	1
1.2. ZENTRALE FRAGESTELLUNGEN .....	2
1.3. WESENTLICHE LITERATUR.....	3
1.4. ÜBERSICHT ÜBER DEN AUFBAU DIESER ARBEIT.....	4
<b>2. GRUNDLAGEN DER MODELLIERUNG VON ENERGIESYSTEMEN.....</b>	<b>5</b>
2.1. GRUNDLEGENDES ZUR MODELLIERUNG .....	5
2.2. ZIELSETZUNGEN VON ENERGIEMODELLEN.....	6
2.3. KLASSIFIKATION VON ENERGIEMODELLEN .....	6
2.4. ERWEITERTES KLASSIFIKATIONSSCHEMA.....	8
<b>3. ÜBERSICHT ÜBER WESENTLICHE LITERATUR IM BEREICH „MODELLIERUNG DER RAUMWÄRMEVERSORGUNG VON WOHNGEBÄUDEN“ .....</b>	<b>15</b>
3.1 ÖSTERREICH .....	15
3.1.1 Schwerpunkt Wärmeschutzmaßnahmen .....	15
3.1.2 Schwerpunkt Heizsysteme .....	17
3.1.3 Schwerpunkt integrierte Ansätze und/oder energiepolitische Maßnahmen.....	18
3.1.4. Schwerpunkt gesamter Energiesektor; Energieszenarien .....	21
3.2 DEUTSCHLAND.....	23
3.3 INTERNATIONALE VERGLEICHE .....	25
<b>4. DER BESTAND AN WOHNGEBÄUDEN UND HEIZSYSTEMEN IN ÖSTERREICH .....</b>	<b>27</b>
4.1 WOHNGEBÄUDE IN ÖSTERREICH – EINE ÜBERSICHT.....	27
4.2 HEIZSYSTEME IN ÖSTERREICHISCHEN WOHNGEBÄUDEN .....	32
4.3 WARMWASSERBEREITUNG IN ÖSTERREICHISCHEN WOHNGEBÄUDEN.....	40
<b>5. DER METHODISCHE ANSATZ.....</b>	<b>43</b>
5.1. MODELLIERUNG VON GEBÄUDE- UND HEIZSYSTEMBESTAND, ENTSCHEIDUNGSLGORITHMUS UND TECHNOLOGIEOPTIONEN.....	43
5.1.1. Disaggregation des Gebäudebestands .....	43
5.1.2. Der Entscheidungsalgorithmus .....	46
5.1.3. Berücksichtigung von Restriktionen.....	50
5.1.4. Übersicht über Technologieoptionen / Maßnahmen .....	51
5.1.5 Berechnung von Dämmstoffdicken.....	54
5.2. MODELLIERUNG DES ENERGIEBEDARFS.....	59
5.2.1 Raumwärme.....	59
5.2.2 Warmwasser.....	63
5.2.3 Solaranlagen .....	67
5.2.4 Solar-Kombisysteme.....	70
5.3 DATENGRUNDLAGE .....	74
5.3.1 Monetäre Kosten .....	74
5.3.1.1 Laufende Kosten .....	74
5.3.1.2 Investitionskosten .....	76

5.3.2 Externe Kosten .....	90
5.3.3 Energie- und Treibhausgasbilanzierungen .....	98
5.3.3.1 Definitionen .....	98
5.3.3.2 Methodische Aspekte von Bilanzierungen.....	100
5.3.3.3 Bilanzierung von Fenstern .....	102
5.3.3.4 Bilanzierung von Heizsystemen und Solaranlagen .....	104
<b>6. ERGEBNISSE I – OHNE BERÜCKSICHTIGUNG ENERGIEPOLITISCHER INSTRUMENTE .....</b>	<b>107</b>
6.1. ANWENDUNG DES MODELLS AUF EINZELNE MODELLGEBÄUDE.....	107
6.1.1 Einfamilienhäuser .....	109
6.1.2 Zweifamilienhäuser .....	113
6.1.3 Kleine Mehrfamilienhäuser.....	116
6.1.4 Große Mehrfamilienhäuser .....	118
6.1.5 Resümee aus den Einzelanalysen:.....	122
6.2. ANWENDUNG DES MODELLS AUF DEN GESAMTEN WOHNGEBÄUDEBESTAND ÖSTERREICHS .....	123
6.2.1. Definition eines „Referenz-Szenarios“ .....	123
6.2.2. Vergleich der Anwendung der verschiedenen Optimierungsziele unter den Annahmen des „Referenz-Szenarios“ .....	127
6.2.3. Variation von Rahmenbedingungen .....	140
6.2.3.1 Variation der Austauschraten.....	140
6.2.3.2 Variation der Energieträgerpreise .....	141
6.2.3.3 Kombination von veränderten Austauschraten und Energiepreinsniveaus .....	143
6.2.3.4 Variation der Zinssätze .....	144
6.2.3.5 Höhe der externen Kosten.....	145
<b>7. ERGEBNISSE II - BERÜCKSICHTIGUNG ENERGIEPOLITISCHER INSTRUMENTE .....</b>	<b>147</b>
7.1. FÖRDERMODELLE .....	147
7.1.1. Förderung CO <sub>2</sub> -armer Heizsysteme.....	147
7.1.2. Förderung von Maßnahmen an der Gebäudehülle .....	151
7.1.3. Kombinierte Förderungen (Heizsysteme + Gebäudehülle).....	154
7.2. EINFÜHRUNG VON CO <sub>2</sub> -STEUERN .....	157
<b>8. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND SCHLUßFOLGERUNGEN....</b>	<b>161</b>
<b>LITERATUR .....</b>	<b>165</b>
<b>ANHÄNGE.....</b>	<b>173</b>
ANHANG 1: SPEZIFIKATION DER GEBÄUDEKLASSEN .....	173
ANHANG 2: ANNAHMEN FÜR BEISPIEL „OPTIMALE DÄMMSTOFFDICKE“ (KAP. 5.1.5).....	174
ANHANG 3: BEDARF AN ELEKTRISCHER HILFSENERGIE VON HEIZSYSTEMEN .....	175
ANHANG 4: KENNWERTE FÜR DIE DIMENSIONIERUNG VON SOLAR-KOMBISYSTEMEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER GEBÄUDEHEIZLAST.....	176
ANHANG 5: KOSTEN FÜR WARTUNG VON HEIZSYSTEMEN .....	178
ANHANG 6: HILFSGRÖßEN ZUR BERECHNUNG DER INVESTITIONSKOSTEN VON WÄRMEERZEUGERN.....	179
ANHANG 7: SPEZIFIKATION DER NÄHERUNGSFORMELN FÜR DIE BERECHNUNG DER INVESTITIONSKOSTEN VON HEIZSYSTEMEN .....	180
ANHANG 8: KOSTEN FÜR INSTALLATION / MONTAGE VON WÄRMEERZEUGERN.....	182
ANHANG 9: ANSÄTZE ZUR BERECHNUNG DER KOSTEN VERSCHIEDENER KOMPONENTEN VON HEIZSYSTEMEN (AUßER WÄRMEERZEUGER).....	183

ANHANG 10: ANSÄTZE ZUR BERECHNUNG DER KOSTEN VERSCHIEDENER KOMPONENTEN VON EINZELSYSTEMEN ZUR WARMWASSERBEREITUNG .....	188
ANHANG 11: KOSTENKOMPONENTEN FÜR SOLARANLAGEN .....	191
ANHANG 12: ANNAHMEN ZUR DIMENSIONIERUNG VON SOLARANLAGEN .....	193
ANHANG 13: KOSTEN VON DÄMMSTOFFEN UND DÄMMSYSTEMEN .....	195
ANHANG 14: GRAUE ENERGIE UND GRAUE TREIBHAUSGASEMISSIONEN FÜR ENERGIETRÄGER UND DÄMMSTOFFE .....	198
ANHANG 15: EXTERNE KOSTEN, GRAUE ENERGIE UND GRAUE TREIBHAUSGASEMISSIONEN FÜR FENSTER UND FENSTERTEILE.....	201
ANHANG 16: EXTERNE KOSTEN, GRAUE ENERGIE UND GRAUE TREIBHAUSGASEMISSIONEN FÜR VERSCHIEDENE WERKSTOFFE .....	203
LEBENS LAUF .....	204



# 1. Einleitung

## 1.1. Motivation

Die ökologischen Folgen der Nutzung von Energie – deren meistdiskutierter Aspekt der Klimawandel ist – sowie begrenzte und teurer werdende fossile Energieressourcen konfrontieren Gesellschaften weltweit mit den Herausforderungen, die Energieeffizienz zu steigern, den Anteil erneuerbarer Energieträger im Energiesystem zu erhöhen sowie den gesamten Energiedurchsatz zu reduzieren beziehungsweise zumindest zu begrenzen.

Dem Gebäudesektor wird eine tragende Rolle bei dem Versuch der Verwirklichung oben genannter Ziele eingeräumt. Raumheizung in Wohngebäuden ist für den größten Anteil an Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen innerhalb der Energieanwendungen im Gebäudebereich in Regionen mit gemäßigtem Klima verantwortlich.

In Österreich werden 30 - 35% des gesamten Endenergieverbrauchs für Raumheizung und Warmwasser aufgewendet (Benke 2002)<sup>1</sup>, der Anteil dieses Segments an den gesamten energieverbrauchsbedingten Treibhausgasemissionen beträgt etwa 25 - 30%<sup>2</sup>. Etwa 60% des Gesamtverbrauchs für Raumheizung und Warmwasser wird in Wohngebäuden verursacht (Haberl et al. 1998)<sup>3</sup>. Große Teile des Wohngebäudebestands (bzw. des Gebäudebestands generell) sind von relativ schlechter thermischer Qualität, weshalb in der ambitionierten Sanierung dieses Bestands ein hohes Potenzial für die Reduktion von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch liegt.

Auch die Klimaschutzpolitik trägt dem Umstand der hohen Treibhausgas-Reduktionspotenziale für Raumheizung und Warmwasserbereitung Rechnung. In der von der österreichischen Bundesregierung herausgegebenen „Österreichischen Klimastrategie“ (BMLFUW 2002) werden die größten absoluten Werte für Reduktionen von Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2010 im Sektor „Raumheizung und Kleinverbraucher“ veranschlagt<sup>4</sup>. Um dieses Reduktionsziel erreichen zu können, sollen gemäß diesem Strategiepapier die Maßnahmenschwerpunkte auf thermische Verbesserung des Wohngebäudebestands, Erhöhung der jährlichen Sanierungsraten und Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger für Beheizung (insbesondere Biomasse) gelegt werden.

Die Implementierung von Klimaschutzmaßnahmen sollte die Gesellschaft bzw. das Energiesystem in Richtung eines optimalen Pfades lenken, wobei verschiedene Optimierungskriterien von Relevanz sein können. Grundsätzlich besteht die Identifikation

---

<sup>1</sup> Gemäß Benke (2002) wurden im Jahr 2000 35,1% des Gesamtendenergieverbrauchs für Raumheizung und Warmwasser aufgewendet, wobei der vergleichsweise geringe Verbrauch für Kochen und Raumkühlung auch in diesem Wert inkludiert ist.

<sup>2</sup> Eine Feststellung des Anteils der Treibhausgasemissionen für Raumheizung und Warmwasser ist aufgrund der Gliederung der Emissionsfaktoren in der statistischen Erfassung nicht unmittelbar möglich. Gemäß „Austria's National Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2005“ (Umweltbundesamt 2007) beträgt der Anteil der „Other Sectors“ (darunter fällt vor allem stationäre Verbrennung von Kleinverbrauchern) 21,5% an den gesamten energiebedingten Treibhausgasemissionen in Österreich. Die Treibhausgasemissionen, die aus Heizen mit Strom oder Fernwärme resultieren, sind in dieser Kategorie allerdings nicht erfasst.

<sup>3</sup> Gemäß Haberl et al. (1998) gliedert sich der Endenergieverbrauchs für Raumheizung und Warmwasser folgendermassen auf: 60,2 % Wohngebäude; 28,4% Kleinverbraucher, 11,4% Industrie (Bezugsjahr 1995).

<sup>4</sup> Minus 4,1 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente verglichen mit dem Jahr 1990.

eines optimalen Pfades in einer Auswahl von Technologien bzw. Maßnahmen, die ein günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen, wobei Kosten und Nutzen nicht notwendigerweise in einem rein monetären Sinn zu sehen sind.

Gesellschaftlich relevante Optimierungsziele bestehen beispielsweise darin,

- die sozialen Kosten (Summe von monetären und externen Kosten)
- die Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen
- den Lebenszyklus-Energieverbrauch

zu minimieren.

Im Laufe dieser Arbeit wird noch gezeigt werden, dass die Anwendung dieser verschiedenen Optimierungsziele zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich Technologiewahl und Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch führt, wobei auch die Wahl beschränkender Rahmenbedingungen wesentlichen Einfluß auf die Ergebnisse hat. Als weiteres Ziel kommt „minimiere monetäre Kosten“ zur Anwendung, womit der Entscheidungsprozeß eines im engeren Sinn ökonomisch rational entscheidenden Akteurs abgebildet wird.

Neben den monetären Aufwendungen von Endverbrauchern und institutionellen Akteuren (wie Wohnbauträger) für Gebäuderenovierungsmaßnahmen, Neuanschaffung und laufenden Betrieb von Raumheizungs- und Warmwasserbereitungsanlagen fließen auch nicht unbeträchtliche Geldmittel der öffentlichen Hand in diesen Bereich ein, mit dem Ziel, das Verhalten der Konsumenten zu beeinflussen. Aus Sicht der öffentlichen Hand sollte das Ziel sein, diese öffentlichen Gelder möglichst sparsam und möglichst nutzbringend im Sinne der Erreichung von Klimaschutzzielen einzusetzen.

## 1.2. Zentrale Fragestellungen

Die für diese Arbeit zentralen Fragestellungen lauten:

Wie entwickeln sich Treibhausgasemissionen, Energieverbrauch und Technologiewahl im Bereich Raumheizung und Warmwasserbereitung für existierende Wohngebäude in Österreich bis zum Jahr 2020, unter der Annahme, dass entweder

- soziale Kosten (= Summe von monetären und externen Kosten)
- Treibhausgasemissionen
- Energieverbrauch
- monetäre Kosten

unter bestimmten beschränkenden Rahmenbedingungen eines Referenz-Szenarios minimiert<sup>5</sup> werden?

Welchen Einfluß hat die Variation bedeutender Rahmenbedingungen wie

- Entwicklung der Preise von Energieträgern
- Niveau von Austausch-/Renovierungsraten

---

<sup>5</sup> Bei der Minimierung werden sowohl die Investition (anteilig bezogen auf ein Jahr) als auch der laufende Betrieb (bezogen auf ein Jahr) berücksichtigt, siehe 5.1.2 („Der Basis-Entscheidungsalgorithmus“).

- Höhe der externen Kosten
  - Höhe des Zinssatzes
- auf die Ergebnisse?

In welcher Weise beeinflussen energiepolitische Instrumente wie Investitionszuschüsse (Förderungen) oder Steuern die Ergebnisse?

Können energiepolitische Instrumente derart ausgestaltet werden, dass sie in Richtung gesellschaftlich optimaler Pfade wirken?

Wie verhalten sich Fördermodelle hinsichtlich Effizienz (eingesparte Treibhausgasemissionen in Relation zum Volumen der öffentlichen Gelder) und Effektivität (insgesamt aufgrund des Fördermodells eingesparte Treibhausgasemissionen)?

### **1.3. Wesentliche Literatur**

Unter den Arbeiten, die sich u.a. auch mit der Modellierung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen im österreichischen Wohngebäudebestand beschäftigen, sind folgende hervorzuheben:

- Haberl et al. (1998) entwickeln optimale Klimaschutzstrategien für Raumheizung in Österreich, allerdings mit einem sehr unterschiedlichen Ansatz in methodischer Hinsicht.
- Die zukünftige Entwicklung des Bereichs „Wohnen“ wird auch vom Modell DAEDALUS III abgedeckt. Dieses projiziert den gesamten Energieverbrauch Österreichs bis 2020 mit Hilfe eines ökonometrischen Modells, welches mit technischen Parametern ergänzt ist (Kratena / Schleicher 2001).
- Von Interesse ist weiters ein von der Österreichischen Energieagentur entwickeltes Simulationsmodell (Amann 2006) für die zukünftige Entwicklung des Wohngebäudebestands, in dem die wesentlichen Einflußparameter exogen vorgegeben sind, das aber auch den Neubau inkludiert.
- Das im Rahmen eines EU-Projekts entwickelte Modell INVERT verfolgt einen teilweise methodisch ähnlichen Ansatz (Kranzl et al. 2005), wobei die Untersuchung der Effizienz der Verwendung öffentlicher Gelder im Mittelpunkt steht. Eine Fallstudie beschäftigt sich mit dem Raumwärmesektor in Wien (Kranzl et al. 2006).
- Eine umfassende von der Österreichischen Energieagentur erstellte Studie (Lechner et al. 2004) untersucht Potenziale zur Erhöhung der Anteils erneuerbarer Energieträger sowie zur Steigerung der Energieeffizienz für alle Energieverbrauchssektoren. Maßnahmen im Gebäudebereich werden relativ ausführlich dargestellt.

Für Deutschland existieren mehrere Studien, die die Entwicklung des Energieverbrauchs für Raumheizung mit Bottom-Up Modellen untersuchen, z.B. Schuler et al. (2000), Kleemann et al. (2000a), Kleemann et al. (2000b), Ebel et al. (2000).

Bezüglich der Analyse der Wirkungen von energiepolitischen Instrumente für den Gebäude- bzw. Haushaltsbereich sind die Arbeiten von Kranzl et al. (2006), Schaefer et al. (2000), Voss-Uhlenbruck et al. (1999) und Haas / Biermayr (1997) hervorzuheben.

Eine detailliertere Übersicht über Arbeiten mit ähnlichem thematischen Hintergrund bietet Kapitel 3.

#### **1.4. Übersicht über den Aufbau dieser Arbeit**

Grundlegende Aspekte zur Modellierung von Energiesystemen sind in *Kapitel 2* zusammengefasst. In diesem Kapitel erfolgt auch eine Einordnung des für diese Arbeit angewandten Modells in ein Klassifikationsschema.

Eine Übersicht über existierende Arbeiten im Bereich der Modellierung der Raumwärmeversorgung von Wohngebäuden bietet *Kapitel 3*. Der geographische Schwerpunkt der hier dargestellten Arbeiten liegt in Österreich und Deutschland.

Statistische Daten zum Bestand an Wohngebäuden und Heiz-/Warmwasserbereitungssystemen in Österreich sind in *Kapitel 4* aufbereitet. Damit wird auch dieser wesentliche Input für das Modell genauer charakterisiert.

*Kapitel 5* bietet eine umfassende Darstellung des methodischen Ansatzes. Neben der Beschreibung des methodischen Ansatzes im engeren Sinn ist hier auch die Datengrundlage ausführlich dokumentiert. Auch theoretische Aspekte der Bereiche externe Kosten und Lebenszyklusbilanzierung werden überblicksmäßig behandelt.

*Kapitel 6 und 7* dienen der Darstellung der Modellergebnisse. In *Kapitel 6* wird die Wirkungsweise des Modells anhand der Anwendung auf einzelne Modellgebäude demonstriert. Danach werden Ergebnisse der Modellanwendung auf den gesamten Wohngebäudebestand Österreichs für ein Referenz-Szenario vorgestellt. Abschließend werden in Kapitel 6 die Einflüsse der Variation wesentlicher Rahmenbedingungen wie Energiepreinsniveaus oder Austauschraten diskutiert.

*Kapitel 7* widmet sich den Einflüssen verschiedener energiepolitischer Instrumente auf die Modellergebnisse. Neben der Beschreibung der Wirksamkeit verschiedener Fördermodelle (Investitionszuschüsse) werden auch Effekte von CO<sub>2</sub>-Steuern behandelt.

*Kapitel 8* rundet die Arbeit mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse und der Präsentation von Schlußfolgerungen ab.

## 2. Grundlagen der Modellierung von Energiesystemen

### 2.1. Grundlegendes zur Modellierung

Dem Begriff „Modell“ werden zwei Bedeutungsfelder zugeordnet: Einerseits bezeichnet ein Modell ein Vorbild, das der Nachahmung dient, oder die – meist verkleinerte – Nachahmung eines Vorbilds, andererseits wird unter einem Modell generell *ein vereinfachendes Abbild der Wirklichkeit* verstanden<sup>6</sup>.

Im folgenden wird der Begriff Modell im Sinne der zweiten Bedeutung verwendet.

Nach der von Herbert Stachowiak geprägten „Allgemeinen Modelltheorie“, welche als domänenübergreifend und daher möglichst allgemein anwendbar verstanden werden will, ist ein Modell durch drei Merkmale gekennzeichnet<sup>7</sup>:

1. *Abbildung*: Ein Modell ist immer ein Abbild von etwas, eine Repräsentation natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können.

2. *Verkürzung*: Ein Modell erfasst nicht alle Attribute des Originals, sondern nur diejenigen, die dem Modellschaffer bzw. Modellnutzer relevant erscheinen.

3. *Pragmatismus*: Pragmatismus bedeutet hier soviel wie Orientierung am Nützlichen. Ein Modell wird vom Modellschaffer bzw. Modellnutzer für einen bestimmten Zweck eingesetzt. Die Fragen Für wen?, Warum? und Wozu? bestimmen also die konkrete Ausgestaltung eines Modells.

Ein Modell zeichnet sich also durch Abstraktion aus, die bewusste Vernachlässigung bestimmter Merkmale, um die für den Modellierer oder den Modellierungszweck wesentlichen Modelleigenschaften hervorzuheben. Bereits einfachste Abbildungen der Realität (z.B. das Messen der Körpergröße eines Menschen) stellen nach dieser allgemeingültigen Definition ein Modell dar.

Die Erstellung von Modellen wird als *Modellbildung* oder *Modellierung* bezeichnet.

Modelle können als *mathematische Modelle* (z.B. in der Form eines Gleichungssystems) formuliert werden sowie – insbesondere bei Erreichen einer Komplexität, die symbolische mathematische Lösungsverfahren erschwert bzw. verunmöglicht – in Form eines Computerprogramms als *Computermodelle* implementiert werden. Letztere Variante nimmt angesichts der rasanten Fortschritte in der Computertechnologie einen immer größeren Stellenwert ein.

Modelle werden in der Regel eingesetzt, um Zusammenhänge besser verstehen und eventuell auch Aussagen über zukünftige Entwicklungen machen zu können<sup>8</sup>. Für jedes Modell, das sich mit zukünftigen Entwicklungen befasst, ist es unvermeidlich, Schätzungen und Annahmen zu machen, die mit Unsicherheit behaftet sind (van Beek 1999, S. 7).

---

<sup>6</sup> siehe <http://de.wikipedia.org/wiki/Modell>

<sup>7</sup> siehe [http://de.wikipedia.org/wiki/Modell#Allgemeine\\_Modelltheorie](http://de.wikipedia.org/wiki/Modell#Allgemeine_Modelltheorie)

<sup>8</sup> „The purpose of a model is, first and foremost, to aid the understanding of reality. This includes the actual current and historical functioning of a system as well as its future development.“ (Biberacher 2004, S. 5)

## 2.2. Zielsetzungen von Energiemodellen

Wie für jede Art der Modellbildung gültig versuchen auch Energie- bzw. Energiesystemmodelle die Komplexität der Realität dermassen zu reduzieren, sodass bestimmte Zusammenhänge nachvollziehbar werden sowie bestimmte - für den Modellbildner bedeutsame - Fragestellungen mit einem vertretbaren Zeit- und Arbeitsaufwand beantwortbar werden<sup>9</sup>.

Im Fall von Energiemodellen steht der Sektor der Energieumwandlung und -nutzung bei der Modellbildung im Blickpunkt. Beispielsweise kann der gesamte Energiesektor einer (oder auch mehrerer) Volkswirtschaft(en) abgebildet werden oder auch nur ein Teilbereich des Energiesektors, beispielsweise der Raumwärmesektor, wie im Fall der vorliegenden Arbeit.

Energiemodelle können eingesetzt werden, um zukünftige Entwicklungen vorherzusagen („Prognosemodelle“) oder um den Möglichkeitsraum zukünftiger Entwicklungen auszuloten („Szenarioanalysen“), wobei sich diese beiden Ansätze nicht unbedingt scharf trennen lassen<sup>10</sup>. Spezifische Ziele von Energiemodellen können in der Einschätzung der Energienachfrage, des Energieverbrauchs, der Wirkungen von Energiesystemen (z.B. hinsichtlich Emissionen) oder in der Bewertung verschiedener (technologischer) Optionen liegen, wobei verschiedene spezifische Ziele in einem Modell integriert sein können (van Beek 1999, S. 8f.)

## 2.3. Klassifikation von Energiemodellen

Energiemodelle lassen sich nach verschiedenen Kriterien klassifizieren. Wesentliche Kriterien betreffen nach Schlette (1999) die Zielsetzung (Prognosen versus Szenarien), die Methodik bzw. Modellierungstechnik (Simulations- versus Optimierungsmodelle) und den Blickwinkel (Top-Down versus Bottom-Up).

### Prognosen versus Szenarioanalysen

Mit Hilfe einer *Prognose* sollen zukünftige Entwicklungen von Größen wie Energieverbrauch, Bruttonozialprodukt oder Bevölkerungsgröße vorausgesagt werden. Bei der Erstellung einer Prognose geht es also um ein Aufzeigen einer Entwicklung, die vom Prognoseersteller als am wahrscheinlichsten erachtet wird. Prognosemodelle sind oft nur für kurze Zeiträume konzipiert und basieren oft auf ökonometrischen Ansätzen (van Beek 1999, S. 8).

Bei *Szenarioanalysen* (oder Szenarienanalysen) wird das Modellverhalten (bzw. die Entwicklung der zu untersuchenden Größen) bei verschiedenen vorgegebenen Bündeln

---

<sup>9</sup> „Sinn eines Energiemodells ist es, dieses hochkomplexe System von Wirtschaftssubjekten, Energieformen und -trägern sowie Prozessen durchschaubar zu machen, indem eine vereinfachte Abbildung des Energiesektors einer oder mehrerer Volkswirtschaften erstellt wird.“ (Schlette 1999, S. 3)

<sup>10</sup> siehe auch Kapitel 2.3. Klassifikation von Energiemodellen

von Annahmen untersucht. Ein bestimmtes Bündel von Annahmen repräsentiert ein Szenario<sup>11</sup>. Die getroffenen Annahmen müssen nicht unbedingt so wahrscheinlich wie möglich sein oder aus vergangenen Entwicklungen ableitbar sein. Insofern unterscheidet sich eine Szenarioanalyse von der Prognosetechnik, bei der möglichst wahrscheinliche und aus der Vergangenheit ableitbare Entwicklungen zur Anwendung kommen.

Mit Hilfe von Szenarioanalysen kann der Raum möglicher Entwicklungen ausgelotet werden. Meistens wird bei Szenarioanalysen ein Basis-Szenario, ein sogenanntes „Business as Usual“ (BAU) – Szenario definiert, und dieses mit verschiedenen Alternativszenarien verglichen. In einem Business as Usual-Szenario werden gegenwärtige Trends in die Zukunft extrapoliert, während in alternativen Szenarien verschiedene Änderungen im Vergleich zu gegenwärtigen Trends angenommen werden. Alternativszenarien können auch Extrempositionen abbilden („Worst Case Scenario“, „Best Case Scenario“).

Prognosetechnik und Szenarioanalysen lassen sich nicht streng voneinander abgrenzen. Prognosen können konditional formuliert sein, in der Form: Wie entwickeln sich die relevanten Größen, wenn bestimmte Annahmen zutreffen? Konditionale Prognosen ähneln also einem Szenario. Andererseits ist es möglich, aus einer Menge von Szenarien jenes mit den für den jeweiligen Anwender wahrscheinlichsten Annahmen auszuwählen (z.B. das BAU-Szenario) und diesem Szenario Prognosecharakter zu verleihen. Falls verschiedene Szenarien (trotz unterschiedlicher Annahmen) zu ähnlichen Ergebnissen kommen, können diese Ergebnisse als „robust“ und als solche mit hoher prognostischer Sicherheit angesehen werden (Schlette 1999, S. 8).

Allerdings ist eher davon auszugehen, dass unterschiedliche Szenarien zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

### **Simulations- versus Optimierungsmodelle**

*Simulationsmodelle* sind deskriptive Modelle basierend auf einer logischen Repräsentation des abgebildeten Systems, die darauf abzielen, die Funktionsweise des Systems in vereinfachter Weise zu reproduzieren (van Beeck 1999, S. 14). Simulationsmodelle können den Einblick in das Systemverhalten verbessern und eignen sich insbesondere dann als Experimentierplattform, wenn es unmöglich oder sehr kostspielig ist, Experimente in der Realität durchzuführen.

*Optimierungsmodelle* zielen darauf ab, diejenige Systemkonfiguration oder das Systemverhalten zu ermitteln, das im Hinblick auf ein gewähltes Ziel unter bestimmtem beschränkenden Bedingungen optimal ist. Als Ziel kann z.B. die Minimierung der Gesamtkosten der Energieversorgung, die Minimierung der Gesamtemissionen oder die Maximierung des Anteils eines oder mehrerer Energieträger gewählt werden (Schlette

---

<sup>11</sup> Genauer formuliert: „A specification of all the exogenous parameters involved in an energy model constitutes a scenario.“ (Bahn et al. 2004); eigene Übersetzung: „Ein Szenario wird durch die Spezifikation aller exogenen Parameter, die in einem Energiemodell involviert sind, bestimmt.“

1999, S. 10). Im Gegensatz zu Simulationsmodellen fokussieren Optimierungsmodelle auf ideale Ergebnisse, sie haben normativen Charakter.

Beispielsweise verwenden Versorgungsunternehmen Optimierungsmodelle, um optimale Investitionsentscheidungen ermitteln zu können. Optimierungsmodelle können aber auch für Ebenen auf höherem Aggregationsniveau, beispielsweise für die Planung der nationalen Energieversorgung angewendet werden. In Optimierungsmodellen wird häufig die Methode der Linearen Programmierung eingesetzt.

### **Top-Down versus Bottom-Up Modelle**

In *Top-Down Modellen* wird eine makroökonomische Sichtweise verfolgt, das zu untersuchende System wird auf einem relativ hoch aggregierten Niveau abgebildet, aggregierte ökonomische Variablen kommen zur Anwendung. Top-Down Modelle ermöglichen, die Verflechtungen zwischen dem Energiesektor und anderen ökonomischen Sektoren abzubilden, einzelne Technologien werden in der Regel nicht repräsentiert. Top-Down Modelle sind oft als Allgemeine Gleichgewichtsmodelle konzipiert, die Austauschbarkeit einzelner Produktionsfaktoren (Kapital, Arbeit, Rohstoffe, Energie) wird über Substitutionselastizitäten berücksichtigt (Bahn et al. 2004, S. 3).

*Bottom-Up* Ansätze versuchen zunächst die Einzelkomponenten eines Systems in angemessenem Detaillierungsgrad abzubilden und über eine Aggregation der Wirkungen dieser Einzelkomponenten das Systemverhalten zu ermitteln. Im Fall von Energiemodellen bedeutet das, dass von Energieverbrauchern verwendete Technologien durch die Wahl relevanter Parameter explizit abgebildet werden. Im Vergleich zu Top-Down Modellen verwenden Bottom-Up Modelle in hohem Maße disaggregierte Daten.

Während Top-Down Modelle dann aussagekräftig sind, wenn die wesentlichen zugrundeliegenden Variablen (z.B. Elastizitäten) für die betrachtete Periode konstant bleiben, also keine Diskontinuitäten auftreten, gilt für Bottom-Up Modelle als einschränkende Bedingung für deren sinnvolle Anwendung, dass Wechselwirkungen zu anderen ökonomischen Sektoren vernachlässigbar gering sind (van Beeck 1999, S. 11).

Eine klare Unterscheidung zwischen Top-Down und Bottom-Up Modellen lässt sich in der Praxis nicht immer treffen. Es gibt mittlerweile auch Hybrid-Modelle, die beide Ansätze integrieren (Schlette 1999, S. 11; Bahn et al, S. 3).

### **2.4. Erweitertes Klassifikationsschema**

Im Vergleich zu den in Kapitel 2.3 angeführten Klassifikationskriterien entwickelt van Beeck (1999) ein umfassenderes Klassifikationsschema, das neun verschiedene Kriterien beinhaltet:

1. Generelle und spezifische Zielsetzungen
2. Modelstruktur: interne und externe Annahmen
3. Analytischer Ansatz: Top-Down versus Bottom-Up

4. Zugrundeliegende Methodologie
5. Mathematischer Ansatz
6. Abgedeckter geographischer Bereich
7. Berücksichtigte Sektoren
8. Zeithorizont
9. Anforderungen an benötigte Daten

### *1. Generelle und spezifische Zielsetzungen*

Generelle Zielsetzungen:

- Prognose („forecasting“), siehe Kap. 2.3.
- Analyse verschiedener Szenarien, Ausloten der Zukunft („exploring the future“), siehe Kap. 2.3.
- aus der Zukunft in die Gegenwart zurückblicken („backcasting“)

„Backcasting“ bedeutet, dass ein wünschenswertes Zukunftsbild (oder mehrere Zukunftsbilder) entworfen wird (werden) und danach überlegt wird, wie durch schrittweises Zurückgehen von der Zukunft in die Gegenwart diese wünschenswerte Zukunft erreicht werden kann.

Spezifische Zielsetzungen:

- Energienachfragemodelle („energy demand models“)

Die Nachfrage wird als Funktion von Parametern wie beispielsweise Bevölkerungsgröße, Einkommen oder Energiepreise modelliert.

- Energieangebotsmodelle („energy supply models“)

Energieangebotsmodelle fokussieren auf technische Aspekte von Energiesystemen, beschäftigen sich mit der Frage, ob eine gegebene Nachfrage durch das Angebot gedeckt werden kann. Sie können Least-Cost Aspekte beinhalten.

- Wirkungsmodelle („impact models“)

Wirkungsmodelle beschäftigen sich mit den Konsequenzen (z.B. hinsichtlich Beeinflussung der Umwelt, der Gesundheit, der sozialen Situation etc.) verschiedener Optionen.

- Bewertungsmodelle („appraisal models“)

Mehrere Optionen werden verglichen und die passendste ausgewählt. Als wesentliches Bewertungskriterium wird oft Effizienz (technische oder ökonomische) angewandt.

- Integrierte Ansätze

Energiemodelle integrieren oft mehrere dieser spezifischen Zielsetzungen.

## 2. Modellstruktur: interne und externe Annahmen

- Grad der Endogenisierung

Ein hoher Grad der Endogenisierung bedeutet, dass möglichst viele Parameter Teil der Modellgleichungen sind und damit nicht exogen vorgegeben werden müssen. Beispiele für häufig exogen vorgegebene Größen sind Entwicklung der Bevölkerung, des Bruttosozialprodukts, des Energiebedarfs oder von Einkommens- und Preiselastizitäten.

- Grad der Integration der Nicht-Energie-Sektoren

Inwieweit sind ökonomische Sektoren, die nicht unmittelbar mit Energieumwandlung zu tun haben, in das Modell integriert?

- Detaillierungsgrad der Abbildung energetischer Endanwendungen
- Detaillierungsgrad der Abbildung der Energieversorgungstechnologien

## 3. Analytischer Ansatz: Top-Down versus Bottom-Up

Eine Erläuterung von Top-Down und Bottom-Up Modellen ist Kap. 2.3. zu entnehmen.

## 4. Zugrundeliegende Methodologie

- Ökonometrische Modelle

Ökonometrische Modelle verwenden statistische Methoden, um Daten aus der Vergangenheit in die Zukunft zu extrapolieren.

- Makroökonomische Modelle

Makroökonomische Modelle konzentrieren sich auf eine ganze Volkswirtschaft und auf die Interaktion zwischen den einzelnen Sektoren einer Volkswirtschaft.

- Ökonomische Gleichgewichtsmodelle

Diese Modelltypen basieren auf den neoklassischen Annahmen eines perfekten Marktgleichgewichts. Unterschieden wird zwischen Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen, die von einem simultanen Gleichgewicht in allen Märkten ausgehen, und Partiellen Gleichgewichtsmodellen, die nur in Teilbereichen der Ökonomie von Marktgleichgewichten ausgehen, beispielsweise von einem Gleichgewicht zwischen Energienachfrage und Energieangebot.

- Optimierungsmodelle

Erläuterung siehe Kap. 2.3.

- Simulationsmodelle

Erläuterung siehe Kap. 2.3.

- Spreadsheet Modelle (Tool Boxes)

Mit Spreadsheet Modellen sind nicht notwendigerweise Modelle gemeint, die Gebrauch von Tabellenkalkulation (Spreadsheets) machen, sondern hoch flexible Modelle, die relativ einfach an individuelle Bedürfnisse angepasst werden können.

- Backcasting-Modelle

Erläuterung von Backcasting-Modellen siehe oben (unter „Generelle Zielsetzungen“)

- Multi-Kriterien Modelle

Multi-Kriterien Modelle können verwendet werden, um auch andere Kriterien als nur ökonomische Effizienz zu berücksichtigen. Neben quantitativen Daten können auch qualitative Daten einfließen.

### 5. Mathematischer Ansatz

- Lineare Programmierung

Lineare Programmierung (LP) ist eine Technik, um ein Arrangement von Aktivitäten zu finden, bei dem ein bestimmtes Kriterium je nach Zielfunktion minimiert oder maximiert wird bei vorgegebenen beschränkenden Nebenbedingungen. Sowohl Zielfunktion als auch Nebenbedingungen müssen als lineare Gleichungen oder Ungleichungen formuliert sein.

Dieser Ansatz kommt sehr oft in Optimierungsmodellen zur Anwendung.

- Mixed-Integer Programmierung

Mixed-Integer Programmierung (MIP) ist eine Erweiterung von Linearer Programmierung, die einen größeren Detaillierungsgrad bei der Formulierung technischer Eigenschaften erlaubt.

- Dynamische Programmierung

Dynamische Programmierung ist eine Methode zur Identifizierung optimaler Wachstumspfade.

Neben diesen drei in der Energiemodellierung häufig angewandten mathematischen Methoden sind auch Kombinationen dieser Methoden möglich und gelegentlich kommen auch andere mathematische Ansätze (z.B. Fuzzy Logic oder Multi-Kriterien Techniken) zur Anwendung.

### 6. Abgedeckter geographischer Bereich

- Global

- Regional

Unter „regional“ können sowohl internationale Regionen, z.B. Europa, Lateinamerika, Südostasien etc., subsumiert werden sowie Regionen innerhalb eines Landes, wofür auch der Terminus „lokal“ gebraucht werden kann.

- National

- Lokal

bezieht sich auf den subnationalen Bereich, auf Regionen innerhalb eines Landes.

- **Projekt**

Der geographische Erstreckungsbereich eines Projekts ist meist lokal, kann sich aber auch auf eine Nation oder auf internationale Bereiche beziehen.

### *7. Berücksichtigte Sektoren*

Modelle können nur einen bestimmten ökonomischen Sektor, mehrere Sektoren oder eine ganze Volkswirtschaft abdecken.

Modelle, die nur einen Sektor abdecken (z.B. den Energiesektor oder einen Teilbereich des Energiesektors wie in dem in dieser Arbeit vorgestellten Modell), berücksichtigen makroökonomische Wechselwirkungen mit anderen Wirtschaftssektoren nicht. Bottom-Up Modelle sind meistens sektoral, aber nicht alle sektoralen Modelle bedienen sich der Bottom-Up Methodik.

### *8. Zeithorizont*

- kurzfristiger Zeithorizont
- mittelfristiger Zeithorizont
- langfristiger Zeithorizont

Es existieren keine Standarddefinitionen bezüglich der Dauer dieser drei Horizonte. Eine mögliche Einteilung weist dem kurzfristigen Horizont bis zu 5 Jahre, dem mittelfristigen 3 – 15 Jahre und dem langfristigen Zeithorizont mehr als 10 Jahre zu (van Beeck 1999, S. 16)

### *9. Anforderungen an benötigte Daten*

Die meisten Modelle benötigen Daten in quantitativer, kardinaler Form. In Fällen, wo quantitative Daten nicht vorhanden oder sehr unzuverlässig sind, kann es bedeutsam sein, dass das Modell auch mit qualitativen und ordinalen Daten umgehen kann. Modelle können Daten in sehr unterschiedlichem Aggregierungsgrad benötigen. Hochaggregierte Daten sind insbesondere für Top-Down Modelle sowie langfristige globale oder nationale Modelle von Relevanz, niedrig aggregierte Daten insbesondere für Bottom-Up Modelle.

In unten angeführter Tabelle 2.1 wird eine Einordnung des in dieser Arbeit vorgestellten Modells in Klassifikationsschema nach van Beeck vorgenommen.

Tab. 2.1: Einordnung des in dieser Arbeit vorgestellten Modells in Klassifikationsschema nach van Beeck

<b>Kategorie</b>	
<i>generelle Ziele</i>	explorativ
<i>spezifische Ziele</i>	integrierter Ansatz (siehe auch Kap. 1.2., „Zentrale Fragestellungen“)
<i>Modellstruktur</i>	Grad der Endogenisierung mittel (Nachfrage für Raumwärme und Warmwasser endogen; Energiepreise, Austauschraten etc. exogen) Nicht-Energie Sektoren nicht integriert relevante Endanwendungen und Technologien detailliert abgebildet
<i>Analytische Struktur</i>	Bottom-Up
<i>Methodologie</i>	Optimierungsmodell (mit teilweise Simulationscharakter) (Basis-Entscheidungsalgorithmus (siehe Kap. 5.1.2.) beruht auf einem Optimierungsansatz. Je stärker allerdings Restriktionen das Modellverhalten beeinflussen, desto mehr bewegt sich das Modell vom Optimierungsmodell in Richtung eines Simulationsmodells.)
<i>Mathematischer Ansatz</i>	kein spezifischer gemäß Klassifikationsschema; Entscheidungsalgorithmus siehe Kap. 5.1.2.
<i>Geographischer Bereich</i>	national (Österreich)
<i>Berücksichtigte Sektoren</i>	Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden
<i>Zeithorizont</i>	mittel- bis langfristig (2020)
<i>Anforderungen an Daten</i>	Quantitativ, monetär, disaggregiert



### **3. Übersicht über wesentliche Literatur im Bereich „Modellierung der Raumwärmeversorgung von Wohngebäuden“**

In diesem Abschnitt werden einige bedeutsame Arbeiten, die sich mit dem Bereich der Raumwärmeversorgung von Wohngebäuden beschäftigen, in kurzer Form vorgestellt. Der geographische Schwerpunkt liegt hierbei auf Österreich und Deutschland. In der Auswahl der Arbeiten wird keine Vollständigkeit, aber ein Überblick in ausreichender thematischer Breite angestrebt.

#### **3.1 Österreich**

##### 3.1.1 Schwerpunkt Wärmeschutzmaßnahmen

- *„Wärmedämmung - Rentabilität, Beschäftigungseffekte, Klimaschutz : eine betriebs- und volkswirtschaftliche Analyse“; Kosz et al. (1996)*

In dieser Studie wird eine hierarchische Wirtschaftlichkeitsanalyse einer verstärkten Wärmedämmung des 1991 bestehenden Wohngebäudebestandes in Österreich erstellt. Die hierarchische Wirtschaftlichkeitsanalyse besitzt eine betriebs- und eine volkswirtschaftliche Komponente. Die betriebswirtschaftliche Analyse bestimmt die betriebswirtschaftliche Rentabilität der Wärmedämmung einzelner Bauteile und typischer Wohngebäude aus Sicht der privaten Haushalte als Investoren. Die volkswirtschaftliche Analyse besteht aus einer Kosten-Nutzen-Analyse, welche sich auf die Umwelteffekte (Reduktion der Emissionen von Luftschadstoffen und Kohlendioxid) konzentriert, sowie aus einer Ermittlung der Wertschöpfungs-, Beschäftigungs- und Steueraufkommenseffekte verstärkter Wärmedämmung.

Ein Ergebnis dieser Studie ist, dass unter den getroffenen Annahmen die volkswirtschaftliche Rentabilität (gemessen durch den internen Zinssatz) höher als die betriebswirtschaftliche Rentabilität ist. Drei Parameter bestimmen wesentlich das Ausmaß der volkswirtschaftlichen Rentabilität: das Energiepreisniveau, die (internen) Kosten der Wärmedämmung, die monetäre Bewertung der externen Kosten der Emissionen von CO<sub>2</sub>. Auf die betriebswirtschaftliche Rentabilität hingegen hat der dritte Parameter keinen Einfluss.

Das Erreichen von zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Studie relevanten Klimaschutzzielen wäre nur bei einer deutlichen Steigerung der jährlichen Sanierungsraten erreichbar. Für das sektorale „Toronto-Ziel“ (Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen für Raumwärme um 20% im Jahr 2005 im Vergleich zu 1988) wäre eine jährliche Sanierungsrate von ungefähr 2% (im Vergleich zu ca. 1% im Status Quo), für das sektorale Klimabündnisziel (Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen für Raumwärme um 50% im Jahr 2010 im Vergleich zu 1990), wäre eine jährliche Sanierungsrate von mindestens 3% nötig.

Spezifische Kosten der CO<sub>2</sub>-Vermeidung werden mit 110 – 120 EUR/t CO<sub>2</sub> (Preisbasis 1994) angegeben. Der Bedarf an zusätzlichen Arbeitskräften wird mit 7.250 Personen pro Jahr (Erreichen des sektoralen Toronto-Ziels) bzw. mit 13.320 Personen pro Jahr

(Erreichen des sektoralen Klimabündnisziels) beziffert. Als eine wesentliche Maßnahme zur Erreichung von Klimaschutzzielen wird die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer vorgeschlagen.

- „*Wärmeschutzmaßnahmen an Wohngebäuden*“; Schuster et al. (2000)

Ziel dieser Studie ist es, CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale des österreichischen Nachkriegswohnungsbestandes (Wohngebäude, die zwischen 1945 und 1980 errichtet wurden) zu untersuchen und den möglichen Beitrag dieses Sektors zur Erreichung des Kyoto-Ziels und des Klimabündnis-Ziels abzuschätzen. Es werden ausschließlich Maßnahmen an der Gebäudehülle berücksichtigt. Basis der Berechnungen ist eine Gebäudetypologie mit insgesamt neun Gebäudetypen, welche drei Bauperioden (1945-1960, 1961-1970, 1971-1980) und drei Gebäudegrößen (1-2 Wohneinheiten, 3-10 Wohneinheiten, mehr als 10 Wohneinheiten) umfasst. Für jede dieser Gebäudetypen werden Wärmeschutzmaßnahmen angenommen, die die Gebäude auf Niedrigenergiestandard bringen, wobei 2 Ausführungsvarianten (1. Verwendung von Standard-Dämmstoffen, 2. Verwendung von ökologisch vorteilhaften, aber teureren Dämmstoffen/Konstruktionen) berücksichtigt werden. Um das sektorale Kyoto-Ziel (Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen für Raumwärme um 13% im Jahr 2008 im Vergleich zu 1990) für den österreichischen Nachkriegswohnungsbestand zu erreichen, müssten im Zeitraum zwischen 2000 und 2008 mit einer jährlichen Rate von 1,76% die in der Studie vorgeschlagenen Wärmeschutzmaßnahmen durchgeführt werden; zur Erreichung des Klimabündnisziels (Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen für Raumwärme um 50% im Jahr 2010 im Vergleich zu 1990) müsste die jährliche Sanierungsrate zwischen 2000 und 2010 bereits 7,46% betragen. Die gesamten erforderlichen Investitionen für Erreichung des Kyoto-Ziels betragen 3,96 Mrd. Euro (Standardvariante, Preisbasis 1999, ohne Diskontierung) bzw. 5,2 Mrd. Euro (Öko-Variante), wobei sich diese Gesamtkosten ungefähr zu gleichen Teilen auf Arbeits- und Materialkosten aufteilen. Für die Erreichung des Klimabündnis-Ziels liegen die Investitionskosten bei 20,5 Mrd. Euro (Standardvariante) bzw. 27 Mrd. Euro (Öko-Variante). Die Kosten für die alternativen Dämmstoffe bzw. Konstruktionen (wobei unter den Alternativen die kostengünstigste Variante mit Zellulosedämmstoff gewählt wurde), liegen also um etwa 31% über denen der Standard-Variante. Bezogen auf die Investitionskosten können durch die thermische Sanierung von Gebäuden mit einem niedrigen thermischen Standard die CO<sub>2</sub>-Emissionen am effizientesten reduziert werden; dies gilt insbesondere für Ein- und Zweifamilienhäuser und Gebäude aus der Bauperiode 1945-1960.

- „*Die Entwicklung der thermischen Qualität der österreichischen Gebäude und ihre Bedeutung für den Umweltschutz*“; Meister (1999)

Diese Publikation beschäftigt sich u.a. mit der Frage, mit welchen Maßnahmen im Vergleich zu einem Referenz-Szenario weitergehende Einsparungen an Energieverbrauch und Emissionen im Bereich Raumwärmebereitstellung in Wohngebäuden möglich sind. Es werden sowohl bereits bestehende Gebäude als auch Neubauten berücksichtigt. Als

Referenz-Szenario dient eine von der Prognos AG erstellte Prognose über den Energieverbrauch von Wohngebäuden über den Zeitraum 1995-2010. Gemäß der Prognos-Studie wird ein Rückgang der Nachfrage nach Niedertemperatur-Wärme von etwa 5% erwartet. Im UBA-2010-Szenario wird im Vergleich zum Szenario der Prognos-Studie noch eine weitere Reduktion von 15% erreicht. Diese zusätzliche Reduktion könnte durch weitergehende Verbesserungen der thermischen Qualität von Neubauten (Reduktion um 3,1% gegenüber Trend) , durch eine Erhöhung der Sanierungsraten und gleichzeitig eine über den Trend hinausgehende Reduktion der Energiekennzahlen von sanierten Gebäuden (Reduktion um 11,8% gegenüber Trend) erreicht werden. Die jährliche Sanierungsrate der Gebäude der Bauperiode 1919-1980 müsste von 1% auf 3% erhöht werden. Für Neubauten müsste eine Energiekennzahl von 45 kWh/m<sup>2</sup>a erreicht werden, für sanierte Gebäude nutzerbezogene Energiekennzahlen zwischen 70 und 90 kWh/m<sup>2</sup>a.

Weiters werden in dieser Publikation auch Lebenszyklusbilanzierungen für neue Einfamilienhäuser durchgeführt, wobei drei Typen (Passivhaus, Niedrigenergiehaus, Standard gemäß Wärmeschutzverordnung 1995) verglichen werden. Die Bilanzierungen erfolgen mit Hilfe des Computermodells GEMIS (GesamtEmissionsModell Integrierter Systeme), Version 3.1. Die Mehraufwände an kumulierten Energieaufwand und Treibhausgasemissionen für die Errichtung des Passivhaus-Typs werden deutlich durch den verminderten Energiebedarf bzw. die verminderten Emissionen beim Betrieb des Passivhauses kompensiert, weshalb dieser Typ in der Lebenszyklusbilanz am besten abschneidet.

#### 3.1.2 Schwerpunkt Heizsysteme

- *„Vergleich der Heizkosten bei unterschiedlichen Heizungssystemen und in Abhängigkeit des Wärmebedarfs“; Bacher (2000)*

Die Gesamtkosten (Investitions-, Energie- und Betriebskosten) für verschiedene Heizsysteme in Abhängigkeit von der Heizlast werden verglichen. Die Untersuchungen beschränken sich auf Einfamilienhäuser im Neubau (Heizlast 5-25 kW, ca. 3 Personen, 130 m<sup>2</sup> Wohnnutzfläche) in Österreich.

Die Investitionskosten werden detailliert in verschiedene Bestandteile gegliedert (Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung, Energieträgerspeicherung, Regelung/Steuerung, Warmwasserbereitung). Eine empirische Untersuchung (Marktübersicht) der Investitionskosten wurde durchgeführt und Näherungsformeln der verschiedenen Investitionskostenanteile in Abhängigkeit der Kesselleistung entwickelt. Die Näherungsformeln sind für Heizlasten bzw. Kesselleistungen bis ca. 30 kW gültig.

Der Autor kommt zum Schluß, dass bei sinkender Heizlast der Anteil der Investitionskosten relativ mehr Gewicht bekommt im Vergleich zu den Brennstoffkosten, da Investitionskosten bei sinkender Heizlast nur in geringem Ausmaß zurückgehen. Bei niedrigen Heizlasten wird Heizen mit Strom (E-Nachtspeicherheizungen) in rein ökonomischer Sicht die günstigste Variante.

Teile der von Bacher durchgeführten Kostenermittlungen werden auch für die vorliegende Arbeit verwendet.

- „*Life Cycle Umweltbilanz von österreichischen Heizsystemen*“; Meister (2000)

Eine Lebenszyklusanalyse (inklusive einer Bewertung der externen Kosten) verschiedener Heizsysteme wird mit Hilfe des Computermodells GEMIS 3.1 vorgenommen. 14 verschiedene Heizsysteme (E-Nachtspeicherheizung, Wärmepumpe Sole neu, Wärmepumpe Sole Bestand, Gas Brennwert, Gashzg. vor 1995, Ölhzg. neu, Ölhzg. vor 1995, Kohlehzg. neu, Kohlehzg. vor 1995, Holzhozg. Hackschnitzel Plantage, Holzhozg. Pellets, Holzhozg. Hackschnitzel neu, Holzhozg. Bestand, Holzhozg. alt vor 1995) werden verglichen. Holzheizungen schneiden erwartungsgemäß am besten ab bezüglich der Treibhausgasbilanz, gefolgt von Wärmepumpenheizungen und Gasheizungen. Am schlechtesten schneiden Kohleheizungen, gefolgt von E-Nachtspeicherheizungen ab. Die kumulierten Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente) der verschiedenen Holzheizungen liegen zwischen 60 und 100 g pro kWh Nutzenergie, Wärmepumpen erreichen 160 – 220 g, Gasheizungen 300 – 390 g. Bei Betrachtung der externen Kosten fällt auf, dass die Reihenfolge der Heizsysteme diesbezüglich gleich ist wie bei der Treibhausgasbilanz, die relativen Unterschiede zwischen den Holzheizungen und den anderen Heizsystemen sind aber geringer. Die externen Kosten von Holzheizungen liegen zwischen 0,65 und 0,95 EURct/kWh Nutzenergie, diejenigen von Wärmepumpen zwischen 1,2 und 1,6 EURct/kWh, diejenigen von Gasheizungen zwischen 1,7 und 2,4 EURct/kWh. Für die Berechnung der externen Kosten werden neben den Treibhausgasen auch „klassische“ Luftschadstoffe (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, Staub) monetär bewertet. Gasheizungen weisen die geringsten kumulierten Schwefeldioxidemissionen auf, gefolgt von Ölheizungen, Wärmepumpen und Holzheizungen.

### 3.1.3 Schwerpunkt integrierte Ansätze und/oder energiepolitische Maßnahmen

- „*Optimal climate protection strategies for space heating. The case of Austria*“; Haberl et al. (1998)

Die Autoren versuchen, verschiedene Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Bereich Raumwärme und Warmwasserbereitung in Österreich hinsichtlich der sozialen Nettokosten und dem Potenzial, Treibhausgasemissionen einzusparen, zu bewerten. Die Maßnahmen werden in fünf verschiedene Bereiche (Neubau Einfamilienhäuser, Neubau Mehrfamilienhäuser, Sanierung Einfamilienhäuser, Sanierung Mehrfamilienhäuser, Kleinverbraucher und Industrie) eingeteilt, insgesamt werden 43 verschiedene Maßnahmen bewertet. Bei der Berechnung der sozialen Nettokosten pro Maßnahme fließen die Investitionskosten, die Höhe der Reduktion an Treibhausgasemissionen, Bewertung externer Kosten sowie administrative Kosten ein. Die externen Kosten pro Tonne CO<sub>2</sub>-Emission sind mit 145 EUR (Preisbasis 1996) angenommen.

Gewählt werden nur Maßnahmen, die kosteneffizient sind, d.h. bei denen die sozialen Nettokosten negativ sind. Es ergibt sich bei Addition der kosteneffizienten Maßnahmen ein jährliches Einsparpotenzial von 550 kt CO<sub>2</sub> verglichen mit einer Referenzentwicklung bei sozialen Nettokosten von –115 EUR pro eingesparter Tonne CO<sub>2</sub><sup>12</sup>. Dieses Einsparpotenzial entspricht etwa 2,7% der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen für Raumwärme und Warmwasserbereitung in Österreich, wobei das Einsparpotenzial bei der Sanierung bestehender Gebäude etwa um den Faktor 6,5 höher ist als dasjenige bei der Errichtung neuer Gebäude. Vermehrter Einsatz von Fernwärme (basierend auf Kraft-Wärme-Kopplung) und verbesserte Wärmedämm-Standards sind die effizientesten Maßnahmen. Weitere substantielle Beiträge stammen vom Ersatz von Strom-Direktheizungen, vom Einsatz verbesserter Regelung und vom Einsatz von Biomasse-Heizsystemen.

- „Klimaschutz und Gebäudequalität“; Amann (2006)

Der Autor vergleicht die Entwicklung von raumwärmebedingten Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch für Mehrfamilienhäuser in Österreich bis zum Jahr 2020 in 5 verschiedenen Szenarien:

- Referenz-Szenario (Sanierungsrate 1%)
- Passivhaus-Szenario (ab 2002 werden neu errichtete Gebäude ausschließlich im Passivhaus-Standard gebaut)
- Sanierungs-Szenario (Sanierungsrate 3%, Sanierungsqualität 2002 – 2009 Niedrigenergiehausstandard, ab 2010 Passivhaus-Standard)
- Biomasse-Szenario (50% Biomasseanteil im Neubau ab 2002 bei Energieträgern für Raumheizung; keine neue Ölheizung)
- Klimaschutz-Szenario (Passivhaus-Standard bei Sanierungen (ab 2010) und Neubau (ab 2002); Biomasseeinsatz 50%; 3% Sanierungsrate)

Die Berechnungen erfolgen mit einem von der Österr. Energieagentur erstellten Simulationsmodell, in dem die wesentlichen Einflußparameter exogen vorgegeben sind. Die Reduktionen an Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 im Vergleich zum Referenz-Szenario betragen im Passivhaus-Szenario 6,7%, im Sanierungs-Szenario 42,1%, im Biomasse-Szenario 14,8% und im Klimaschutz-Szenario 55,3%. Es zeigt sich also, dass eine reine Fokussierung auf den Neubau (Passivhaus-Szenario) relativ wenig Einsparpotenzial aufweist, während Steigerung der Sanierungsraten und ambitionierte Sanierungsqualität (Sanierungs-Szenario) zu den größten Einsparpotenzialen führen.

---

<sup>12</sup> Es entsteht also ein „sozialer Nettonutzen“ von 145 EUR pro eingesparter Tonne CO<sub>2</sub>.

- „*Residential Energy Demand in Austria and Resulting Effective Energy Policy Strategies*“; Haas / Biermayr (1997)

Die Wirkung verschiedener Einflußparameter auf den Energieverbrauch von Haushalten wird in dieser Publikation mittels ökonometrischer Modellierungsansätze untersucht. Die Anwendungsbereiche Raumwärme, Warmwasserbereitung, elektrische Anwendungen (Kühlen, Kochen, Waschen, Unterhaltung etc.) sowie der gesamte Haushaltsenergieverbrauch (ohne Mobilität) sind einbezogen. Die Datengrundlage besteht aus einer Querschnittsanalyse von 400 österreichischen Haushalten. Die ökonometrische Modellbildung erfolgt in drei Stufen: in der ersten Stufe werden nur ökonomische Parameter (Einkommen, Energiepreis) berücksichtigt, in der zweiten Stufe kommen strukturell-technische Parameter (Heizgradtage, Wohnungsanzahl pro Gebäude, beheizte Wohnfläche, Personenanzahl pro Haushalt, spezifische Heizlast des Gebäudes, Jahresnutzungsgrad des Heizsystems, Anzahl größerer Elektro-Geräte) hinzu, in der dritten Stufe werden noch verschiedene „Dummy-Parameter“<sup>13</sup> hinzugefügt.

Bei Heranziehung der rein ökonomischen Modelle ergibt sich ein höher Einfluß des Haushaltseinkommens (bzw. eine hohe Einkommenselastizität) für alle Anwendungsbereiche, hohe Preiselastizitäten allerdings nur für Raumwärme und den gesamten Haushaltsenergieverbrauch. Die Hinzunahme von strukturell-technischen Parametern verbessert die statistische Qualität der ökonometrischen Modelle. Den höchsten Einfluß haben die Parameter beheizte Fläche (Raumwärme), Personenanzahl pro Haushalt (Warmwasserbereitung, elektrische Anwendungen) sowie Anzahl größerer Elektro-Geräte (elektrische Anwendungen). Die weitere Hinzunahme von Dummy-Parametern verbessert die statistische Qualität der Modelle nicht wesentlich, abgesehen vom Parameter „Existenz einer Solaranlage“ in Bezug auf Warmwasserbereitung.

Folgende Empfehlungen werden bezüglich Einsatz energiepolitischer Instrumente ausgesprochen: Für den Bereich Raumheizung in erster Linie die Einführung von Energiesteuern aufgrund hoher Langzeit-Preiselastizitäten, in zweiter Linie werden Standards empfohlen. Für den Bereich der elektrischen Anwendungen werden Standards als einziges Instrument empfohlen, da die Preiselastizitäten hier sehr gering sind. Weiters werden Förderungen (Investitionszuschüsse) für thermische Solaranlagen empfohlen.

- *„Modellierung und Entwicklung von Strategien zur effizienten Förderung nachhaltiger Energiesysteme am Beispiel des Wiener Raumwärmesektors“*; Kranzl et al. (2006)

Das Modell, das den Untersuchungen der Arbeit von Kranzl et al. zu Grunde liegt, wurde im Rahmen des EU-Altener-Projekts Invert „Investing in RES and RUE technologies: Models for saving public money“ entwickelt (siehe auch Kranzl et al. 2005). Mit Hilfe dieses Modells können die Auswirkungen von Förderinstrumenten simuliert werden. Dabei werden Fördersysteme sowohl für den vermehrten Einsatz erneuerbarer Energien

---

<sup>13</sup> Diese Parameter können die Werte 0 oder 1 annehmen, ein Dummy-Parameter gibt also beispielsweise an, ob eine bestimmte Technologie eingesetzt wird oder nicht. Im gegenständlichen Fall handelt es sich um folgende Parameter: Einfamilienhaus oder Mehrfamilienhaus, Zentralheizung vorhanden (Ja/nein), Solaranlage vorhanden (Ja/nein), Wärmepumpe vorhanden (Ja/nein).

als auch zur Steigerung der Energieeffizienz in den Bereichen Gebäude (Raumwärme, Warmwasser, Kühlen), Stromerzeugung und Treibstoffproduktion betrachtet.

Am Beispiel des Gebäudesektors bedeutet dies, dass im Invert Simulation-Tool der Gebäudebestand auf einem sehr detaillierten Niveau nach Gebäudekategorien, Bauperioden sowie Energiesystemen abgebildet werden kann. Auf dieser Basis werden Entscheidungsprozesse für Heiz-, Warmwasser- oder Kühlsysteme bzw. Wärmeschutzmaßnahmen modelliert. Die Spezifizierung ökonomischer Anreize über Förderungen bewirkt dabei eine Verschiebung der Entscheidungsgrundlagen, woraus die Effekte verschiedener Anreizsysteme ermittelt werden. Der Modellierungsansatz ist damit dem in dieser Dissertation vorgestellten Ansatz grundsätzlich ähnlich (siehe Kap. 5), bei einer detaillierteren Bestehung bestehen aber doch einige Unterschiede: So werden im Invert-Modell verschiedene Optimierungsziele nicht berücksichtigt (nur „minimiere monetäre Kosten“), energiepolitische Instrumente aber in einem größeren Detaillierungsgrad abgebildet. Auch im Design von Entscheidungsalgorithmus und Ablaufsteuerung sind Unterschiede vorhanden.

Die Ermittlung der Fördereffizienz für verschiedene Förderinstrumente bzw. Bündel von Förderinstrumenten für den Raumwärmesektor in Wien wird schwerpunktmässig dargestellt. Unter der Effizienz eines Fördermodells wird die Menge der eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen bezogen auf die Höhe der für Förderungen vergebenen öffentlichen Mittel verstanden.

Die Analyse zeigt, dass der optimale Mix von Förderinstrumenten stark vom angestrebten CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel abhängt. Geringe Einsparungen können kostengünstig mit einer Umstellung auf Biomasse bzw. Fernwärme erreicht werden. Eine Erhöhung der derzeit in Wien bestehenden Thewosan-Förderung gehört zwar nicht zu den effizientesten, kostengünstigsten Optionen, weist aber die höchsten Einsparungspotenziale auf. Das heißt, um eine „hohe“ Reduktion von über zusätzlich 5% zu erreichen, ist eine Erhöhung der Förderung für Wärmeschutzmaßnahmen unabdingbar.

#### 3.1.4. Schwerpunkt gesamter Energiesektor; Energieszenarien

Im folgenden werden zwei Arbeiten vorgestellt, die den gesamten Energiesektor Österreichs behandeln und Szenarien bis 2020 bzw. 2010 entwickeln. Der Sektor Raumwärme wird jeweils als eigener Schwerpunkt thematisiert.

- „*Energieszenarien bis 2020*“; *Kratena / Schleicher (2001)*

Mit Hilfe des Energiemodells DAEDALUS III, welches in ökonometrischen Gleichungen den Einfluss von Technologien und Preisen auf die Energienachfrage abbildet, wird die Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch in Österreich bis 2020 in drei Szenarien untersucht, wobei die gesamte Energienachfrage berücksichtigt wird. Einem „Baseline-Szenario“ sind zwei ambitioniertere Szenarien gegenübergestellt: ein „Kyoto-Szenario“ und ein „Nachhaltigkeitsszenario“. Im „Kyoto-Szenario“ werden Maßnahmen auf Basis der österreichischen Klimastrategie, mit welchen das

österreichische Kyoto-Ziel (13% Reduktion der Emission von Treibhausgasen, Basis 1990) erreicht werden kann, herangezogen und quantifiziert. Während im „Kyoto-Szenario“ nach dem Jahr 2012 die spezifischen Maßnahmen weitgehend wegfallen, werden diese im „Nachhaltigkeitsszenario“ weitergeführt, weshalb in diesem Szenario bis 2020 höhere Reduktionen an Treibhausgasemissionen resultieren. Generell fallen die Maßnahmen in die Bereiche Reduktion von (redundanten) Energiedienstleistungen, effizientere Technologien im Endverbrauch, effizientere Technologien bei der Energieumwandlung und Verschiebung des Energieträger-Mixes.

Den Gebäudebereich betreffend wird im „Kyoto-Szenario“ angenommen, dass die thermische Sanierung sich ausschließlich auf Nachkriegsbauten (Bauperiode 1945-1980) konzentriert und die Sanierungsrate bis 2012 linear von 1% auf 3% ansteigt. Auch im Neubaubereich werden im „Kyoto-Szenario“ bessere thermische Qualitäten erreicht verglichen mit dem „Baseline-Szenario“. Im „Nachhaltigkeitsszenario“ werden die Maßnahmen des „Kyoto-Szenarios“ verstärkt: Die thermische Sanierungsrate steigt bis 2012 auf 7% an, die Effizienzsteigerungen im mittleren und neuen Gebäudebestand werden von 1% pro Jahr auf 6% pro Jahr beschleunigt.

Während im „Baseline-Szenario“ die CO<sub>2</sub>-Emissionen von 60,3 Mt im Jahr 2000 auf 69,3 Mt im Jahr 2020 steigen, sinken sie im „Kyoto-Szenario“ auf 51,9 Mt, im „Nachhaltigkeitsszenario“ auf 38,2 Mt im Jahr 2020.

Weiters werden auch gesamtwirtschaftliche Effekte der Szenarien berechnet. Sowohl Bruttoinlandsprodukt als auch Beschäftigtenanzahl erreichen in den Alternativszenarien etwas höhere Werte als im „Baseline-Szenario“. Es erfolgt ein Rückgang von vorleistungintensiver Güternachfrage für Energie und ein Anstieg von arbeitsintensiver Güternachfrage für Kapital (neue Technologien im Energiebereich, Gebäudesanierungen).

- *„Energieeffizienz und Erneuerbare 2010“; Lechner et al. (2004)*

Diese Studie beschäftigt sich mit der Frage, wie die von der österreichischen Bundesregierung im Jahr 2003 festgelegten Ziele

- Steigerung des Anteils erneuerbarer Energieträger am Bruttoinlandsverbrauch um 1% p.a. (ausgehend von 2003 resultiert daraus ein Anteil von 30% im Jahr 2010)
- Steigerung der Energieeffizienz (der spezifische Energieverbrauch - d.h. der Endenergieeinsatz pro Einheit erwirtschaftetem BIP - soll bis 2010 im Durchschnitt um jährlich 1,6% sinken)

erreicht werden können.

Die Sektoren Mobilität, Stromerzeugung und Wärmeerzeugung werden untersucht.

Im Bereich Wärme ergaben Diskussionen mit Experten, dass bis 2010 mit sehr ambitionierten Maßnahmen ein zusätzlicher Beitrag im Bereich Wärme von knapp 40 PJ an erneuerbaren Energieträgern zu erreichen ist, davon beträgt der zusätzliche Biomasse-Beitrag 34 PJ (Anteil Erneuerbare im Bereich Wärme im Jahr 2000: 124 PJ) . Zusammen mit dem Bedarf anderer Sektoren (insbesondere Stromerzeugung) würden damit die Grenzen der zusätzlichen Nutzung fester Biomasse, die auf 6,5 Mio. Festmeter geschätzt

werden ‚erreicht. Der zusätzliche Beitrag von Wärmepumpen wird mit 2,1 PJ, derjenige von Solarwärme mit 2 PJ eingeschätzt.

Um das Ziel „Anteil erneuerbarer Energieträger am Bruttoinlandsverbrauch beträgt 30%“ erreichen zu können, sind neben dem vermehrten Einsatz erneuerbarer Energieträger zusätzliche (im Vergleich zu den Trends) Steigerungen der Energieeffizienz notwendig, insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Energieeffizienz in den letzten Jahren (1993 – 2002) schwächer gestiegen ist als in den Jahren davor.

Die Wirtschaftlichkeit und die Einsparpotenziale (Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen) verschiedener Maßnahmen in den Bereichen Mehrfamilienhäuser, Einfamilienhäuser, Nichtwohngebäude) wird in dieser Studie ebenfalls untersucht.

Als ein Teilziel zur Erhöhung der Energieeffizienz wird eine Steigerung der thermischen Sanierungsrate von Wohngebäuden von 1 % auf 2 % vorgeschlagen. Im Bereich der Nicht-Wohngebäude wird davon ausgegangen, dass für 50% der Fläche dieser Gebäude wirtschaftliche Endenergie-Einsparmaßnahmen im Strom- und Wärmebereich (realisierbar beispielsweise durch Contracting) möglich sind.

Als wichtige generelle Maßnahme wird die Schaffung eines Energieeffizienzfonds vorgeschlagen.

### 3.2 Deutschland

- *„Die Entwicklung des Energiebedarfs zur Wärmebereitstellung von Gebäuden – Ergebnisse“, Kleemann et al. (2000a)*

Die Auswirkung eines sinkenden Wärmebedarfs im Gebäudebereich auf die Struktur der Energieversorgung im Wärmemarkt ist die zentrale Fragestellung in der Arbeit von Kleemann et al (2000a).

Plausible und praxisrelevante Szenarien für die Entwicklung des Energiebedarfs für Raumwärme im Gebäudebereich in Deutschland bis 2050 werden mit Hilfe des IKARUS-Raumwärmemodells erarbeitet. Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude, Neubau und Altbau sind berücksichtigt. Eine Prognose von Rahmenbedingungen wie z.B. Zubau- und Abrißraten wird vorgenommen, so geht die Studie davon aus, dass 2050 noch ca. 75% des Gebäudebestands von 1995 erhalten sind.

Die Funktionsweise des IKARUS-Raumwärmemodells sowie eine detaillierte Darstellung der prognostizierten Rahmendaten und Inputparameter wird in Kleemann et al. (2000b) behandelt.

Zwei Szenarien werden verglichen: Ein „EnEV (Energieeinsparverordnung) Trend Szenario“ und ein „Reduktionsszenario“. Mit dem ersten Szenario sollen die Auswirkungen der Energieeinsparverordnung untersucht werden, das Reduktionsszenario geht von schärferen Bestimmungen und einer Sanierungseffizienz von 100%<sup>14</sup> aus.

Im Vergleich zum Referenzjahr 1995 liegen die möglichen Reduktionen im Energiebedarf für Raumwärme im Wohngebäudebereich Deutschlands (Alt- und Neubau

---

<sup>14</sup> Die Sanierungseffizienz beschreibt das Verhältnis von tatsächlich erreichter Einsparung bei mangelndem Vollzug (der Verordnung) zur Einsparung bei Vollsanierung entsprechend der Verordnung.

zusammengenommen) bis 2020 zwischen 13 % und 32 % je nach Ambitioniertheit des Szenarios, wobei sich die Ambitioniertheit auf die Sanierungsqualität bezieht. Bis 2050 liegen die möglichen Reduktionen zwischen 20 % und 57 %.

Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftswachstum und Klimaschutzpolitik sind die wesentlichen Rahmenbedingungen, die den zukünftigen Energiebedarf im Gebäudebereich bestimmen. Selbst im ambitionierten Szenario („Reduktionsszenario“) kann das 80%-ige CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel bis 2050 (bei weitem) nicht erreicht werden. Noch stringendere Maßnahmen wären erforderlich. Der Wärmemarkt wird mittel- und langfristig auf jeden Fall stark schrumpfen. Der Umsatzrückgang bei Öl liegt zwischen 20 % und 38 % (je nach Szenario), bei Gas gibt es bis auf das Reduktionsszenario noch Umsatzanstiege, im Reduktionsszenario einen Umsatzrückgang von 7 %.

- *„Energy consumption for space-heating of West-German households: empirical evidence, scenario projections and policy implications“; Schuler et al. (2000)*

Um den Einfluß von verschiedenen sozio-ökonomischen Entwicklungen und energiepolitischen Optionen zu zeigen, werden vier verschiedene Szenarien entwickelt, welche im Detail im Projekt „Consumers´ life-styles and pollutant emissions“ ausgearbeitet wurden. Die Berechnungen wurden mit lebensstil-orientierten Simulationsmodell „E<sup>3</sup>life“ durchgeführt. Ein spezielles Feature dieses Modells ist, dass die Ergebnisse nach Haushaltstypen dargestellt werden können, wobei ein Haushaltstyp durch Haushaltsgröße und soziodemographische Merkmale der BewohnerInnen charakterisiert ist (z.B. „young singles“, „middle-aged families“ oder „elderly couples“).

Die vier Szenarien sind folgendermaßen bezeichnet: „Stagnation“, „Business as Usual“ („BaU“), „Sustainability through Technological Break-through“ („Sust. Techn.“), „Sustainability through Reflective Consumption“ („Sust. Cons.“) und unterscheiden sich u.a. in Annahmen bezüglich Entwicklung von Wirtschaftswachstum, Einkommensverteilung, Energieeffizienz in Haushalten, Brennstoffmix, Umsetzungsgrad der Wärmeschutzverordnung und Sanierungsraten.

Ausgehend vom Referenzjahr 1990 werden Szenarioprojektionen für 2000 und 2010 dargestellt. Der Ergebnisse der Szenarioprojektionen streuen in einer relativ großen Bandbreite. Grundsätzlich ist es so, dass thermisch verbesserten Gebäuden eine größere Anzahl an Haushalten bzw. mehr Wohnfläche pro Person gegenüberstehen, wodurch es zu einer Kompensation der technischen Verbesserungen kommen kann. Nur in den nachhaltigkeitsorientierten Szenarien (Sust. Techn., Sust. Cons.) sinkt der Endenergiebedarf für Beheizung der deutschen Haushalte im Vergleich zum Referenzjahr 1990.

Das Business as Usual Szenario wird durch zwei Sub-Szenarien (Sensitivitätsanalysen) ergänzt: „Effective Control“ (EC) und „Effective Control and Effective Renovation“ (ECER). Im EC-Subszenario wird angenommen, dass die Verbesserungsmaßnahmen an der Gebäudehülle gemäß Wärmeschutzverordnung kontrolliert werden. Im ECER-Szenario wird zusätzlich davon ausgegangen, dass die Wärmeschutzstandards bei allen Gebäuden, die ohnehin renoviert würden, erfüllt werden, ansonsten gelten die Annahmen

des BaU-Szenarios. Es zeigt sich, dass es bei diesen Subsznarien zu einer Verringerung des Endenergiebedarfs kommt, insbesondere beim ECER-Szenario. Eine effektivere Kontrolle existierender Verordnungen und eine Erhöhung der Sanierungsrate ist daher von großer Bedeutung, falls der zukünftige Endenergiebedarf für Beheizung der Haushalte sinken soll.

### 3.3 Internationale Vergleiche

- *“Effective Policy instruments for energy efficiency in residential space heating – an international empirical analysis (EPISODE)”*; Schaefer et al. (2000)

In dieser Studie wird ein Ländervergleich bezüglich des Einsatzes energiepolitischer Instrumente für den Bereich Raumwärmebereitstellung in Wohngebäuden durchgeführt. Die Länder Dänemark, Frankreich, Niederlande, Deutschland und Schweden sind inkludiert. Zunächst wird der Status Quo und die historische Entwicklung des Einsatzes energiepolitischer Instrumente in den verschiedenen Ländern dokumentiert, danach wird die Wirkung der unterschiedlichen Instrumente auf die Entwicklung des Energieverbrauchs für Raumwärmebereitstellung in Wohngebäuden untersucht. Für die Untersuchung dieser Wirkungen wird ein Modellierungsansatz entwickelt, welcher ein technisches Gebäudemodell mit ökonometrischen Ansätzen verbindet. Die Instrumente Standards, Steuern, Subventionen und andere Instrumente (insbesondere Informationsvermittlung) werden betrachtet.

In allen untersuchten Ländern werden Standards, die thermische Gebäudequalität betreffend, eingesetzt. Diese Standards wurden im Laufe der Zeit erhöht und beziehen sich zumeist auf Neubauten. Steuern auf Energieverbrauch oder CO<sub>2</sub>-Emissionen kommen in allen Ländern außer Frankreich zum Einsatz. Auch bezüglich Steuern ist eine mit der Zeit fortschreitende Intensivierung (in Bezug auf den Steuersatz und die Steuerbasis) zu beobachten. Subventionen werden zumeist nur für spezifische Bereiche und über eine beschränkte Zeitperiode angewandt. Die Haupteinsatzbereiche von Subventionen liegen in der Förderung von Renovierungsmaßnahmen sowie von erneuerbaren Energieträgern. Instrumente mit dem Schwerpunkt Informationsvermittlung kommen in allen Ländern zum Einsatz, es gibt aber keine kontinuierliche institutionalisierte Informationspolitik.

Standards haben sich als effektives Instrument zur Reduktion des Energiebedarfs (pro Gebäudefläche) für Neubauten in allen Ländern erwiesen. Die Unterschiede zwischen gemessenen Verbrauchswerten und kalkulierten Werten sind auf mangelhafte Umsetzung und Rebound-Effekte zurückzuführen. Der kurzfristige Einfluß von Steuern auf Reduktion des Energieverbrauchs ist als gering einzustufen, der langfristige Einfluß von Steuern konnte aufgrund nicht ausreichender Datenverfügbarkeit nicht beurteilt werden. Auch bei Subventionen und informatorischen Instrumenten konnten nur geringe Effekte auf Reduktion des Energieverbrauchs nachgewiesen werden. Mit der Ausnahme von Deutschland sind aber nur wenige Fördermaßnahmen in den betrachteten Ländern implementiert.

Die Autoren kommen u.a. zu folgenden Empfehlungen:

- Einführung von CO<sub>2</sub>-Steuern, ohne sich davon aber kurzfristige Effekte zu erwarten

- Standards für Neubauten sollten eine gewisse Flexibilität erlauben (z.B. hinsichtlich lokaler Bedingungen, Mitberücksichtigung der Art des Heizsystems)
- Fokus auf thermische Verbesserungen existierender Gebäude legen, Beseitigung von Hemmnissen durch Förderungen, Informationsvermittlung, institutionelle Reformen
- beim Design von Instrumenten darauf achten, dass Umsetzung verbessert wird und Rebound-Effekte reduziert werden
- Harmonisierung auf EU-Ebene verbessern, aber keine komplette Vereinheitlichung

## 4. Der Bestand an Wohngebäuden und Heizsystemen in Österreich

### 4.1 Wohngebäude in Österreich – eine Übersicht

Gemäß „Wohnungen 2002“ (Statistik Austria 2003) bestand der Wohnungsbestand in Österreich im Jahr 2002 aus 3,31 Mio. Wohneinheiten (Hauptwohnsitze). Die Verteilung der Wohneinheiten über sieben verschiedene Bauperioden und vier Gebäudegrößen zeigt Abb. 4.1.

47,6 % aller Wohneinheiten befinden sich in Ein- und Zweifamilienhäusern, 52,4 % in Mehrfamilienhäusern. Beinahe drei Viertel (73,3 %) aller Wohneinheiten wurden in der Zeit nach 1945 errichtet, die Mehrheit (ca. 60 %) dieser Nachkriegsgebäude stammt aus der Periode 1945 – 1980 und ist von vergleichsweise schlechter thermischer Qualität.

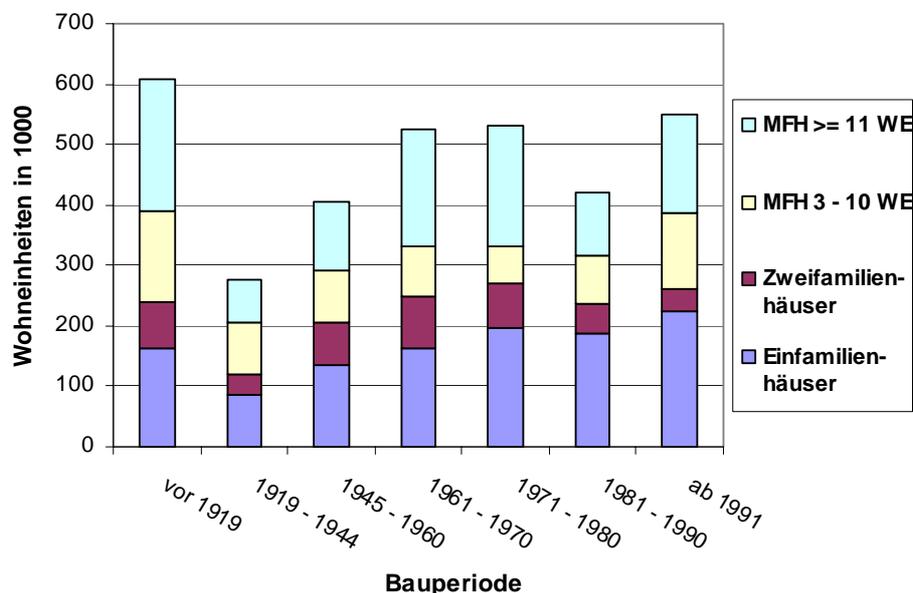


Abb. 4.1: Wohngebäudebestand in Österreich, Verteilung nach Bauperiode und Gebäudegröße, Stand 2002, Datenquelle: Statistik Austria (2003), eigene Darstellung, MFH = Mehrfamilienhaus

Die Entwicklung der durchschnittlichen thermischen Qualität (gemessen durch die auf die Bruttogeschosßfläche bezogene Heizlast  $p_0$  ( $W/m^2$ )) von Wohngebäuden in Österreich zeigt Abb. 4.2. Die thermische Qualität der Wohngebäude ist relativ schlecht bis 1970, wobei die Gebäude der Periode 1919 – 1960 die höchsten spezifischen Heizlasten aufweisen. Erst mit der Bauperiode 1971 – 1980 setzt eine deutliche Verbesserung der thermischen Qualität ein.

Diese thermische Verbesserung kann auf strengere Bauordnungen und die Verbreitung verbesserter Baumaterialien und Konstruktionen zurückgeführt werden, wobei diese Faktoren auch einander beeinflussen. Aus Tab. 4.1 ist die Entwicklung der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Außenbauteile über die verschiedenen Bauperioden zu entnehmen. Für die sprunghafte Verbesserung der thermischen Qualität der Gebäude der Periode 1971 – 1980 sind vor allem die Verringerung des U-Wertes der

obersten Geschoßdecke (von 1,2 auf 0,3 W/m<sup>2</sup>K), der Außenwand (von 1,25 auf 0,7 W/m<sup>2</sup>K) sowie der Fenster (von 3 auf 2,2 W/m<sup>2</sup>K) verantwortlich.

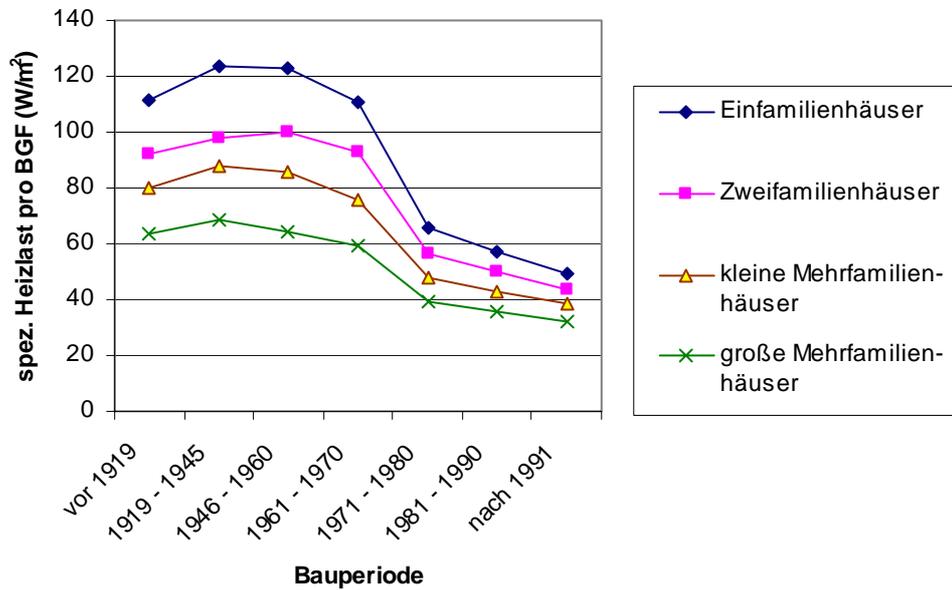


Abb. 4.2: Entwicklung der thermischen Qualität (spez. Heizlast pro Bruttogeschoßfläche in W/m<sup>2</sup>) von Wohngebäuden in Österreich; eigene Berechnungen und eigene Darstellung, Datenquelle: siehe Tab. 4.1

Tab. 4.1: Entwicklung der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) verschiedener Bauteile nach Bauperioden, Wohngebäude in Österreich, Datenquelle: bis 1990 (Korger 1994), seit 1991: Bauordnungen

Bauperiode	U-Werte in W/m <sup>2</sup> K				
	Oberste Geschoßdecke	Außenwand	Fenster	Türen	Kellerdecke / Fußboden
vor 1919	1,1	1	3,1	2,5	1,5
1919 – 1944	1,2	1,2	3,2	2,2	1,4
1945 – 1960	1,2	1,35	3,3	2	1,1
1961 – 1970	1,2	1,25	3	1,8	1,1
1971 – 1980	0,3	0,7	2,2	1,7	0,9
1981 – 1990	0,3	0,6	1,9	1,6	0,63
seit 1991	0,25	0,45	1,7	1,6	0,6

Die Entwicklung von Energieverbrauch für Raumheizung in Wohngebäuden einerseits sowie der gesamten Wohnfläche andererseits für den Zeitraum 1970 – 2000 ist in Abb. 4.3 gegenübergestellt. Während die gesamte Wohnfläche in Österreich im betrachteten Zeitraum kontinuierlich mit beinahe konstanter Wachstumsrate zugenommen hat (von 159 auf 290 Mio. m<sup>2</sup>), stagniert seit etwa 1985 der Energieverbrauch für die Beheizung der

Wohngebäude Österreichs bei etwa 200 PJ mit leicht fallender Tendenz seit 1995. Daraus ist zu erkennen, dass seit 1985 aufgrund von Effizienzverbesserungen (sowohl bei der Gebäudequalität als auch bei den Heizsystemen) die steigende Wohnfläche nicht zu einem Anstieg des Energieverbrauchs geführt hat.

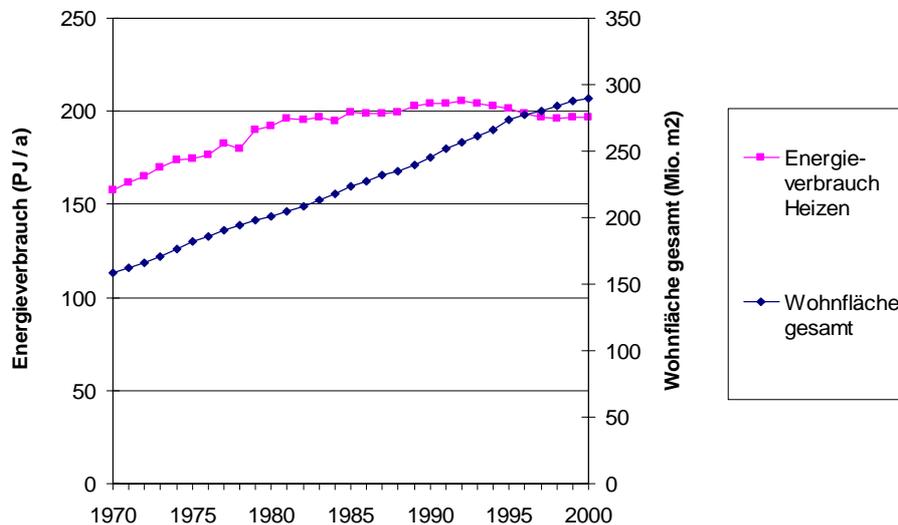


Abb. 4.3: Entwicklung von Energieverbrauch für Raumheizung in Wohngebäuden und der gesamten Wohnfläche für den Zeitraum 1970 – 2000; Datenquellen: Statistik Austria, Berechnungen der Arbeitsgruppe Energiewirtschaft; eigene Darstellung

Andererseits kann Abb. 4.3 auch entnommen werden, dass eine absolute Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung bei gleichzeitig wachsender Nutzfläche nur bei entsprechend großen Effizienzverbesserungen möglich ist (diese müssten bei gleichem Wachstumstrend der Wohnfläche größer sein als in der Vergangenheit).

Einem stagnierenden Energieverbrauch für die Beheizung von Haushalten steht allerdings ein nach wie vor steigender Gesamtenergieverbrauch der Haushalte gegenüber (Lechner et al. 2004, Teil B, S. 24). Dies liegt insbesondere am wachsenden Gesamtstromverbrauch der Haushalte aufgrund steigender Geräteausstattungen und Stromanwendungen und zunehmender Anzahl an Haushalten. Diese verbrauchserhöhenden Effekte überkompensieren die gestiegene Effizienz der einzelnen E-Geräte.

Jährliche Austausch- bzw. Sanierungsraten für Bauteile der Gebäudehülle sind in Tab. 4.2 dargestellt. Die Häufigkeiten verschiedener nachträglich durchgeführter baulicher Maßnahmen in den Jahren 1992 – 2001 sind der Auswertung der Gebäude- und Wohnungszählung 2001 (Statistik Austria 2004) entnommen, die jährliche Austauschrate wurde auf die mittlere Bestandsanzahl von Gebäuden der Periode 1991 bis 2001 bezogen.

Tab. 4.2: Übersicht über nachträglich durchgeführte bauliche Maßnahmen und jährliche Austausch-/Sanierungsraten, Datenquellen: Statistik Austria (2004), ÖSTAT (1993), inkl. eigene Berechnungen

Maßnahme	Ein- und Zweifamilienhäuser		Mehrfamilienhäuser (>= 3 Wohneinheiten)	
	Maßnahmen durchgef. 1992 – 2001, Anzahl Gebäude	jährliche Austauschrate (bez. auf Mittelwert Anz. Geb. 91-2001)	Maßnahmen durchgef. 1992 – 2001, Anzahl Gebäude	jährliche Austauschrate (bez. auf Mittelwert Anz. Geb. 91-2001)
Erneuerung Fenster (im überwiegenden Teil des Gebäudes)	242943	1,61%	43445	2,28%
Fassadenerneuerung (ohne Wärmedämmung)	89416	0,59%	17949	0,94%
Fassadenerneuerung (mit Wärmed.)	122815	0,81%	24459	1,28%
Andere Wärmeschutzmaßnahmen	32744	0,22%	10318	0,54%
Dachgeschoßausbau	62384	0,41%	11390	0,60%
Dachneudeckung	183906	1,22%	30257	1,59%
Wärmeschutzmaßnahmen gesamt	155559	1,03%	34777	1,82%
Fassadenerneuerung gesamt	212231	1,41%	42408	2,22%
Gesamtzahl Gebäude pro Kategorie				
2001	1557420		203547	
1991	1462709		177894	
Mittelwert 1991 – 2001	1510064,5		190720,5	

Generell ist festzustellen, dass alle in Tab. 4.2 aufgelisteten Maßnahmen im Bereich der Mehrfamilienhäuser eine größere Häufigkeit aufweisen. Fenstertausch ist die am häufigsten durchgeführte Renovierungsmaßnahme (jährliche Austauschrate 1,61% bei Ein- und Zweifamilienhäusern, 2,28% bei Mehrfamilienhäusern). Fassadenerneuerungen werden zwar zum größeren Teil mit Wärmedämmung verbunden, bei etwa 42% aller Fassadendämmungen werden aber keine Dämm-Maßnahmen durchgeführt. Anreize, die dazu beitragen, ohnehin durchgeführte Fassadenrenovierungen mit Wärmedämmung zu verbinden, könnten die thermische Verbesserung des Gebäudebestands entsprechend beschleunigen. Dämmungen von Fassaden werden mit jährlichen Raten von 0,81% (Ein- und Zweifamilienhäuser) bzw. 1,28% (Mehrfamilienhäuser) durchgeführt. Die Dämmung anderer Bauteile wird mit geringeren Raten als Fassadendämmung durchgeführt. Die

Summe der Häufigkeiten von Dachgeschoßausbau und Dachdeckung könnte als mögliche Obergrenze der Häufigkeit von Dachdämmungen interpretiert werden, da diese Maßnahmen mit einer Dämmung des Daches kombiniert werden könnten. Ein Ausbau des Dachgeschoßes im Zuge einer thermischen Sanierung kann aber aufgrund der Vergrößerung der Wohnfläche und dem damit erhöhten Konsum der Energiedienstleistung „warmer Raum“ als struktureller Rebound-Effekt betrachtet werden.

Aus einem Vergleich der Wohnungsbestände nach Bauperioden der Häuser- und Wohnungszählung 1991 (ÖSTAT 1993) mit jenen der Gebäude- und Wohnungszählung 2001 (Statistik Austria 2004) wurden für Gebäude der Bauperioden bis 1980 mittlere Abrißraten pro Jahr berechnet (siehe Tab. 4.3). Es wird im Modell angenommen, dass die Abrißraten pro Jahr um einen bestimmten Prozentsatz (0,8%) ansteigen.

*Tab. 4.3: Abrißraten und jährliche Steigerung der Abrißraten nach Bauperioden, eigene Berechnungen und Annahmen, Datenquellen: Statistik Austria (2004), ÖSTAT (1993)*

<i>Bauperiode</i>	<i>Abrißrate pro Jahr</i>
vor 1919	0,87%
1919 – 1944	0,63%
1945 – 1960	0,48%
1961 – 1970	0,25%
1971 – 1980	0,12%

## 4.2 Heizsysteme in österreichischen Wohngebäuden

Bezüglich der Verteilung von Heizsystemen weisen Ein-/Zweifamilienhäuser (siehe Abb. 4.4) und Mehrfamilienhäuser (siehe Abb. 4.5) markante Unterschiede auf.

Während Öl-Zentralheizungen im Referenzjahr 2002 im Ein-/Zweifamilienhausbereich mit einem Anteil von 36,2 % aller Wohneinheiten gefolgt etwa gleichauf von Holz- (19,4%) und Gaszentralheizungen (18,6%) dominieren, ist im Bereich der Mehrfamilienhäuser Gas der am häufigsten eingesetzte Energieträger für Raumheizung (35,4% aller Wohneinheiten), gefolgt von Fernwärme (28,6%) und Öl (16,6%).

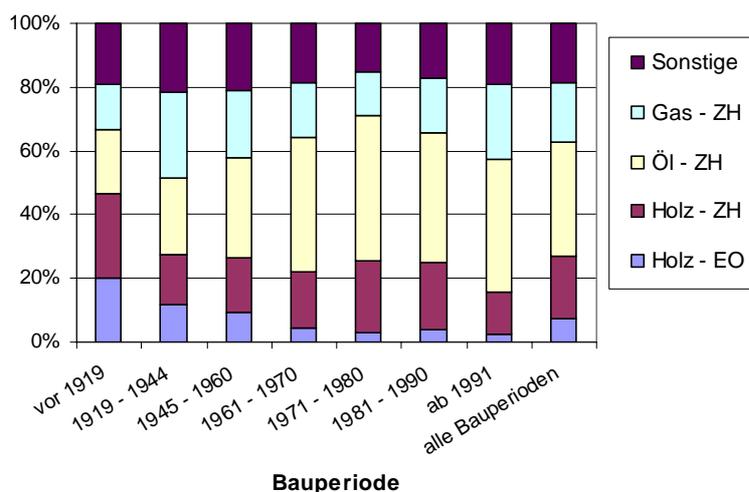


Abb. 4.4: Verteilung von Heizsystemen in Ein-/Zweifamilienhäusern in Österreich, Datenquelle: Statistik Austria (2003); eigene Darstellung, (ZH = Zentralheizung, EO = Einzelofen)

Fernwärme wird mehr als achtmal häufiger in Mehrfamilienhäusern als in Ein-/Zweifamilienhäusern eingesetzt; auch Stromheizungen sind in Mehrfamilienhäusern (ca. 10% aller Wohneinheiten) deutlich stärker verbreitet als in Ein- u. Zweifamilienhäusern (4,5 %).

In Mehrfamilienhäusern ist in neueren Gebäuden (errichtet von 1961 bis zur Gegenwart) Fernwärme die am häufigsten eingesetzte Art der Beheizung, in älteren Mehrfamilienhäusern ist Erdgas der am häufigsten eingesetzte Energieträger (Gas-Etagenheizungen und Gas-Einzelöfen dominieren hier).

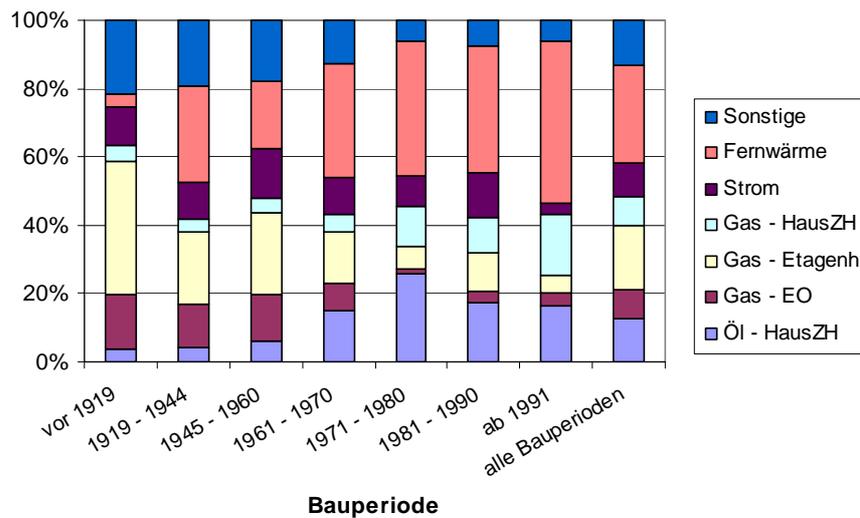


Abb. 4.5: Verteilung von Heizsystemen in Mehrfamilienhäusern in Österreich, Datenquelle: Statistik Austria (2003); eigene Darstellung, (ZH = Zentralheizung, EO = Einzelofen, Etagenh = Etagenheizung)

Wie Abb. 4.6 zeigt, gab es seit 1970 eine beachtliche Dynamik bezüglich Energieträgereinsatz für Heizzwecke. Während der Anteil der Verwendung von Kohle rasant zurückging (von 52% auf 4%), stiegen die Anteile für Erdgas und Fernwärme kontinuierlich an. Die Verwendung von Öl und Holz folgt einem etwas komplexeren Verlauf – der Einsatz von Öl stieg bis 1978 an, fiel bis Mitte der 1980er-Jahre und stieg von da an wieder, während der Anteil von Holz nach einem Tiefpunkt Ende der 1970er-Jahre wieder anstieg, aber seit 1990 gibt es wieder einen leicht fallenden Trend für Holz. Der Rückgang und darauffolgende Anstieg des Einsatzes von Öl kann mit der Preisentwicklung in Zusammenhang gebracht werden, nach einer Hochpreisphase Anfang der 1980er-Jahre folgte seit Mitte der 1980er-Jahre bis zum Jahr 1999 eine Phase niedriger Ölpreise.

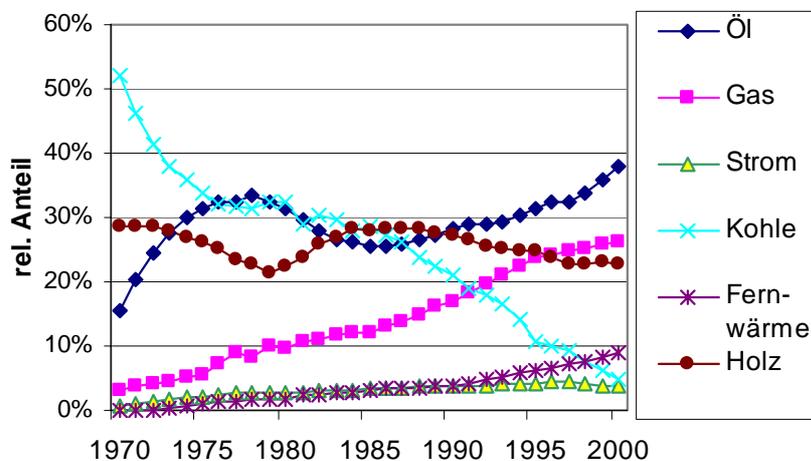


Abb. 4.6: Verteilung der Energieträger zur Beheizung von Wohngebäuden in Österreich, 1970 – 2000; Datenquelle: Arbeitsgruppe Energiewirtschaft, Skopetz (2001); eigene Darstellung

Eine starke Dynamik ist auch bei der zeitlichen Entwicklung des Zentralisierungsgrads von Heizsystemen zu beobachten (siehe Abb. 4.7). Während der Anteil von Einzelofenheizungen seit 1970 kontinuierlich zurückgeht (von 85% im Jahr 1970 auf 25,1% im Jahr 2000), steigen die Anteile von Zentralheizungen (von 11,2% auf 46,3%), Etagenheizungen (von 4,7% auf 13,7%) und Fernwärme (von beinahe 0% auf 14,9%) im Zeitraum zwischen 1970 und 2000. Bei Etagenheizungen ist allerdings seit 1989 ein stagnierender bzw. leicht fallender Trend erkennbar.

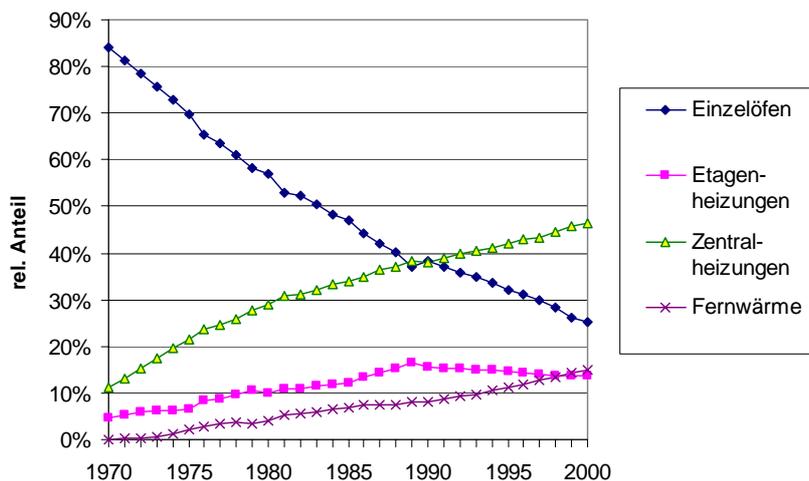


Abb. 4.7: Zeitliche Entwicklung des Zentralisierungsgrads von Heizsystemen in Wohngebäuden in Österreich, 1970 - 2000; Datenquelle: Arbeitsgruppe Energiewirtschaft, Skopetz (2001); eigene Darstellung

### „Alternative“ Heizsysteme / Heizsysteme mit erneuerbaren Energietechnologien

In der Publikation „Wohnungen 2002“ (Statistik Austria 2003) sind die eingesetzten Energieträger für Raumheizung in 7 Gruppen untergliedert:

- Holz
- Kohle, Koks, Briketts
- Heizöl, Ofenöl, Flüssiggas
- Elektrischer Strom
- Erdgas
- Sonstiger Brennstoff
- Unbekannt

Die Entwicklung des Einsatzes verschiedener Heizsysteme bzw. Energieträger, welche umgangssprachlich oft mit dem Attribut „alternativ“ versehen werden, kann daher nicht unmittelbar aus dieser Quelle entnommen werden. Zu diesen Heizsystemen gehören:

- Wärmepumpen
- Solarthermische Anlagen
- Holzpellets-Heizungen
- Hackschnitzel-Heizungen

- Nah-/Fernwärme aus Biomasse

Abgesehen von Wärmepumpen handelt es sich um Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energieträger, wobei fallweise auch Wärmepumpen, da sie „erneuerbare“ Umgebungswärme nutzen, diesen Technologien zugeordnet werden<sup>15</sup>.

Zur Bestimmung der Verbreitung dieser Technologien mussten also andere Quellen herangezogen werden, und zwar:

- Wärmepumpen: Faninger (2006a)
- Solarthermische Anlagen: Faninger (2006b)
- Holzpellets-/ Hackschnitzelheizungen: NÖ Landeslandwirtschaftskammer (2005), Faninger (2006c)
- Nah-/Fernwärme aus Biomasse: Homepage des Lebensministeriums (BMLFUW), (<http://umwelt.lebensministerium.at/article/articleview/28122/1/7331>)

Abb. 4.8 zeigt die Entwicklung des Bestands von Wärmepumpen (für Raumheizung), Hackschnitzelheizungen (< 100 kW), Pelletskessel und Solar-Kombisystemen. Alle diese Systeme werden zum überwiegenden Teil in Ein- und Zweifamilienhäusern eingesetzt (siehe auch Tab. 4.4). Im Jahr 2005 erreichten Wärmepumpen, Hackschnitzelheizungen und Pelletskessel eine ähnlich hohe Verbreitung im Stückzahlbereich zwischen 30.000 und 40.000 Anlagen<sup>16</sup>. Auffallend ist insbesondere das rasante Wachstum des Einsatzes von Pelletsheizungen. Im Bereich der Wärmepumpen, welche für Raumheizung eingesetzt werden, ist das Erdreich die wichtigste Wärmequelle, gefolgt von Grundwasser und (ev. vorgewärmter) Außenluft (Faninger 2006a)<sup>17</sup>.

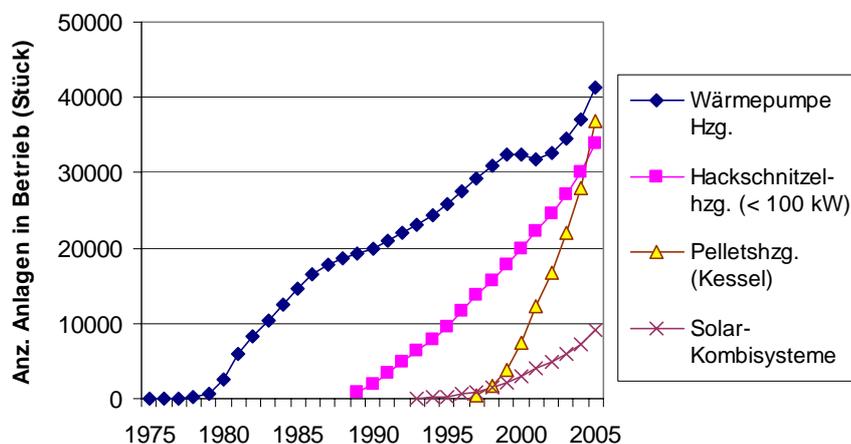


Abb. 4.8: Verbreitung von Heizungs-Wärmepumpen, Hackschnitzelheizungen, Pelletskesseln und Solarkombisystemen, 1975 – 2005: Datenquellen: Faninger (2006a), Faninger (2006b), Faninger

<sup>15</sup> Andererseits kann man eine Wärmepumpe primär auch als eine sehr effiziente Art einer Stromheizung klassifizieren.

<sup>16</sup> Die Zahl der Anlagen in Betrieb im Jahr 2005 beträgt bei Wärmepumpen (für Raumheizung eingesetzt) 41.200, bei Hackschnitzelheizungen (< 100 kW) 33.880, bei Pelletskesseln 36.910.

<sup>17</sup> Seit dem Jahr 1995 liegt der Anteil von Erdreich-Wärmepumpen bei 70-80%, die Anteile von Wasser/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen schwanken etwa zwischen 5 und 15%. Noch im Jahr 1989 allerdings waren Luft/Wasser-Wärmepumpen die am häufigsten eingesetzte Variante mit einem Anteil von ca. 40% (Faninger 2006, S. 32).

(2006c), NÖ Landwirtschaftskammer (2005); eigene Berechnungen und Schätzungen; eigene Darstellung

Im Jahr 2002 waren in Österreich 775 Biomasse-Nah/Fernwärmeanlagen<sup>18</sup> mit einer installierten thermischen Leistung von 878 MW<sup>19</sup>, im Jahr 2003 waren es 843 Anlagen dieser Art mit einer Gesamtleistung von 1005 MW (Sedmidubsky 2004).

Ausgehend von den Annahmen, dass

- von der gesamten thermischen Leistung ein Anteil von 55% für die Beheizung von Einfamilienhäusern sowie 5% für Beheizung von von Mehrfamilienhäusern aufgewendet wird;
- pro Wohneinheit in Ein-/Zweifamilienhäusern die durchschnittliche Anschlußleistung 20 kW, pro Wohneinheit in einem Mehrfamilienhaus die durchschnittliche Anschlußleistung 10 kW beträgt;

ergibt sich, dass im Jahr 2002 24.145 Wohneinheiten in Ein-/Zweifamilienhäusern sowie 4.390 Wohneinheit in Mehrfamilienhäusern von Fernwärme aus Biomasse versorgt werden.

Tab. 4.4: Relative Anteile (an Wohneinheiten) verschiedener „alternativer“ Heizsysteme im Jahr 2002, Datenquellen: siehe oben, inkl. eigene Berechnungen und Annahmen

	Ein- und Zweifamilienhäuser	Mehrfamilienhäuser	alle Gebäude
Pelletshzg.	1,12%	0,06%	0,57%
Hackschnitzelhzg.	1,81%	0,17%	0,95%
Fernwärme Biomasse	1,37%	0,23%	0,77%
Heizungs-Wärmepumpen	2,17%	0,00%	1,04%
Solar-Kombisysteme	0,45%	0,00%	0,21%

Im Jahr 2002 lagen die relativen Anteile (bezogen auf Wohneinheiten) von Pelletsheizungen, Hackschnitzelheizungen, Biomasse-Fernwärme und Heizungs-Wärmepumpen zwischen 1 und 2% im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser bzw. zwischen 0,5 und 1% für alle Gebäude (Tab. 4.4). In Mehrfamilienhäusern werden diese Technologien nur in sehr geringem Ausmaß eingesetzt.

<sup>18</sup> Teilweise wird der Begriff „Biomasse-Nahwärme“, teilweise der Begriff „Biomasse-Fernwärme“ verwendet. Der Begriff „Biomasse-Nahwärme“ soll die Nähe des Heizwerkes und des verwendeten Brennstoffes (lokal geerntete Biomasse, falls vorhanden) zu den Abnehmern ausdrücken.

<sup>19</sup> Diese Angabe ist der Homepage des Lebensministeriums (BMLFUW), (<http://umwelt.lebensministerium.at/article/articleview/28122/1/7331>) entnommen.

### **„Dezentraler Mix“ in Mehrfamilienhäusern**

Heiz- und Warmwasserbereitungssysteme in Mehrfamilienhäusern, welche dezentral pro Wohneinheit eingesetzt werden, werden im Modell unter dem Begriff „dezentraler Mix“ zusammengefasst.

Dem „dezentralen Mix“ werden folgende Technologien zugeordnet:

#### Raumheizung:

- Gas-Etagenheizung
- Gas-Einzelofen
- Öl-Einzelofen
- Holz-Einzelofen
- Kohle-Einzelofen
- Pellets-Einzelofen
- Pellets-Etagenheizung
- Strom-Direktheizung (Konvektoren, Strahler, Nachtspeicheröfen)

#### Warmwasser:

- E-Speicher
- E-Durchflußerhitzer
- Gas-Kombitherme
- Gas-Einzelsystem für Warmwasser (Durchflußerhitzer, Speicher)

Im Modell kann einem bestimmten Gebäudesegment<sup>20</sup> als Heiz-/Warmwassersystem der Typ „dezentraler Mix“ zugeordnet werden. Aufgrund einer bestimmten – exogen vorgegebenen und im Zeitverlauf veränderlichen – Verteilung der einzelnen Technologien des dezentralen Mixes werden für das Modell relevante Werte wie durchschnittlicher Preis pro Endenergie oder durchschnittliche Treibhausgasemissionen pro Endenergie jährlich berechnet. Tab. 4.5 zeigt die Spezifikation der Verteilung der einzelnen Technologien des dezentralen Mixes für Mehrfamilienhäuser aus der Bauperiode vor 1919<sup>21</sup> im Zeitverlauf.

---

<sup>20</sup> Zur Definition des Begriffs „Gebäudesegment“ siehe Kap. 5.1.1

<sup>21</sup> Für jede Bauperiode wurde eine unterschiedliche Zusammensetzung des dezentralen Mixes spezifiziert, wobei die Werte für das Jahr 2002 auf Statistik Austria (2003) basieren. Die tendenzielle Zusammensetzung der unterschiedlichen dezentralen Mixes ist ähnlich, sodass von den Werten in Tab. 4.xx diese Tendenz wiedergegeben wird. Die wesentlichen Annahmen, die der zeitlichen Spezifikation des dezentralen Mixes zugrundeliegen, sind: die Verwendung von Einzelöfen geht kontinuierlich zurück, diese werden durch Gas-Etagenheizungen ersetzt; auch Stromheizungen gehen zurück, aber langsamer; der Einsatz von Pelletsheizungen steigt an, aber sehr langsam.

Tab. 4.5: Relative Anteile der einzelnen Technologien im dezentralen Mix für Mehrfamilienhäuser aus der Bauperiode vor 1919, 2002 – 2020, Datenquelle für 2002: Statistik Austria (2003), inkl. eigene Annahmen und Berechnungen

Aufteilung dezentraler Mix (Bauperiode vor 1919)					
	2002	2005	2010	2015	2020
<b>Raumheizung:</b>					
Gas-Etagenheizung	49,58%	55,83%	63,87%	69,76%	74,13%
Gas-Einzelofen	15,00%	13,69%	11,76%	10,10%	8,67%
Öl-Einzelofen	10,83%	8,71%	6,06%	4,22%	2,93%
Holz-Einzelofen	6,28%	4,89%	3,22%	2,13%	1,40%
Kohle-Einzelofen	3,75%	2,74%	1,62%	0,95%	0,56%
Pellets-Einzelofen	0,00%	0,01%	0,02%	0,04%	0,08%
Pellets-Etagenheizung	0,00%	0,00%	0,02%	0,04%	0,07%
Strom-Direktheizung (Konvektoren, Strahler)	10,19%	9,89%	9,40%	8,94%	8,51%
Strom-Nachtspeicherofen	4,37%	4,24%	4,03%	3,83%	3,65%
<b>Warmwasser:</b>					
E-Speicher	28,34%	24,38%	19,50%	16,12%	13,76%
E-Durchflußerhitzer	7,08%	6,10%	4,87%	4,03%	3,44%
Gas-Kombitherme	49,58%	55,83%	63,87%	69,76%	74,13%
Gas-Durchflußerhitzer	15,00%	13,69%	11,76%	10,10%	8,67%

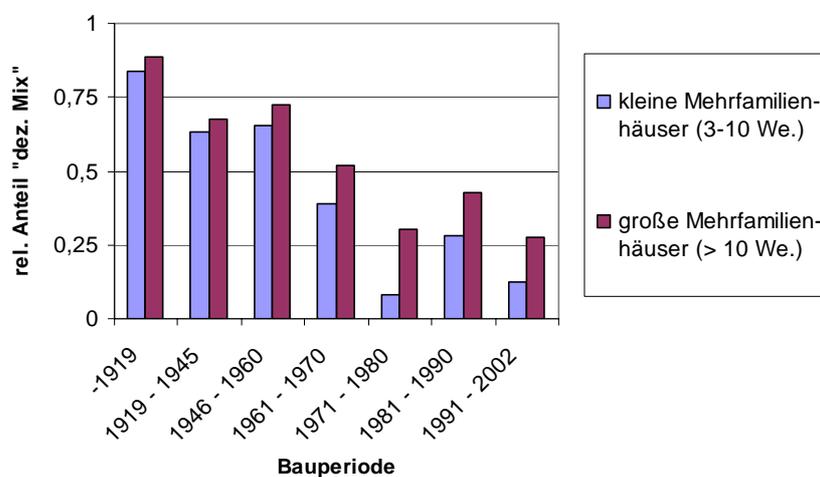


Abb. 4.9: Relative Anteile (an Wohneinheiten) des „dezentralen Mixes“ für kleine und große Mehrfamilienhäuser nach Bauperioden im Jahr 2002, Datenquelle: Statistik Austria (2003), inkl. eigene Berechnungen, eigene Darstellung

Tendenziell geht der Anteil der Wohneinheiten, die mit dezentralen Heiz- und Warmwassersystemen ausgestattet sind (also dem „dezentralen Mix“ zugerechnet werden) mit niedrigerem Alter der Gebäude zurück bzw. die Anteile von Hauszentralheizungen mit Öl oder Gas und Fernwärme steigen entsprechend an (siehe Abb. 4.9 bzw. auch Abb. 4.5

zum Vergleich). Während bei Gebäuden, die vor 1919 errichtet wurden, noch über 80% dem dezentralen Mix zuzuordnen sind, sind bei Gebäuden der Bauperiode 1971-1980 nur mehr zwischen 8% und 30% und bei Gebäuden der Bauperiode 1991 – 2002 zwischen 12% und 27% der Wohneinheiten dezentral versorgt.

Generell werden in kleinen Mehrfamilienhäusern etwas häufiger zentrale Systeme oder Fernwärme eingesetzt.

### 4.3 Warmwasserbereitung in österreichischen Wohngebäuden

Statistische Daten zur Warmwasserbereitung in österreichischen Wohngebäuden sind im Vergleich zu Heizsystemen in geringerem Ausmaß verfügbar. Die letzte repräsentative Übersicht für Österreich basiert auf dem Mikrozensus aus dem Jahr 1997 und ist in der Publikation „Energieverbrauch der Haushalte im Jahre 1996/97“ (ÖSTAT 1998) dargestellt.

Tab. 4.6: Verteilung von Warmwasserbereitungssystemen in Wohngebäuden 1996/97 in Österreich, Datenquelle: ÖSTAT (1998)

Zentralheizung oder Fernwärme	28,02%
Gasgerät ohne Abgasführung (5 Liter)	1,84%
Gasgerät mit Abgasführung	14,99%
Elektrische Energie	35,26%
Wärmepumpe	1,50%
Sonnenkollektoren	0,70%
Zentralhgz. + elektrisch	5,03%
Zentralhgz. + Wärmepumpe	1,15%
Zentralhgz. + Sonnenkollektoren	1,53%
andere Kombinationen	1,87%
keine Warmwasserbereitung	2,18%
unbekannt	5,91%

In dieser Publikation erfolgt keine Gliederung nach Gebäudegrößen (Ein- versus Mehrfamilienhäuser), allerdings gibt es eine Übersicht der Verteilung von Warmwasserbereitungssystemen pro Bundesland. Indirekt kann durch den Vergleich von Bundesländern mit relativ hohem Anteil an Mehrfamilienhäusern (wie Wien) mit solchen mit relativ hohem Anteil an Einfamilienhäusern (wie Niederösterreich) auf den Aspekt der Gliederung nach Gebäudegrößen zumindest tendenziell rückgeschlossen werden.

Tab. 4.7: Verteilung von Warmwasserbereitungssystemen in Wohngebäuden in Österreich nach Gebäudeklassen, Referenzjahr 2002, eigene Berechn. und Annahmen basierend auf ÖSTAT (1998)

Ein-/Zweifamilienhäuser		Mehrfamilienhäuser	
Art des Systems	rel. Anteil (Wohneinh.)	Art des Systems	rel. Anteil (Wohneinh.)
ins Heizsystem integriert oder Fernwärme (ohne Solaranl., inkl. Gas-Kombithermen)	49,41%	in Hauszentralheizung integriert oder Fernwärme (ohne Gas-Kombithermen, ohne Solaranlagen)	43,03%
elektrische Warmwasserber.	30,88%	elektrisch dez. (pro Wohneinh.)	27,12%
Gas (außerhalb Heizsystem)	2,87%	Gas dez. (inkl. Gas-Kombith.)	29,46%
Solaranlage	9,31%	Solaranlage	0,39%
Warmwasser-Wärmepumpe	7,54%	Warmwasser-Wärmepumpe	0,00%

Tab. 4.7 zeigt eine Übersicht über die Verteilung von Warmwasserbereitungssystemen in Wohngebäuden in Österreich getrennt nach Gebäudeklassen (Ein-/Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser), wie sie für das Referenzjahr 2002 vorgenommen wurde. Ausgehend von der Datengrundlage nach ÖSTAT (1998) mussten verschiedene eigene Annahmen getroffen werden, um diese Aufteilung vornehmen zu können. So wurde beispielsweise angenommen, dass ein zeitlicher Trend (1997 – 2002) in Richtung stärkerer Integration der Warmwasserbereitung in das Heizsystem bestand. Weiters wurden Bundesländer mit hohem Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern solchen mit einer hohen Verbreitung von Mehrfamilienhäusern gegenübergestellt (Erläuterung siehe oben).

Daten zur Verbreitung von Solaranlagen und Warmwasser-Wärmepumpen sind den Quellen Faninger (2006a) und Faninger (2006b) entnommen. Wärmepumpen zur Warmwasserbereitung verbreiteten sich in den 1980er-Jahren rasch, danach geht die Verbreitungsgeschwindigkeit zurück, wobei seit dem Jahr 2000 auch die absolute Zahl an Warmwasser-Wärmepumpen rückläufig ist. Die Zahl der installierten Solaranlagen zur Warmwasserbereitung hingegen steigt nach einem zunächst langsamen Wachstum ab dem Jahr 1990 kontinuierlich mit einer (in etwa konstant) hohen Wachstumsrate an (Abb. 4.9)

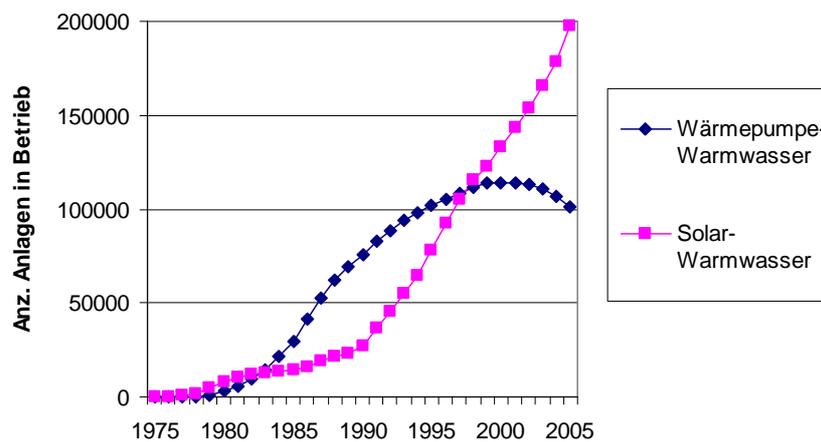


Abb. 4.10: Verbreitung von Solaranlagen zur Warmwasserbereitung und Warmwasser-Wärmepumpen, 1975 – 2005: Datenquellen: Faninger (2006a), Faninger (2006b); eigene Berechnungen und Schätzungen; eigene Darstellung



## 5. Der methodische Ansatz

Um die in Kapitel 1.2 angeführten Fragestellungen behandeln zu können, wurde ein Bottom-Up Computer-Modell entwickelt.

Bottom-Up bedeutet in diesem Zusammenhang, dass

- der Bestand an Wohngebäuden sowie der Bestand an Heiz- und Warmwasserbereitungssystemen in Österreich auf relativ hohem Disaggregationsniveau abgebildet wird,
- die Modellrechnungen / das Optimierungsverfahren für die einzelnen Segmente des Gebäudebestands ausgeführt werden,
- anschließend diese Einzelergebnisse unter Berücksichtigung verschiedener Restriktionen zu Gesamtergebnissen aggregiert werden.

Für jeden Lauf des Modells kann eines von vier Optimierungszielen ausgewählt werden:

- minimiere monetäre Kosten
- minimiere soziale Kosten
- minimiere Treibhausgasemissionen
- minimiere Energieverbrauch

Der Simulationszeitraum ist 2003 bis 2020, das Referenzjahr ist 2002. Die Wahl des Referenzjahres beruht auf Verfügbarkeit offizieller Daten über Gebäude-/Wohnungs- und Heizsystembestand für dieses Jahr<sup>22</sup>. Nach dem Jahr 2002 errichtete Gebäude werden im Modell nicht berücksichtigt.

Ausgehend von einem Referenz-Szenario<sup>23</sup> können sowohl verschiedene szenario-definierende Parameter variiert als auch energiepolitische Maßnahmen (Investitionszuschüsse, Steuern) in verschiedenen Ausgestaltungsvarianten definiert werden. Zur Analyse der Wirkung einer energiepolitischen Maßnahmen wird nach deren Spezifikation ein Modell-Lauf unter der Zielvorgabe „minimiere monetäre Kosten“ ausgeführt. Indem einerseits die Abweichung der Ergebnisse bei Anwendung verschiedener energiepolitischer Maßnahmen von den Ergebnissen bei Anwendung des Kriteriums „minimiere monetäre Kosten“ (ohne Maßnahmen) sowie andererseits bei Anwendung der drei anderen Optimierungsziele verglichen werden, lassen sich die Wirkungen dieser Maßnahmen einschätzen.

### 5.1. Modellierung von Gebäude- und Heizsystembestand, Entscheidungsalgorithmus und Technologieoptionen

#### 5.1.1. Disaggregation des Gebäudebestands

Der Bestand an Wohngebäuden in Österreich wird in 30 *Gebäudeklassen* eingeteilt, wobei jede Gebäudeklasse durch Bauperiode und Gebäudegröße festgelegt wird.

---

<sup>22</sup> Als Datengrundlage dient „Wohnungen 2002“ (Statistik Austria 2003). Siehe auch Kap. 4.

<sup>23</sup> Das Referenz-Szenario wird in Kap. 6.2.1 spezifiziert.

Die Einteilung in 30 Gebäudeklassen basiert auf einem Klassifikationsschema von Statistik Austria (Statistik Austria 2003), in dem vier verschiedene Gebäudegrößen und sieben Bauperioden unterschieden werden.

Einteilung Gebäudegröße / Gebäudetyp:

- Einfamilienhaus
- Zweifamilienhaus
- kleines Mehrfamilienhaus (3 – 10 Wohneinheiten)
- großes Mehrfamilienhaus (mehr als 10 Wohneinheiten)

Einteilung Bauperioden:

- vor 1919
- 1919-1944
- 1945-1960
- 1961-1970
- 1971-1980
- 1981-1990
- nach 1990

Bei Kombination von vier Gebäudegrößen und sieben Bauperioden ergeben sich zunächst 28 Gebäudeklassen. Diese werden noch mit 2 Gebäudeklassen (kleine und große Mehrfamilienhäuser, errichtet vor 1919), in denen aus Denkmalschutzgründen Fassadendämmung nicht erlaubt ist, ergänzt.

Die Spezifikation einer bestimmten Gebäudeklasse enthält vor allem Informationen zu:

- Geometrie der Gebäudehülle; Anteile von Fenster- und Türflächen
- thermische Qualität (U-Werte<sup>24</sup>) der wesentlichen Bauteile (Aussenwand, oberste / unterste Geschoßdecke, Fenster, Türen)
- Anzahl von Wohnungen und Bewohner pro Gebäude
- Anzahl Gebäude pro Gebäudeklasse

Tab. 5.1: Spezifikation der Gebäudeklassen der Bauperiode 1961 – 1970, geometriebezogene Werte, für eine Übersicht über alle Gebäudeklassen siehe Anhang 1, Tab. A.1, Datenquellen: Statistik Austria (2003), Statistik Austria (2004), inkl. eigene Berechnungen und Annahmen

Gebäude- klasse	Bauperiode	Gebäudegröße	Wohn- gen pro Gebäude	Brutto- geschoss- fläche	Länge Seite 1 (m)	Länge Seite 2 (m)	Anzahl Geschosse	Geschoß- höhe (m)	Anteil Fenster- fläche (%)
OH 4	1961 - 1970	Einfamilienh.	1	154,78	10,32	7,50	2	3	11,89%
TH 4	1961 - 1970	Zweifamilienh.	2	262,01	15,36	8,53	2	2,9	12,21%
AHs 4	1961 - 1970	kleines Mfh.	5,56	562,70	18,37	10,21	3	2,9	15,79%
AHlg 4	1961 - 1970	großes Mfh.	18,54	1577,34	30,76	12,82	4	2,9	18,35%

<sup>24</sup> Def. U-Wert bzw. Wärmedurchgangskoeffizient (früher k-Wert) gibt die Energiemenge an, die in einer Sekunde durch einen Bauteil der Fläche von 1 m<sup>2</sup> fließt, wenn sich die beidseitig anliegenden Lufttemperaturen um 1 K unterscheiden. Der U-Wert dient also zur Bestimmung der Transmissionswärmeverluste durch Bauteile.

In der Spezifikation einer Gebäudeklasse ist noch keine Information zur wärmetechnischen Ausstattung von Gebäuden (Raumheizungs- und Warmwassersystem) enthalten. Um diese Informationen in der Modellierung integrieren zu können, wird in einem weiteren Schritt jede Gebäudeklasse in mehrere *Gebäudesegmente* unterteilt. Ein Gebäudesegment wird über eine bestimmte Kombination von Heiz- und Warmwassersystem definiert, bezogen auf eine bestimmte Gebäudeklasse.

Beispielsweise können alle zwischen 1961 und 1970 errichteten Einfamilienhäuser, welche mit einer Ölzentralheizung und ins Heizsystem integrierter Warmwasserbereitung ausgestattet sind, zu einem Gebäudesegment zusammengefasst werden.

Insgesamt sind im Modell über 800 Gebäudesegmente definiert.

Ein bestimmtes Gebäudesegment enthält hauptsächlich Informationen zu:

- Art des Raumheizsystems
- Art des Systems für die Warmwasserbereitung
- Zeitpunkt der Installation von Raumheizungssystem / Warmwasserbereitungssystem<sup>25</sup>
- Anzahl der Gebäude pro Segment
- Gebäudeklasse, der das Gebäudesegment zuzurechnen ist.

Tab. 5.2: Beispiele für die Spezifikation einiger Gebäudesegmente

Bezeichnung Gebäudesegment	Verweis auf Gebäudeklasse <sup>26</sup>	Anzahl Gebäude	Bezeichnung Heizsystem <sup>27</sup>	Bez. Warmwasserber.-system	Zeitpunkt Install. Heizsystem <sup>28</sup>	Zeitpunkt Install. WW-system
OH 1 12-1	5	12314	Stückholz zentral (w log c)	integriert ins Heizsystem (int)	1990	1990
OH 3 10-1	7	5953	Stückholz Einzelofen (w log s)	E-Speicher (el stor st al)	1978	1988
OH 4 30-1	8	18976	Öl zentral (oil c)	integriert (int)	1994	1994
TH 6 39-1	17	185	Gas zentral (gas c)	Solaranlage, ins Heizsystem integr. (sol int)	1998	1999
TH 1 33-1	12	611	E-Nachtspeicheröfen (el nstor s)	E-Speicher (el stor st al)	1990	1988
AHs 3 1-1	22	1244	Fernwärme Wien (dh Vie c)	integriert (int)	1995	1995
AHs 5 11-1	24	1133	Öl zentral (oil c)	integriert (int)	1995	1995
AHlg 1a 9-1	27	1270	dezentraler Mix (Erkl. siehe Kap.4. 2) (dec mix 1 m)	dezentraler Mix (dec mix 1 m)	-	-

<sup>25</sup> Neben Zeitpunkt der Installation des Wärmeerzeugers sind hier auch Zeitpunkt der Installation des Wärmeverteilsystems (Raumheizung, Warmwasser), der Installation der Wärmeabgabeflächen (Radiatoren), der Durchführung baulicher Maßnahmen (Lagerräume, Erdarbeiten bei Wärmepumpen) und der letzten Renovierung des Kamins erfasst.

<sup>26</sup> Dieser Verweis bezieht sich auf eine Zeilennummer in einer Tabelle, in der die Daten der Gebäudeklassen gespeichert sind.

<sup>27</sup> In Klammer stehen die im Modell als Kürzel verwendeten (englischen) Bezeichnungen.

<sup>28</sup> Installationszeitpunkt bezieht sich auf Wärmeerzeuger. Die Installationszeitpunkte anderer Komponenten des Heizsystems (z.B. Wärmeverteilung) können sich davon unterscheiden.

Ein Modellgebäude, welches sowohl Informationen über die Gebäudehülle als auch über die Art des Heiz-/Warmwassersystems enthält, repräsentiert alle Gebäude eines bestimmten Gebäudesegments. Dieses Modellgebäude stellt die Informationseinheit dar, die dem Entscheidungsverfahren unterworfen wird (siehe Kap. 5.1.2).

Falls Änderungen an der Gebäudehülle (Dämmung, neue Fenster) für ein bestimmtes Gebäudesegment gewählt werden, wird eine neue Gebäudeklasse kreiert, welche Informationen zu den Änderungen (geänderte U-Werte) enthält.

Die der Spezifikation der Gebäudesegmente zugrundeliegenden Datengrundlagen sind in Kap. 4 dargestellt<sup>29</sup>.

### 5.1.2. Der Entscheidungsalgorithmus

In der *Grundversion des Entscheidungsalgorithmus* wird für jedes Jahr der Simulationsperiode für jedes Gebäudesegment eine Entscheidung, ob dieses unverändert bleibt oder ob eine Maßnahme bezüglich Heiz-/Warmwassersystem und/oder Verbesserung der Gebäudehülle erfolgt, nach folgender Regel getroffen:

Falls

$$\min_i (Aw_{ges,i,t} - Aw_{lauf,0,t}) < 0, \quad i = 1 \dots n \quad (5.1)$$

dann wird jene Technologie / Maßnahme, bei der  $(Aw_{ges,i,t} - Aw_{lauf,0,t})$  minimal ist, gewählt, ansonsten passiert keine Änderung.

$Aw_{ges,i,t}$  Gesamtaufwendungen (Annuität der Investition + laufende Aufwendungen) im Sinne von Kosten, Treibhausgasemissionen oder Energieverbrauch für Technologie/Maßnahme  $i$  im Jahr  $t$  [EUR, kg, kWh]

$Aw_{lauf,0,t}$  Laufende Aufwendungen für die relevanten Energiedienstleistungen (Raumheizung, Warmwasserbereitung oder beides) mit dem existierenden System/Gebäude im Jahr  $t$  [EUR, kg, kWh]

$n$  Anzahl der Technologien / Maßnahmen, aus denen ausgewählt werden kann

Ausgewählt wird also die Maßnahme, die die geringsten Gesamtaufwendungen (Annuität plus laufender Betrieb) im Sinne von Kosten, Treibhausgasemissionen oder Energieverbrauch verursacht, wobei eine Maßnahme nur dann durchgeführt wird, falls die Gesamtaufwendungen geringer sind als die laufenden Aufwendungen unter den bestehenden Bedingungen<sup>30</sup>.

<sup>29</sup> Ausgehend von diesen Datengrundlagen musste mit einer Reihe von eigenen Annahmen / Schätzungen gearbeitet werden, um das in dieser Arbeit verwendete Detaillierungsniveau (mehr als 800 Gebäudesegmente) erreichen zu können.

<sup>30</sup> Dies gilt für die Grundversion des Entscheidungsalgorithmus. Maßnahmen werden auch nach Überschreiten von technischen Nutzungsdauern durchgeführt (siehe unten).

$Aw_{ges,i,t}$  und  $Aw_{lauf,0,t}$  sind wie folgt definiert:

$$Aw_{ges,i,t} = I_{i,t} \cdot \alpha_i + \sum_{k=1}^2 b_{i,k} \cdot (E_{i,k,t} \cdot p_{i,k,t} + o_{i,k,t}) \quad (5.2)$$

$$Aw_{lauf,0,t} = \sum_{k=1}^2 b_{0,k} \cdot (E_{0,k,t} \cdot p_{0,k,t} + o_{0,k,t}) \quad (5.3)$$

$t$	aktuelles Jahr
$i$	Index für Technologien/Maßnahmen
$k$	Index für Energiedienstleistungen, k=1 ... Raumheizung, k=2 ... Warmwasserbereitung
$I_{i,t}$	Gesamtaufwand (Kosten, Treibhausgasemissionen oder Energieverbrauch) für die Investition in Technologie/Maßnahme i im Jahr t [-€ kg, kWh]
$\alpha_i$	Annuitätenfaktor für Technologie / Maßnahme i [-]
$b_{i,k}$	binäre Variable, die festlegt, ob Technologie i die Energiedienstleistung k bereitstellt (k=1 ... Raumheizung, k=2 ... Warmwasserbereitung) $b_{i,k}=0$ ... Technologie i stellt Energiedienstleistung k nicht bereit $b_{i,k}=1$ ... Technologie i stellt Energiedienstleistung k bereit
$b_{0,k}$	binäre Variable, die festlegt, ob Energiedienstleistung k relevant ist, um $Aw_{lauf,0,t}$ zu berechnen; bei der Berechnung von $(Aw_{ges,i,t} - Aw_{lauf,0,t})$ sind für $Aw_{ges,i,t}$ und $Aw_{lauf,0,t}$ jeweils die gleichen Energiedienstleistungen zu berücksichtigen <sup>31</sup>
$E_{i,k,t}$	Endenergiebedarf für Energiedienstleistung k nach der Implementierung der Technologie/Maßnahme i im Jahr t [kWh]
$E_{0,k,t}$	Endenergiebedarf für Energiedienstleistung k mit der existierenden Struktur (Heizsystem, Gebäude) im Jahr t [kWh]
$p_{i,k,t}$	falls Optimierungsziel = „minimiere monetäre Kosten“: Energieträgerpreis für Energiedienstleistung k nach Implementierung der Technologie/Maßnahme i im Jahr t [EUR/kWh]  falls Optimierungsziel = „minimiere soziale Kosten“: Energieträgerpreis + Aufschlag für externe Kosten für Energiedienstleistung k nach Implementierung der Technologie/Maßnahme i im Jahr t [EUR/kWh]  falls Optimierungsziel = „minimiere Treibhausgasemissionen“: spezifische Treibhausgasemissionen pro Endenergie für Energiedienstleistung k nach Implementierung der Technologie/Maßnahme i im Jahr t [kg/kWh]  falls Optimierungsziel = „minimiere Energieverbrauch“: spezifischer grauer Energieverbrauch pro Endenergie für Energiedienstleistung k nach Implementierung der Technologie/Maßnahme i im Jahr t [kWh/kWh]

<sup>31</sup> Das bedeutet beispielsweise, falls die neue Technologie i nur Raumheizung bereitstellt, dass die Gesamtaufwendungen  $Aw_{ges,i,t}$  nur mit den laufenden Kosten der Raumheizung für die existierende Struktur verglichen werden.

- $p_{0,k,t}$  analog zu  $p_{i,k,t}$ , allerdings für die existierende Struktur (bezüglich Heizsystem und Gebäude) im Jahr t
- $o_{i,k,t}$  Aufwände (Kosten, Treibhausgasemissionen oder Energieverbrauch) für Betrieb und Wartung in Zusammenhang mit der Energiedienstleistung k nach Implementierung der Technologie/Maßnahme i im Jahr t [€ kg, kWh]
- $o_{0,k,t}$  Aufwände (Kosten, Treibhausgasemissionen oder Energieverbrauch) für Betrieb und Wartung in Zusammenhang mit der Energiedienstleistung k mit der existierenden Struktur im Jahr t [€ kg, kWh]

Der Annuitätenfaktor wird unter Annahme des Optimierungsziels „minimiere monetäre Kosten“ nach folgender Formel<sup>32</sup> berechnet:

$$\alpha_{m,i} = \frac{\frac{z}{100} \cdot \left(1 + \frac{z}{100}\right)^{N_{k,i}}}{\left(1 + \frac{z}{100}\right)^{N_{k,i}} - 1} \quad (5.4)$$

- $\alpha_{m,i}$  monetärer Annuitätenfaktor für Technologie / Maßnahme i (der Index m steht für monetär) [-]
- z Zinssatz (auch als Diskontsatz, Diskontrate oder Diskontierungsrate bezeichnet) [%]
- $N_{k,i}$  kalkulatorische Nutzungsdauer für Technologie / Maßnahme i [a]

Die kalkulatorische Nutzungsdauer ist eine mikroökonomische Größe und repräsentiert den für den Investor relevanten Abschreibungszeitraum. Die kalkulatorische Nutzungsdauer liegt in der Regel unter der technischen Nutzungsdauer.

Im Modell ist die kalkulatorische Nutzungsdauer für Erneuerung des Heiz- bzw. Warmwasserbereitungssystems mit 10 Jahren, für Maßnahmen an der Gebäudehülle mit 15 Jahren festgelegt.

Unter Annahme der Optimierungsziele „minimiere Treibhausgasemissionen“ sowie „minimiere Energieverbrauch“ vereinfacht sich die Berechnung des Annuitätenfaktors. Der Zinssatz fließt hier nicht ein, die kalkulatorische Nutzungsdauer wird durch die technische Nutzungsdauer ersetzt. Eine Zusammenstellung von technischen Nutzungsdauern, welche im Modell zur Berechnung von technischen Annuitätenfaktoren herangezogen werden, zeigt Tabelle 5.3.

$$\alpha_{t,i} = \frac{1}{N_{t,i}} \quad (5.5)$$

- $\alpha_{t,i}$  technischer Annuitätenfaktor für Technologie / Maßnahme i [-]
- $N_{t,i}$  technische Nutzungsdauer für Technologie / Maßnahme i [a]

<sup>32</sup> Diese Formel basiert auf der Investitionsrechnung nach der Annuitätenmethode.

Tab. 5.3: Technische Nutzungsdauern, welche im Modell zur Berechnung von technischen Annuitätenfaktoren herangezogen werden

Maßnahme	technische Lebensdauer
neues Heizsystem	20
neues Warmwasserbereitungssystem	20
neue Fenster (PVC)	35
neue Fenster (Holz)	30
Dämmung von oberster Geschoßdecke / Kellerdecke	40
Dämmung der Fassade	35

Für den Fall der Anwendung des Optimierungsziels „minimiere soziale Kosten“ wird für die Berechnung der Annuität der Investition sowohl der monetäre als auch der technische Annuitätenfaktor verwendet<sup>33</sup>.

Der Term  $I_{i,t} \cdot \alpha_i$  aus Formel 5.2 wird ersetzt durch:

$$I_{i,t,m} \cdot \alpha_{i,m} + I_{i,t,e} \cdot \alpha_{i,t} \quad (5.6)$$

$I_{i,t,m}$  monetäre Kosten der Investition in Technologie/Maßnahme i im Jahr t [€]

$I_{i,t,e}$  externe Kosten der Investition in Technologie/Maßnahme i im Jahr t [€]

Die Grundversion des Entscheidungsalgorithmus wird durch zwei Elemente ergänzt:

- Nach Ablauf der technischen Nutzungsdauer einer Technologie bzw. eines Bauteils wird eine Neuinvestition vom Modell erzwungen. In diesem Fall wird die Maßnahme mit den geringsten Gesamtaufwendungen gewählt, auch wenn diese über den laufenden Kosten liegen.
- Nach Durchführung einer Maßnahme gibt es einen Zeitraum, innerhalb dessen keine Maßnahme im gleichen Bereich durchgeführt werden darf. Diese Zeiträume sind für Erneuerung des Heiz- bzw. Warmwasserbereitungssystems mit 10 Jahren, für Maßnahmen an der Gebäudehülle mit 15 Jahren festgelegt.

<sup>33</sup> Für die Berechnung der Annuität des Anteils der externen Kosten an den (sozialen) Investitionskosten wird also die Diskontrate 0 verwendet. Eine Diskontrate von 0 bewertet Gegenwart und Zukunft gleich und ihre Anwendung ist im Sinne einer aus Nachhaltigkeitsgründen geforderten intergenerationellen bzw. intertemporalen Gerechtigkeit begründbar. Der Anteil der externen Kosten an den Investitionskosten ist aber im Vergleich zu den monetären Kosten bei den hier betrachteten Technologien sehr gering (siehe Kap. 5.3.4 und Tab. 6.20), weshalb die Wahl der Diskontrate in diesem Zusammenhang geringe Bedeutung hat.

### 5.1.3. Berücksichtigung von Restriktionen

Um die Anpassung an realistische bzw. plausible Bedingungen zu ermöglichen, ist es im Modell möglich, für drei Kategorien von Restriktionen für jedes Jahr der Simulationsperiode Festlegungen zu treffen<sup>34</sup>.

#### *1. Verfügbarkeit von Ressourcen:*

Damit ist die maximal pro Jahr verfügbare Menge eines bestimmten Energieträgers für die betrachteten Anwendungsbereiche gemeint. Im Modell wird diese Restriktion für Biomasse-Brennstoffe angewandt, ist aber prinzipiell für alle Brennstoffe anwendbar.

#### *2. Durchdringungsraten von Technologien:*

Eine maximal mögliche Durchdringungsrate bestimmt den maximalen relativen Anteil (bezogen auf Wohneinheiten) des Einsatzes einer bestimmten Technologie in einem bestimmten Jahr. Die Spezifikation von maximalen Durchdringungsraten ist insbesondere für neue / unkonventionelle Technologien bzw. bei Technologien, wo mit einer geringen Akzeptanz zu rechnen ist, relevant.

#### *3. Austausch- /Renovierungsraten:*

Eine maximale Austausch- bzw. Renovierungsrate<sup>35</sup> bestimmt den maximalen relativen Anteil (bezogen auf Wohneinheiten) der Durchführung einer bestimmten Maßnahme in einem bestimmten Jahr<sup>36</sup>.

Um maximale Austauschraten im Modell berücksichtigen zu können, ist ein zweistufiger Ablauf für jedes Jahr der Simulationsperiode notwendig. In der ersten Stufe erfolgt ein Modell-Lauf ohne Berücksichtigung maximaler Austauschraten. Danach werden die resultierenden Austauschraten dieses Laufs mit den festgelegten maximalen Austauschraten verglichen und für jedes Gebäudesegment, das gemäß der Grundversion des Entscheidungsalgorithmus geändert werden soll, entschieden, ob alle Gebäude dieses Segments einer Änderung unterworfen werden oder ob nur ein Teil der Gebäude geändert wird und ein Teil unverändert bleibt. In diesem Fall wird ein Gebäudesegment in zwei Teile gespalten.

---

<sup>34</sup> Auf die tatsächlich im Modell verwendeten Werte, die Restriktionen betreffend, wird im Kap. 6.2 eingegangen.

<sup>35</sup> Im Fall von Heizsystemen ist der Begriff Austauschrate, im Fall der Dämmung der Bauteile der Begriff Renovierungsrate passender.

<sup>36</sup> Es kann also z.B. festgelegt werden, dass Fenstertausch nur in x% aller Wohneinheiten in einem Jahr erfolgen darf.

### Übersicht über Modell-Algorithmus

#### Schleife vom Startjahr zum Endjahr

- Berechnung des Verbrauchs pro Energieträger und der Durchdringungsraten pro Technologie (für das Vorjahr) und Bestimmung, ob Grenzwerte bezüglich maximaler Ressourcenverfügbarkeit und maximaler Durchdringungsraten überschritten werden.
- Falls Grenzwerte bezüglich maximaler Ressourcenverfügbarkeit und maximaler Durchdringungsraten überschritten werden, werden entsprechende Energieträger bzw. Technologien von der Simulation ausgeschlossen.
- Durchführung der Grundversion des Entscheidungsalgorithmus für jedes Gebäudesegment; Speicherung von Zwischenergebnissen
- Berechnung von Austauschraten
- Berücksichtigung von Restriktionen bezüglich Austauschraten; Aufspalten von Gebäudesegmenten; Speicherung der Endergebnisse

#### 5.1.4. Übersicht über Technologieoptionen / Maßnahmen

Die möglichen Maßnahmen, die jährlich zur Auswahl offen stehen, sind unterteilt in Einzelmaßnahmen und kombinierte Maßnahmen.

Zu den *Einzelmaßnahmen* zählen

- Wechsel des Warmwasserbereitungssystems
- Wechsel des Raumheizsystems
- Fenstertausch
- Dämmung der Fassade
- Dämmung der obersten Geschoßdecke
- Dämmung von Kellerdecke / Bodenplatte

Zu den kombinierten Maßnahmen zählen

- Wechsel von Heiz- und Warmwassersystem
- Dämmung der Fassade und Fenstertausch
- thermische Verbesserung der gesamten Gebäudehülle (= Dämmung von Fassade, oberster und unterster Geschoßdecke und Fenster)
- Generalsanierung (= thermische Verbesserung der gesamten Gebäudehülle + Wechsel von Heiz- und ev. Warmwasserbereitungssystem)

Innerhalb jedes Technologiebereichs steht eine breite Palette an Optionen offen:

Raumheizung / Warmwasserbereitung:

- 20 verschiedene Optionen für Systeme zur Raumheizung (mit optionaler Warmwasser-Integration, siehe Tabelle 5.4)
- 5 verschiedene Optionen für Einzelsysteme zur Warmwasserbereitung (siehe Tabelle 5.5)
- Solaranlagen zur Warmwasserbereitung und Solar-Kombisysteme

Maßnahmen an der Gebäudehülle: (siehe Tabellen 5.6 und 5.7)

- Dämmung der Fassade (9 verschiedene Dämmstoffe)
- Dämmung der obersten Geschoßdecke (10 verschiedene Dämmstoffe)
- Dämmung von Kellerdecke / Bodenplatte (9 verschiedene Dämmstoffe)
- neue Fenster (6 verschiedene Fenstertypen)

Tab. 5.4: Übersicht über Optionen für Systeme zur Raumheizung (mit optionaler Warmwasser-Integration)

<i>Bezeichnung Wärmeerzeuger</i>	<i>integrierte Warmwasserber. möglich</i>	<i>Integration von Solarsystemen möglich</i>
Stückholzkessel	✓	✓
Hackschnitzelkessel	✓	✓
Pelletsessel	✓	✓
Pelletsofen Luft		
Pelletsofen Wasser	✓	✓
Gaskessel	✓	✓
Gas-Kombitherme	✓	
Gas-Brennwertkessel	✓	✓
Ölkessel	✓	✓
Öl-Brennwertkessel	✓	✓
Kohlekessel	✓	✓
Fernwärme (Wien)	✓	✓
Fernwärme (Rest)	✓	✓
Fernwärme Biomasse	✓	✓
Wärmepumpe Luft-Wasser	✓	✓
Wärmepumpe Sole	✓	✓
Wärmepumpe Sole Tiefenbohrung	✓	✓
Wärmepumpe Wasser/Wasser <sup>37</sup>	✓	✓
E-Konvektoren		
E-Nachtspeicheröfen		

<sup>37</sup> Die Begriffe Wasser/Wasser-Wärmepumpe und Grundwasser-Wärmepumpe werden in dieser Arbeit synonym verwendet.

Tab. 5.5: Übersicht über Optionen für Einzelsysteme zur Warmwasserbereitung

Wärmeerzeuger zur Warmwasserbereitung, Einzelsysteme	Kommentar
Elektro-Speicher (dezentral)	ein Speicher pro Wohneinheit
Elektro-Speicher (zentral)	ein Speicher pro Gebäude
Elektro-Durchlauferhitzer	pro Wohneinheit
Warmwasser-Wärmepumpe	nur für Ein- und Zweifamilienhäuser
Solar-Warmwasser	ein System pro Gebäude, Zusatzheizung elektrisch (sonst fallen Solaranlagen unter ins Heizsystem integrierte Systeme)

Tab. 5.6: Übersicht über Optionen für Dämmsysteme (Dämmstoffe nach Bauteil und Konstruktionsvariante)

	Fassade		oberste Geschößdecke		unterste Geschößdecke	
	Ausführung Standard / billig	Ausführung Holzkonstruktion	Ausführung Standard / billig	Ausführung Holzkonstruktion	Ausführung Standard / billig	Ausführung Holzkonstruktion
<i>Dämmstoff</i>						
EPS	✓		✓		✓	
Steinwolle	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Glaswolle	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zellulose		✓		✓		✓
Korkplatten	✓		✓		✓	
Korkschrot				✓		✓
Flachs		✓		✓		✓
Hanf	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Schafwolle		✓		✓		✓
Holzweichfaserplatte		✓	✓	✓	✓	✓
Perlite				✓		

Tab. 5.7: Übersicht über Optionen für Fenster

Rahmenmaterial	U-Wert gesamtes Fenster
PVC	1,3
PVC	1,1
PVC	0,8
Holz	1,3
Holz	1,1
Holz	0,8

### 5.1.5 Berechnung von Dämmstoffdicken

Als optimale Dämmstoffdicke wird diejenige definiert, bei der der Gesamtaufwand (im Sinn von Kosten, Treibhausgasemissionen oder Energieverbrauch), der sich aus der Summe von jährlichem Aufwand für die Dämmung und jährlichem Aufwand für Energieverbrauch nach Durchführung der Dämm-Maßnahme ergibt, ein Minimum aufweist.

Für die optimale Dämmdicke  $d_{opt}$  gilt also:

$$Aw_{ges}(d_{opt}) = \min_{d > 0} Aw_{ges}(d) \quad (5.7)$$

wobei:

$$Aw_{ges}(d) = \alpha \cdot Aw_D(d) + Aw_{Ev}(d) \quad (5.8)$$

$Aw_{ges}$  jährlicher Gesamtaufwand (für Dämmung und Energieverbrauch) pro Bauteilfläche in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke [ $\text{€m}^2 \cdot \text{a}$ ,  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{a}$ ,  $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ ]

$Aw_D$  Aufwand für Dämmung pro Bauteilfläche in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke [ $\text{€m}^2 \cdot \text{a}$ ,  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{a}$ ,  $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ ]

$Aw_{Ev}$  jährlicher Aufwand für Energieverbrauch (= Kompensation der Transmissionsverluste) pro Bauteilfläche in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke [ $\text{€m}^2 \cdot \text{a}$ ,  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{a}$ ,  $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ ]

$\alpha$  Annuitätenfaktor

$d$  Dämmstoffdicke [cm]

Weiters werden  $Aw_D$  und  $Aw_{Ev}$  und daraus resultierend  $Aw_{ges}$  folgendermaßen bestimmt:

$$Aw_D(d) = Aw_f + Aw_v \cdot d \quad (5.9)$$

$$Aw_{Ev}(d) = \frac{Vl_{T, Bt, sp}(d) \cdot f_s \cdot p_{Et}}{\eta_{RH}} \quad (5.10)$$

$$Vl_{T, Bt, sp}(d) = \frac{U_{Bt, neu}(d) \cdot F_{Bt} \cdot HGT \cdot 24}{1000} \quad (5.11)$$

$$U_{Bt, neu}(d) = \frac{1}{\frac{d}{100 \cdot \lambda_D} + \frac{1}{U_{Bt}}} \quad (5.12)$$

⇒

$$Aw_{ges}(d) = \alpha \cdot (Aw_f + Aw_v \cdot d) + \frac{\frac{1}{\frac{d}{100 \cdot \lambda_D} + \frac{1}{U_{Bt}}} \cdot F_{Bt} \cdot HGT \cdot 24 \cdot f_s \cdot p_{Et}}{\eta_{RH} \cdot 1000} \quad (5.13)$$

$Aw_f$	fixer Aufwand für Dämmung pro Fläche (nicht abhängig von der Dämmstoffdicke) [ $\text{€m}^2$ ]
$Aw_v$	volumensabhängiger Aufwand (monetäre Kosten, soziale Kosten, Treibhausgasemissionen, graue Energie) der Dämmung (pro $\text{m}^2$ Bauteilfläche und cm Dämmstoffdicke) [ $\text{€m}^2\cdot\text{cm}$ , $\text{kg/m}^2\cdot\text{cm}$ , $\text{kWh/m}^2\cdot\text{cm}$ ]
$V_{T,Bt,sp}$	Jährliche spezifische Transmissionsverluste des Bauteils Bt in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke [ $\text{kWh/m}^2\cdot\text{a}$ ]
$f_s$	Benutzungsfaktor [-]
$p_{Et}$	falls Optimierungsziel = „minimiere monetäre Kosten“: Preis des Energieträgers (pro Endenergie) [ $\text{€kWh}$ ]  falls Optimierungsziel = „minimiere soziale Kosten“: Preis + externe Kosten für Energieträger (pro Endenergie) [ $\text{€kWh}$ ]  falls Optimierungsziel = „minimiere Treibhausgasemissionen“: spezifische Treibhausgasemissionen Energieträger (pro Endenergie) [ $\text{kg/kWh}$ ]  falls Optimierungsziel = „minimiere Energieverbrauch“: spezifische grauer Energieverbrauch Energieträger (pro Endenergie) [ $\text{kWh/kWh}$ ]
$\eta_{RH}$	Jahresnutzungsgrad des Raumheizsystems
$U_{Bt,neu}$	U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) des betrachteten Bauteils Bt nach Durchführung der Dämm-Maßnahme in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]
$F_{Bt}$	Korrekturfaktor, der die verminderte Temperaturdifferenz von nicht an Außenluft grenzenden Bauteilen berücksichtigt, =1, falls Außenbauteil [-]
$HGT$	Heizgradtage [Kd]
$\lambda_D$	Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs [ $\text{W/mK}$ ]
$U_{Bt}$	U-Wert des betrachteten Bauteils Bt vor der Dämm-Maßnahme [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]

Die Berechnung des Minimums der Funktion  $Aw_{ges}$  durch Nullsetzen der 1. Ableitung von  $Aw_{ges}$  ( $Aw'_{ges} = 0$ ) liefert folgenden Wert für die optimale Dämmdicke  $d_{opt}$ .<sup>38</sup>

$$d_{opt} = \frac{-100 \cdot \lambda_D}{U_{Bt}} + \sqrt{\frac{24 \cdot HGT \cdot f_s \cdot F_{Bt} \cdot p_{Et} \cdot \lambda_D}{\eta_{RH} \cdot \alpha \cdot Aw_v \cdot 10}} \quad (5.14)$$

Während der Aufwand (im Sinn von Kosten, Treibhausgasemissionen oder Energieverbrauch) für die Dämmung mit zunehmender Dämmstoffdicke linear ansteigt<sup>39</sup>,

<sup>38</sup> Unter Anwendung des Optimierungsziels „minimiere soziale Kosten“ wird in Formel 5.14  $\alpha \cdot Aw_v$  durch  $\alpha_m \cdot Aw_{v,mon} + \alpha_t \cdot Aw_{v,ext}$  ersetzt, wobei  $\alpha_m$  monetäre Annuität,  $\alpha_t$  technische Annuität,  $Aw_{v,mon}$  monetäre variable Kosten der Dämmung  $Aw_{v,ext}$  externe variable Kosten der Dämmung repräsentieren. Unter Anwendung der Optimierungsziele „minimiere Treibhausgasemissionen“ und „minimiere Energieverbrauch“ kommt jeweils der technische Annuitätenfaktor zur Anwendung.

<sup>39</sup> Dies gilt zumindest in einer modellhaften Vereinfachung. In der Praxis können leichte nicht-lineare Einflüsse wirksam werden, z.B. aufwendigere Befestigungssysteme bei größeren Dämmdicken.

sinkt der Energieverbrauch und die damit verbundenen Aufwände mit zunehmender Dämmstoffdicke nicht-linear. Die zusätzliche Einsparung an Energieverbrauch pro weiterem cm Dämmstoffdicke bzw. die „Grenz-Einsparung“ sinkt.

Das Optimum der Dämmstoffdicke liegt also in dem Punkt, wo „Grenz-Kosten“ der Dämmung gleich den „Grenz-Einsparungen“ sind.

Abb. 5.1 stellt diesen Zusammenhang für den Fall einer Fassadendämmung mit EPS (U-Wert vor der Dämmung = 1,25) graphisch dar, die der Berechnung zugrundeliegenden Annahmen sind im Anhang 2 dokumentiert. Das Minimum der Gesamtkosten für den in Abb. 5.1 dargestellten Fall liegt zwischen 8 und 9 cm (genau bei 8,51 cm).

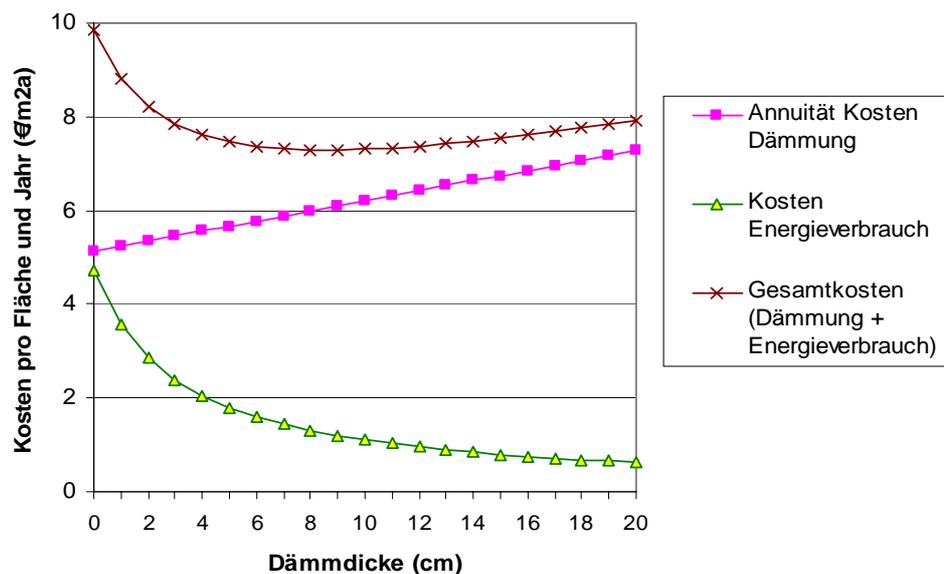


Abb. 5.1: Monetäre Kosten für Dämmung, für Energieverbrauch und monetäre Gesamtkosten pro Fläche pro Jahr; Bauteil Außenwand

Wesentliche Parameter, die den Wert der optimalen Dämmstoffdicke beeinflussen, sind der thermische Ausgangszustand des Bauteils (U-Wert vor Dämmung), der variable Aufwand für die Dämmung, spezifische Aufwände für den eingesetzten Energieträger und Höhe des Annuitätenfaktors.

Der Wert für die optimale Dämmdicke wird höher:

- je schlechter der thermische Ausgangszustand des Bauteils ist;
- je niedriger die variablen Aufwände für die Dämmung sind;
- je höher die spezifischen Aufwände für den eingesetzten Energieträger sind;
- je niedriger der Annuitätenfaktor ist.

Je nach eingesetztem Dämmstoff und Ausführungsvariante können aufgrund der unterschiedlichen variablen Kosten bei sonst gleichen Rahmenbedingungen die optimalen Dämmstoffdicken in einer Größenordnung eines Faktor 2 variieren (siehe Tabelle 5.8, Optimierungsziel „minimiere monetäre Kosten“).

Tabelle 5.8: Variable Kosten der Dämmung und optimale Dämmstoffdicken für verschiedene Dämmstoffe und Ausführungsvarianten der Dämmung, Optimierungsziel „minimiere monetäre Kosten“, Annahmen (außer für variable Kosten der Dämmung) siehe Anhang 2

Dämmstoff	Ausführung der Dämmung	variable Kosten der Dämmung [€/m <sup>2</sup> .cm]	optimale Dämmstoffdicke [cm]
EPS	Wärmedämmverbundsystem (WDVS)	1,2	8,5
Steinwolle	WDVS	1,62	7,3
Steinwolle	Holzkonstruktion	3,15	4
Zellulose	Holzkonstruktion	1,57	7,6
Korkplatten	WDVS	2,45	5,2
Flachs	Holzkonstruktion	2,45	5,2
Hanf	Holzkonstruktion	1,73	7
Hanf	WDVS	2,7	4,7
Schafwolle	Holzkonstruktion	2,1	5,9
Holzfaserplatte	Holzkonstruktion	2,2	5,8

Bei einem Vergleich der optimalen Dämmstoffdicken unter Annahme der vier verschiedenen Optimierungsziele ergeben sich teilweise gravierende Unterschiede. Während unter „minimiere soziale Kosten“ die optimale Dämmstoffdicke nur geringfügig höher (22% im dargestellten Beispiel, siehe Tabelle 5.9) ist im Vergleich zu „minimiere monetäre Kosten“, sind die optimalen Dämmstoffdicken unter „minimiere Treibhausgasemissionen“ und „minimiere Energieverbrauch“ deutlich höher und dringen mit Werten über 50 cm in einen Bereich jenseits von praktischer Relevanz vor (siehe Tabelle 5.9).

Diese hohen Werte resultieren daher, dass erstens die variablen Aufwände (Treibhausgasemissionen, Energieverbrauch) für die Dämmung in Relation zu den spezifischen Aufwänden der Nutzung des Energieträgers wesentlich geringer sind, zweitens der niedrigere technische Annuitätsfaktor zur Berechnung herangezogen wird.

Tabelle 5.9: Vergleich von optimalen Dämmstoffdicken nach Optimierungskriterium, Annahmen siehe Anhang 2

Optimierungsziel	optimale Dämmstoffdicke [cm]
minimiere monetäre Kosten	8,51
minimiere soziale Kosten	10,45
minimiere Treibhausgasemissionen	56,1
minimiere Energieverbrauch	54,3

Um Werte für Dämmstoffdicken in einem für die Praxis relevanten Bereich zu halten, sind im Modell Unter- und Obergrenzen für Dämmstoffdicken festgelegt (siehe Tab. 5.10).

*Tabelle 5.10: Unter- und Obergrenzen für Dämmdicken (in cm), im Modell verwendete Werte*

	<i>Fassade</i>	<i>Oberste Geschoßdecke</i>	<i>Kellerdecke / Fußboden</i>
<i>minimale Dämmstoffdicke [cm]</i>	5	5	3
<i>maximale Dämmstoffdicke [cm]</i>	25	25	15

## 5.2. Modellierung des Energiebedarfs

Grundsätzlich wird der Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser in Abhängigkeit vom Energiedienstleistungsbedarf und Effizienz des Wärmeerzeugungssystems abgebildet.

$$E = S/\eta \quad (5.15)$$

$E$  Endenergiebedarf

$S$  Energiedienstleistungs-(Service)bedarf bzw. Nutzenergiebedarf

$\eta$  Effizienz des Wärmeerzeugungssystems

### 5.2.1 Raumwärme

Der Endenergiebedarf für Raumheizung wird gemäß folgender Formel berechnet:

$$E_{RH, Mod} = \frac{24 \cdot p_0 \cdot HGT \cdot A_{BGF} \cdot f_s}{1000 \cdot \eta_{RH}} \quad (5.16)$$

$E_{RH, Mod}$  Jahres-Endenergiebedarf für Raumheizung pro Gebäude (im Modell verwendete Berechnung), [kWh/a]

$p_0$  spezifische Heizlast eines Gebäudes bezogen auf die Bruttogeschosßfläche [W/m<sup>2</sup>(BGF)K]

$HGT$  Heizgradtage [K.Tage]

$A_{BGF}$  Bruttogeschosßfläche

$f_s$  Benutzungs- bzw. Servicefaktor [-]

$\eta_{RH}$  Jahresnutzungsgrad des Raumheizsystems, Def.: von den Wärmeabgabeflächen abgegebene Energie in Relation zu Endenergieeinsatz für Raumheizung [-]

Die Berechnung der Heizlast  $p_0$  orientiert sich an den Vorgaben der ÖNORM B8135. In dieser Art der Berechnung wird die Heizlast als Summe von Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten berechnet, innere und solare Gewinne sind nicht berücksichtigt<sup>40</sup>.

Der Jahresnutzungsgrad der Raumheizung ist als Verhältnis von Nutz- zu Endenergie definiert:

$$\eta_{RH} = \frac{E_{RH, Nutz}}{E_{RH, End}} \quad (5.17)$$

$E_{RH, Nutz}$  von den Wärmeabgabeflächen abgegebene Energie (inkl. der Verteil- und ev. Speicherverluste, die der Raumheizung zugute kommen) [kWh/a]

$E_{RH, end}$  Endenergieverbrauch für Raumheizung [kWh/a]

<sup>40</sup> Eine detaillierte Darstellung der Berechnung der Heizlast von Gebäuden findet sich beispielsweise in Haas(1999).

Aspekte des Benutzerverhaltens (wie Wahl der Innenraumtemperatur oder Lüftungsverhalten) werden in der Berechnung gemäß Formel 5.16 durch den Benutzungsfaktor (auch als Servicefaktor bezeichnet)  $f_s$  berücksichtigt. Dieser Parameter drückt die Relation zwischen tatsächlichem gemessenen Endenergieverbrauch ( $E_{RH,pr}$ ) und berechnetem theoretischen Endenergiebedarf ( $E_{RH,th}$ ) für Raumheizung aus, wobei der theoretische Endenergiebedarf nach Formel 5.19 berechnet wird (Haas et al. 1998, Haas/Biermayr 2000).

$$f_s = \frac{E_{RH,pr}}{E_{RH,th}} \quad (5.18)$$

$$E_{RH,th} = \frac{24 \cdot p_0 \cdot HGT \cdot A_{BGF}}{1000 \cdot \eta_{RH}} \quad (5.19)$$

Werte für den Benutzungsfaktor  $f_s$  werden in Abhängigkeit des Gebäudetyps (Ein- versus Mehrfamilienhaus), der thermischen Qualität des Gebäudes (ausgedrückt durch den theoretischen (kalkulatorischen) Heizendenergiebedarf) und des Automatisierungsgrads des Heizsystems modelliert. Empirische Daten für Benutzungsfaktoren in Abhängigkeit von Gebäudetyp und Automatisierungsgrad des Heizsystems sind der Arbeit von Biermayr (1999) entnommen (siehe Tab. 5.11) und unter zusätzlicher Einbeziehung der thermischen Gebäudequalität für die Verwendung im Modell angepaßt (siehe Tab. 5.12).

Tabelle 5.11: Benutzungsfaktoren in Abhängigkeit von Gebäudetyp und Automatisierungsgrad des Heizsystems, Werte nach Biermayr (1999)

Gebäudetyp \ Automatisierungsgrad	Ein-/Zweifamilienhaus	Mehrfamilienhaus
nicht automatisiert	0,472	0,612
automatisiert	0,582	0,655

Tabelle 5.12: Benutzungsfaktoren in Abhängigkeit von Gebäudetyp, Automatisierungsgrad des Heizsystems und Heizenergiebedarf, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: Biermayr (1999), Biermayr et al. (2004), eigene Annahmen

		theoretischer Heizendenergiebedarf ( $kWh/m^2(BGF)a$ )				
		50	100	200	300	400
Gebäudetyp	Art des Heizsystems					
Ein-/Zweifamilienhaus	nicht automatisiert	0,54	0,52	0,47	0,45	0,43
Ein-/Zweifamilienhaus	automatisiert	0,72	0,65	0,59	0,56	0,54
Mehrfamilienhaus	nicht automatisiert	0,7	0,65	0,61	0,59	0,57
Mehrfamilienhaus	automatisiert	0,77	0,71	0,65	0,63	0,62

Wie Tabelle 5.12 zu entnehmen ist, ergeben sich beim Vergleich von Benutzungsfaktoren folgende Zusammenhänge:

- Benutzungsfaktoren sind für Einfamilienhäuser geringer als für Mehrfamilienhäuser.
- Gebäude mit nicht-automatisierten Heizsystemen (Einzelofenheizungen) weisen einen deutlich geringeren Benutzungsfaktor auf als solche mit automatisierten Heizsystemen (Zentralheizungen).
- Mit zunehmender thermischer Qualität der Gebäudehülle steigt der Benutzungsfaktor.

Die Steigerung des Benutzungsfaktors bei Umstieg von nicht-automatisierte auf automatisierte Heizsysteme und/oder bei Verbesserung der der thermischen Qualität der Gebäudehülle wird unter dem Begriff „Rebound-Effekt“ subsumiert (Haas/Biermayr 2000).

Die Entwicklung von Jahresnutzungsgraden für Raumheizungs- und Warmwasserbereitungssysteme wird in zweifacher Hinsicht dynamisch modelliert: einerseits wird der Jahresnutzungsgrad in Abhängigkeit des Jahrs der Inbetriebnahme berechnet (je jünger die Anlage, desto höher der Jahresnutzungsgrad), andererseits wird eine kontinuierliche Verschlechterung bzw. Verringerung des Jahresnutzungsgrads während der Betriebszeit der Anlagen angenommen.

Für die Bestimmung des Jahresnutzungsgrads in Abhängigkeit des Jahrs der Inbetriebnahme werden für drei Zeitpunkte (1985, 2000, 2050) Referenz-Jahresnutzungsgrade festgelegt (siehe Tabelle 5.13), zwischen diesen Zeitpunkt wird linear interpoliert.

Die Berücksichtigung der kontinuierlichen Verringerung des Jahresnutzungsgrads erfolgt nach folgender Formel:

$$\eta_{RH}(t) = \eta_{RH}(t_0) \cdot \text{deg}_{RH}^{\Delta t} \quad (5.20)$$

$\eta_{RH}(t)$	Jahresnutzungsgrad für Raumheizung im Jahr t
$\eta_{RH}(t_0)$	Jahresnutzungsgrad im Jahr der Inbetriebnahme ( $t_0$ )
$\text{deg}_{RH}$	Degradation des Heizsystems pro Jahr ( $\text{deg}_{RH} < 1$ )
$\Delta t$	Differenz von t und $t_0$

Im Modell wird angenommen, dass der Jahresnutzungsgrad um 0,2% pro Jahr zurückgeht, was einer Verringerung von 4 % nach 20 Jahren entspricht.

Tab. 5.13: Zeitliche Entwicklung der Jahresnutzungsgrade und Stromverbrauch von Heizsystemen, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: Haas(1999), Recknagel et al. (2002), Frey et al. (1994), Bacher (2000), pers. Auskunft Wolfgang Streicher, eigene Annahmen

Typ Wärmeerzeuger / verwendeter Brennstoff	Jahresnutzungsgrad des Heizsystems( $\eta_{HS}$ ) im Jahr			(Hilfs)- Stromverbrauch Heizsystem (kWh/a)
	1985	2000	2050	Werte für Ein- familienh.
<i>Zentralheizungssysteme</i>				
Stückholzkessel	0,61	0,71	0,72	200
Hackgutkessel	0,67	0,72	0,74	600
Pelletsessel	0,67	0,73	0,75	450
Gaskessel	0,73	0,80	0,82	150
Gas-Brennwertkessel	0,90	0,92	0,93	200
Ölkessel	0,71	0,76	0,79	240
Öl-Brennwertkessel	0,88	0,89	0,9	290
Kohlekessel	0,63	0,70	0,72	180
Fernwärme	0,89	0,91	0,92	100
Wärmepumpe Luft/Wasser	2,20	2,70	3,40	120
Wärmepumpe Sole/Wasser Oberflächenkollektoren	3,20	3,60	4,30	120
Wärmepumpe Sole/Wasser Tiefenbohrung	3,20	3,60	4,30	120
Wärmepumpe Wasser/Wasser	3,5	4,00	4,50	120
<i>Etagenheizungen</i>				
Gas-Kombitherme	0,73	0,80	0,82	120
Pelletsofen mit Wassertasche	0,72	0,74	0,76	150
<i>Einzelöfen</i>				
Stückholzofen	0,53	0,6	0,65	0
Pelletsofen	0,69	0,75	0,78	50
Kohle/Koksofen	0,55	0,61	0,63	0
Ölofen	0,56	0,6	0,62	0
Gaskonvektor	0,65	0,70	0,72	0
Elektro-Konvektoren	0,94	0,95	0,96	0
Elektro Nachtspeicherofen	0,91	0,92	0,93	0

Tabelle 5.13 zeigt neben der Entwicklung der Jahresnutzungsgrade für verschiedene Heizsysteme auch die im Modell getroffenen Annahmen über den Verbrauch an elektrischer Hilfsenergie von Heizsystemen. Der Hilfsstrombedarf eines Heizsystems beinhaltet Strombedarf für den Betrieb des Wärmeerzeugers/Heizkessel (z.B. Gebläse, Zündung), für den Brennstofftransport (automatische Brennstoffzufuhr bei Hackgut- oder

Pelletsesseln) sowie für die Wärmeverteilung (Pumpen)<sup>41</sup>. Aufgrund des relativ hohen Strombedarfs für Brennstoffzufuhr und Zündung weisen hier Hackgut- und Pelletsessel die höchsten Werte auf. Die Annahmen über den Hilfsenergiebedarf für Heizsysteme für Gebäuden, welche größer als Einfamilienhäuser sind, sind in Anhang 3 aufgelistet.

### 5.2.2 Warmwasser

#### Integrierte Warmwasserbereitung

Bei integrierter Warmwasserbereitung wird das Warmwasser mit dem Wärmeerzeuger des Heizsystems bereit. In obiger Formel wird berücksichtigt, dass sich der Gesamtnutzungsgrad für die Warmwasserbereitung außerhalb der Heizperiode verschlechtert (siehe Tab. 5.16 für Werte von  $dg_{\eta,WW,So}$  abhängig vom Brennstoff). Die schlechtere Effizienz der Warmwasserbereitung außerhalb der Heizperiode entsteht dadurch, dass der Wärmeerzeuger/Heizkessel alleine zum Zweck der Warmwasserbereitung in Betrieb genommen werden muss und daher bei jeder Inbetriebnahme relativ hohe Anfahrverluste entstehen.

$$E_{WW,i} = \frac{NE_{WW,t} \cdot (L_{HP} + \frac{365 - L_{HP}}{dg_{\eta,WW,So}})}{\eta_{WE} \cdot \eta_{Sp,WW} \cdot \eta_{Vt,WW}} \cdot \frac{365 - L_{Abw}}{365} \quad (5.21)$$

$E_{WW,i}$  Endenergiebedarf für Warmwasser pro Gebäude pro Jahr bei integrierter Warmwasserbereitung [kWh/a]

$NE_{WW,t}$  Nutzenergiebedarf für Warmwasser pro Tag pro Gebäude [kWh/t]

$L_{HP}$  Länge der Heizperiode in Tagen [t]

$L_{Abw}$  Länge der Abwesenheitsperiode in Tagen [t]

$dg_{\eta,WW,So}$  Degradation (Verschlechterung) des Nutzungsgrades für die Warmwasserbereitung während der Nicht-Heizperiode

$\eta_{WE}$  Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers

$\eta_{Sp,WW}$  Wirkungsgrad des Warmwasserspeichers (= 1 – Speicherverluste), Jahresschnitt

$\eta_{Vt,WW}$  Wirkungsgrad der Wärmeverteilung für Warmwasserbereitung

Die Gesamtverluste der Warmwasserbereitung sind in Verluste des Wärmeerzeugers ( $1 - \eta_{WE}$ ), des Warmwasserspeichers ( $1 - \eta_{Sp,WW}$ ) und der Verteilung ( $1 - \eta_{Vt,WW}$ ) gegliedert. Je

<sup>41</sup> Hilfsenergiebedarf für Heizsysteme kann in den meisten Fällen mit Hilfsstrombedarf gleichgesetzt werden. Bei Gas-Kombitherme allerdings fällt auch ein Hilfsenergiebedarf (in Form von Erdgas) für das Aufrechterhalten der Zündflamme an.

nach Gebäudegröße / Gebäudetyp variieren Werte für die beiden letztgenannten Verlustkategorien (siehe Tab. 5.14, Tab. 5.15)<sup>42</sup>.

Weiters sind Abwesenheitszeiten ( $L_{Abw}$ ) berücksichtigt.

Tabelle 5.14: Zeitliche Entwicklung der Wirkungsgrade von Wärmeerzeugern, bei denen integrierte Warmwasserbereitung möglich ist, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: Frey et al. (1994), Bacher (2000), pers. Auskunft Wolfgang Streicher, eigene Annahmen

Wärmeerzeuger	Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers im Jahr		
	1985	2000	2050
Stückholzkessel	0,73	0,85	0,87
Hackgutkessel	0,81	0,87	0,89
Pelletskessel	0,81	0,88	0,90
Pelletsofen mit Wassertasche	0,85	0,90	0,92
Gaskessel	0,85	0,94	0,95
Gas-Kombitherme	0,85	0,92	0,94
Gas-Brennwertkessel	1,00	1,04	1,05
Ölkessel	0,83	0,89	0,92
Öl-Brennwertkessel	0,98	1,00	1,02
Kohlekessel	0,76	0,85	0,87
Fernwärme	1,00	1,00	1,00
Wärmepumpe Luft/Wasser	2,40	3,00	3,60
Wärmepumpe Sole/Wasser Oberflächenkollektoren	3,40	3,90	4,70
Wärmepumpe Sole/Wasser Tiefenbohrung	3,40	3,90	4,70
Wärmepumpe Wasser/Wasser	3,80	4,30	4,90

Tabelle 5.15: Verluste für Warmwasserspeicher ( $1 - \eta_{Sp,WW}$ ) und der Wärmeverteilung für Warmwasserbereitung ( $1 - \eta_{Vt,WW}$ ) nach Gebäudetyp, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: Frey et al. (1994), eigene Annahmen

	Gebäude mit 1 Wohneinheit (WE)	Gebäude mit 2 WE	Gebäude mit 3-10 WE	Gebäude mit > 10 WE
$\eta_{Sp,WW}$	0,78	0,8	0,85	0,9
$\eta_{Vt,WW}$	0,78	0,78	0,7	0,7

<sup>42</sup> Geringere Speicherverluste bei größeren Gebäuden und damit größeren Warmwasserspeichern sind aufgrund des günstigeren Oberflächen-Volumen Verhältnis gegeben, größere Verluste der Wärmeverteilung bei größeren Gebäuden entstehen aufgrund größerer Leitungslängen

Tab. 5.16: Degradation des Nutzungsgrads für die Warmwasserbereitung außerhalb der Heizperiode nach verwendetem Brennstoff, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: Frey et al. (1994), eigene Annahmen

	Stückholz- / Kohle	Hackschnitzel- / Pellets	Öl	Gas
$dg_{\eta, WW, So}$	0,65	0,7	0,75	0,85

Bei der Verwendung von Wärmepumpen ist der Berechnungsvorgang etwas modifiziert. Während hier kein Unterschied zwischen Heiz- und Nicht-Heizperiode angenommen wird, ist der Wirkungsgrad bzw. die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe generell reduziert im Vergleich zum reinen Heizbetrieb, weil ein höheres Temperaturniveau erreicht werden muss.

$$E_{WW, WP} = \frac{NE_{WW, t} \cdot 365}{\eta_{WE} \cdot \eta_{Sp, WW} \cdot \eta_{Vi, WW} \cdot dg_{\eta, WW, WP}} \cdot (365 - L_{Abw}) \quad (5.22)$$

$E_{WW, WP}$  Endenergiebedarf für Warmwasser pro Gebäude pro Jahr bei integrierter Warmwasserbereitung mit einer Wärmepumpe [kWh/a]

$dg_{\eta, WW, WP}$  Degradation (Verringerung) der Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe für integrierte Warmwasserbereitung, Werte siehe Tabelle 5.17

Tab. 5.17: Verschlechterung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen für integrierte Warmwasserbereitung, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: eigene Annahmen, pers. Auskunft Wolfgang Streicher

	Wärmepumpe Luft/Wasser	Wärmepumpe Sole/Wasser Oberflächen- kollektoren	Wärmepumpe Sole/Wasser Tiefenbohrung	Wärmepumpe Wasser/Wasser (Grundwasser- WP)
$dg_{\eta, WW, WP}$	0,85	0,875	0,875	0,9

Der Nutzenergiebedarf für Warmwasser wird wie folgt berechnet:

$$NE_{WW, t} = \frac{n_P \cdot V_{WW, P, t} \cdot c_{p, H_2O} \cdot \Delta T_{WW}}{3600} \quad (5.23)$$

$NE_{WW, t}$  Nutzenergiebedarf für Warmwasser pro Tag pro Gebäude [kWh/t]

$n_P$  Anzahl der Personen pro Gebäude

$V_{WW, P, t}$  Warmwasserbedarf pro Person pro Tag (Wassertemperatur 50 °C) [l]

$c_{p, H_2O}$  spezifische Dichte von Wasser (4,19 kJ/kg.K)

$\Delta T_{WW}$  Temperaturunterschied zwischen kalten und warmen Wasser (38 °C im Modell)

Der Warmwasserbedarf pro Person und Tag wird mit 40 l (Referenzjahr 2000)<sup>43</sup> und als leicht linear ansteigend angenommen (2020: 45 l; 2050: 50 l).

### Einzelssysteme zur Warmwasserbereitung

Die Formel zur Berechnung des Endenergiebedarfs für Warmwasserbereitung ist für Einzelssysteme (Formel 5.24) etwas einfacher als für integrierte Systeme, da die Notwendigkeit wegfällt, zwischen Heizperiode und Nicht-Heizperiode zu unterscheiden. Werte für Wirkungsgrade des Wärmeerzeugers zur Warmwasserbereitung sind Tab. 5.18 zu entnehmen, Werte für Verluste bzw. Wirkungsgrade des Warmwasserspeichers und der Wärmeverteilung sind analog zu integrierten Systemem (siehe Tab. 5.15).

$$E_{WW,ES} = \frac{NE_{WW,t}}{\eta_{WE,WW} \cdot \eta_{Sp,WW} \cdot \eta_{Vt,WW}} \cdot (365 - L_{Abw}) \quad (5.24)$$

$E_{WW,ES}$	Endenergiebedarf für Warmwasser pro Gebäude pro Jahr bei Einzelssystemen zur Warmwassbereitung [kWh/a]
$NE_{WW,t}$	Nutzenergiebedarf für Warmwasser pro Tag pro Gebäude [kWh/t]
$L_{Abw}$	Länge der Abwesenheitsperiode in Tagen [t]
$\eta_{WE,WW}$	Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers zur Warmwasserbereitung
$\eta_{Sp,WW}$	Wirkungsgrad (= 1 –Verluste) des Warmwasserspeichers, Jahresschnitt
$\eta_{Vt,WW}$	Wirkungsgrad (= 1 –Verluste) der Wärmeverteilung für Warmwasserbereitung

Tabelle 5.18: Zeitliche Entwicklung der Wirkungsgrade von Wärmeerzeugern zur Warmwasserbereitung, Einzelssysteme, im Modell verwendete Werte

	Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers im Jahr		
	1985	2000	2050
Wärmeerzeuger zur Warmwasserbereitung, Einzelssysteme			
Elektro-Speicher (dezentral)	1	1	1
Elektro-Speicher (zentral)	1	1	1
Elektro-Durchlauferhitzer	1	1	1
Warmwasser-Wärmepumpe	2,1	2,5	2,8
Gas-Speicher (dezentral)	0,85	0,94	0,95
Gas-Durchlauferhitzer	0,85	0,92	0,94

<sup>43</sup> Gemäß Haas (1999).

### 5.2.3 Solaranlagen

#### Solaranlagen zur Warmwasserbereitung

Bei Solaranlagen ist die Bestimmung des Restenergiebedarfs von Interesse, also jenes Anteils, der nicht durch direkte Nutzung der Sonnenenergie abgedeckt werden kann. Im Modell werden zwei Typen von Solaranlagen zur Warmwasserbereitung unterschieden: solche, die in das Heizsystem integriert sind und solche, die unabhängig von einem Heizsystem sind. Beim erstgenannten Anlagentyp wird angenommen, dass der Restenergiebedarf für die Warmwasserbereitung während der Heizperiode durch das Heizsystem gedeckt wird, während außerhalb der Heizperiode der - aufgrund eines hohen solaren Deckungsgrads in dieser Periode - geringe Restenergiebedarf durch elektrischen Strom gedeckt wird. Bei Anlagen, die nicht in ein Heizsystem integriert sind, wird der Restenergiebedarf zur Gänze durch Strom gedeckt.

Für die Berechnung des Restenergiebedarfs wird zunächst der solar gedeckte Anteil an der Nutzenergie bestimmt, darauf aufbauend der Nutzenergiebedarf für Strom und den zur Raumheizung genutzten Energieträger (bei integrierten Anlagen).

$$NE_{WW, Sol} = Et_{Koll, spez} \cdot A_{Koll} \cdot \eta_{Sp, Sol} \cdot \eta_{Vt, Sol, WW} \quad (5.25)$$

$$NE_{WW, Sol, HS} = NE_{WW} - (1 - a_{el}) \cdot NE_{WW, Sol} \quad (5.26)$$

$$NE_{WW, Sol, el} = NE_{WW} - a_{el} \cdot NE_{WW, Sol} \quad (5.27)$$

$$NE_{WW} = NE_{WW, t} \cdot (365 - L_{Abw}) \quad (5.28)$$

$NE_{WW, Sol}$  durch Solaranlage gedeckte Nutzenergie für die Warmwasserbereitung pro Gebäude pro Jahr [kWh/a]

$NE_{WW, Sol, HS}$  vom Raumheizungssystem gelieferte Rest-Nutzenergie für solare Warmwasserbereitung pro Gebäude pro Jahr [kWh/a]

$NE_{WW, Sol, el}$  von elektrischer Zusatzheizung gelieferte Rest-Nutzenergie für solare Warmwasserbereitung pro Gebäude pro Jahr [kWh/a]

$Et_{Koll, spez}$  spezifischer solarer Ertrag pro Bruttokollektorfläche, [kWh/m<sup>2</sup>a]

$A_{koll}$  Bruttokollektorfläche, [m<sup>2</sup>]

$\eta_{Sp, Sol}$  Wirkungsgrad (= 1 - Verluste) des Solar-Warmwasserspeichers, Jahresschnitt

$\eta_{Vt, Sol, WW}$  Wirkungsgrad (= 1 - Verluste) der Wärmeverteilung für Solaranlage (Solarkreis + Warmwasserverteilung)

$NE_{WW}$  Nutzenergiebedarf für Warmwasser pro Gebäude pro Jahr [kWh/a]

$a_{el}$  Anteil von Strom für Restenergiebereitstellung

Der spezifische solare Ertrag pro Bruttokollektorfläche ( $Et_{Koll, spez}$ ) wird (abhängig vom aktuellen Jahr t) als nicht-linear ansteigend zwischen einer Untergrenze ( $Et_u$ ) und einer

Obergrenze ( $Et_o$ ) modelliert<sup>44</sup>. Eine zeitabhängige Verbesserung des spezifischen Kollektorertrags ( $Et_{Koll, spez, Verb}$ ) ist also im Modell berücksichtigt.

$$Et_{Koll, spez}(t) = Et_u + (Et_o - Et_u) \cdot (1 - e^{-(t-t_0)/c_{sol}}) \quad (5.29)$$

$$Et_{Koll, spez, Verb}(t) = \frac{Et_{Koll, spez}(t)}{Et_u} \quad (5.30)$$

$Et_u$  Untergrenze des spezifischen solaren Ertrags pro Bruttokollektorfläche (460 kWh/m<sup>2</sup>a)

$Et_o$  Obergrenze des spezifischen solaren Ertrags pro Bruttokollektorfläche (600 kWh/m<sup>2</sup>a)

$t_0$  Referenzjahr (2000)

$c_{sol}$  Zeitkonstante, die Geschwindigkeit der Verbesserung des spezifischen solaren Ertrags bestimmt; [-]

$Et_{Koll, spez, Verb}$  Verbesserung des spezifischen solaren Ertrags pro Bruttokollektorfläche (in Relation zu  $Et_u$ )

Durch Berücksichtigung des Wirkungsgrads des Wärmeerzeugers für das Heizsystem, der Verteilungs- und Speicherverluste kann schließlich der Restendenergiebedarf kalkuliert werden. Der Wirkungsgrad der elektrischen Wärmeerzeugung ist mit 1 angenommen.

$$E_{WW, Sol, HS} = \frac{NE_{WW, Sol, HS}}{\eta_{WE} \cdot \eta_{Sp, Sol} \cdot \eta_{Vt, WW}} \quad (5.31)$$

$$E_{WW, Sol, el} = \frac{NE_{WW, Sol, el}}{\eta_{Sp, Sol} \cdot \eta_{Vt, WW}} \quad (5.32)$$

$E_{WW, Sol, HS}$  Rest-Endenergiebedarf (vom Raumheizungssystem gedeckt) für solare Warmwasserbereitung pro Gebäude pro Jahr [kWh/a]

$E_{WW, Sol, el}$  Rest-Endenergiebedarf (von elektrischer Zusatzheizung gedeckt) für solare Warmwasserbereitung pro Gebäude pro Jahr [kWh/a]

Die elektrische Hilfsenergie für den Antrieb von Pumpen, welche für den Betrieb einer Solaranlage benötigt werden, wird nach folgender Formel berechnet:

$$E_{P, Sol} = P_{P, Sol, spez} \cdot A_{Koll} \cdot LZ_{P, t} \cdot 365 / 1000 \quad (5.33)$$

$E_{P, Sol}$  elektrische Hilfsenergie für den Antrieb von Pumpen einer Solaranlage pro Jahr [kWh/a]

<sup>44</sup> Bei der Auswahl der Werte für Ober- und Untergrenze wurden an folgenden Quellen orientiert: eigene Berechnungen mit Simulationssoftware Polysun 3.3. Demoversion (www.polysun.ch), Ladener/Späte (2004), Frei (2004)

- $P_{P,Sol,spez}$  spezifische Pumpenleistung einer Solaranlage pro Bruttokollektorfläche [W/m<sup>2</sup>]  
 $LZ_{P,t}$  durchschnittliche Pumpenlaufzeit pro Tag [h/d]

Die im Modell verwendeten Werte für verschiedene in obigen Formeln vorkommenden Parameter sind in Abhängigkeit des Gebäudetyps in Tabelle 5.19 zusammengefasst. Die Werte wurden aus Simulationen mit dem Programm „Polysun 3.3 Demoversion“<sup>45</sup> ermittelt.

*Tabelle 5.19: Werte verschiedener Parameter für Solaranlagen in Abhängigkeit des Gebäudetyps, im Modell verw. Werte, Datenquelle: Simulationen mit Polysun 3.3, Demoversion, eigene Annahmen*

	Einheit	Gebäude mit 1 Wohneinheit (WE)	Gebäude mit 2 WE	Gebäude mit 3-10 WE	Gebäude mit > 10 WE
$\eta_{Sp,Sol}$	-	0,73	0,8	0,822	0,926
$\eta_{Vi,Sol,WW}$	-	0,796	0,817	0,682	0,627
$\alpha_{el}$	-	0,045	0,031	0,052	0,05
$P_{P,Sol,spez}$	W/m <sup>2</sup>	13	9	7	6
$LZ_{P,t}$	h/d	6,5	6,2	4,95	6,3

<sup>45</sup> Web-site: [www.polysun.ch](http://www.polysun.ch)

### 5.2.4 Solar-Kombisysteme

Bei Solar-Kombisystemen wird neben der solaren Warmwasserbereitung auch ein Teil der benötigten Energie zur Raumwärmeversorgung von der Solaranlage gedeckt. Die Bestimmung des Rest-Endenergiebedarfs für Raumheizung und Warmwasser erfolgt durch die Verwendung des Parameters „Solarer Deckungsgrad“.

In dieser Arbeit wird folgende Definition des solaren Deckungsgrads verwendet (nach Streicher 2006, S. 98):

$$SD = 1 - \frac{\sum \text{Zusatzheizung}}{\text{Energiebedarf}} \quad (5.34)$$

$$SD_{WW + RH} = 1 - \frac{Q_{HS, Sp} + Q_{el, Sp}}{Q_{Sp, WW} + Q_{Sp, RH}} \quad (5.35)$$

$SD$  Solarer Deckungsgrad; [-]

$SD_{WW+RH}$  Solarer Deckungsgrad für Warmwasser und Raumheizung; [-]

$Q_{HS, Sp}$  vom Heizsystem an den (Puffer-)Speicher abgegebene Wärmeenergie pro Jahr; [kWh/a]

$Q_{el, Sp}$  von elektrischer Zusatzheizung an den (Puffer-)Speicher abgegebene Wärmeenergie pro Jahr; [kWh/a]

$Q_{Sp, WW}$  vom Speicher abgegebene Wärmeenergie für Warmwasser pro Gebäude pro Jahr; [kWh/a]

$Q_{Sp, RH}$  vom Speicher abgegebene Wärmeenergie für Raumheizung pro Gebäude pro Jahr; [kWh/a]

Bei der Umwandlung der vom Speicher abgegebenen Wärmemengen ( $Q_{Sp, WW}$ ,  $Q_{Sp, RH}$ ) in Nutzenergie fallen noch Verteilverluste an:

$$NE_{WW} = Q_{Sp, WW} \cdot \eta_{Vt, abSp, WW} \quad (5.36)$$

$$NE_{RH} = Q_{Sp, RH} \cdot \eta_{Vt, abSp, RH} \quad (5.37)$$

$NE_{WW}$  Nutzenergiebedarf für Warmwasser pro Gebäude pro Jahr; [kWh/a]

$NE_{RH}$  Nutzenergiebedarf für Raumheizung pro Gebäude pro Jahr; [kWh/a]

$\eta_{Vt, abSp, WW}$  Wirkungsgrad (= 1 – Verluste) der Wärmeverteilung für Warmwasser ab Speicher; [-]

$\eta_{Vt, abSp, RH}$  Wirkungsgrad (= 1 – Verluste) der Wärmeverteilung für Raumheizung ab Speicher; [-]

Bei oben angeführter Definition des solaren Deckungsgrades werden die Speicherverluste der Solaranlage zugerechnet, da:

$$Q_{Sol, Sp} + Q_{Z, Sp} = Q_{Sp, ab} + Q_{V, Sp} \Rightarrow Q_{Sol, Sp} - Q_{V, Sp} = Q_{Sp, ab} - Q_{Z, Sp} \quad (5.38)$$

$$SD = 1 - \frac{Q_{Z, Sp}}{Q_{Sp, ab}} = \frac{Q_{Sp, ab} - Q_{Z, Sp}}{Q_{Sp, ab}} = \frac{Q_{Sol, Sp} - Q_{V, Sp}}{Q_{Sp, ab}} \quad (5.39)$$

$Q_{Sol, Sp}$  von der Solaranlage an den Speicher abgegebene Wärmeenergie pro Jahr; [kWh/a]

$Q_{Z, Sp}$  von der Zusatzheizung insgesamt an den Speicher abgegebene Wärmeenergie pro Jahr; [kWh/a]

$Q_{V, Sp}$  Speicherverluste pro Jahr; [kWh/a]

$Q_{Sp, ab}$  vom Speicher abgegebene Wärmeenergie pro Jahr; [kWh/a]

Damit stellt diese Definition eine Untergrenze für den Wert des solaren Deckungsgrads dar. Andere Varianten der Definition des solaren Deckungsgrads rechnen die Speicherverluste entweder zur Gänze der Nachheizung zu oder teilen die Verluste zwischen Solaranlage und Nachheizung auf (siehe z.B. Fink et al. 1999, S. 34ff.)<sup>46</sup>.

Gemäß obiger Definition des solaren Deckungsgrads lassen sich die gesamte an den Speicher gelieferte Zusatzenergie pro Jahr ( $Q_{Z, Sp}$ ), die für Warmwasserbereitung gelieferte Zusatzenergie pro Jahr ( $Q_{Z, WW, Sp}$ ) und die für Raumheizung gelieferte Zusatzenergie pro Jahr ( $Q_{Z, RH, Sp}$ ) folgendermaßen bestimmen:

$$Q_{Z, Sp} = (1 - SD_{WW + RH}) \cdot (Q_{Sp, WW} + Q_{Sp, RH}) = (1 - SD_{WW + RH}) \cdot \left( \frac{NE_{WW}}{\eta_{Vt, abSp, WW}} + \frac{NE_{RH}}{\eta_{Vt, abSp, RH}} \right) \quad (5.40)$$

$$Q_{Z, WW, Sp} = (1 - SD_{WW}) \cdot Q_{Sp, WW} = \frac{(1 - SD_{WW}) \cdot NE_{WW}}{\eta_{Vt, abSp, WW}} \quad (5.41)$$

$$Q_{Z, RH, Sp} = Q_{Z, Sp} - Q_{Z, WW, Sp} \quad (5.42)$$

Es wird analog zu Solaranlagen zur Warmwasserbereitung angenommen, dass außerhalb der Heizperiode die Nachheizung elektrisch (über E-Patronen) erfolgt, was einen bestimmten, aber relativ geringen Anteil von elektrischer Hilfsenergie ( $Q_{el, WW, Sp}$ ) bedingt.

$$Q_{el, WW, Sp} = a_{el} \cdot Q_{Z, WW, Sp} \quad (5.43)$$

$$Q_{HS, WW, Sp} = (1 - a_{el}) \cdot Q_{Z, WW, Sp} \quad (5.44)$$

$$Q_{HS, RH, Sp} = Q_{Z, RH, Sp} \quad (5.45)$$

<sup>46</sup> In Fink et al. (1999) wird auch gezeigt, dass beachtliche Unterschiede für den Wert des solaren Deckungsgrads je nach verwendeter Definition auftreten können.

$$Q_{HS, WW + RH, Sp} = Q_{Z, Sp} - Q_{el, WW, Sp} \quad (5.46)$$

$Q_{el, WW, Sp}$  von elektrischer Zusatzheizung an Speicher (für die Warmwasserbereitung) abgegebene Wärmeenergie pro Jahr; [kWh/a]

$Q_{HS, WW, Sp}$  für die Warmwasserbereitung vom Heizsystem an Speicher abgegebene Wärmeenergie pro Jahr; [kWh/a]

$Q_{HS, RH, Sp}$  für die Raumheizung vom Heizsystem an Speicher abgegebene Wärmeenergie pro Jahr; [kWh/a]

$Q_{HS, WW+RH, Sp}$  gesamte vom Heizsystem an Speicher abgegebene Wärmeenergie pro Jahr; [kWh/a]

$Q_{Z, WW, Sp}$  von der Zusatzheizung an den Speicher abgegebene Wärmeenergie für Warmwasserbereitung pro Jahr; [kWh/a]

$Q_{Z, RH, Sp}$  von der Zusatzheizung an den Speicher abgegebene Wärmeenergie für Raumheizung pro Jahr; [kWh/a]

$Q_{Z, Sp}$  von der Zusatzheizung an den Speicher insgesamt abgegebene Wärmeenergie pro Jahr; [kWh/a]

$a_{el}$  Anteil von elektrischer Hilfsenergie an der Zusatzenergie für Warmwasserbereitung

Zur Bestimmung des Endenergiebedarfs der Zusatzheizung müssen noch Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers und Verteilverluste bis zum Speicher berücksichtigt werden (für elektrische Zusatzheizung nicht notwendig):

$$E_{WW + RH, Sol, HS} = \frac{Q_{HS, WW + RH, Sp}}{\eta_{WE} \cdot \eta_{Vt, bisSp}} \quad (5.47)$$

$$E_{WW + RH, Sol, el} = Q_{el, WW, Sp} \quad (5.48)$$

$E_{WW+RH, Sol, HS}$  Endenergiebedarf der vom Heizsystem gedeckten Zusatzheizung für Warmwasser und Raumheizung pro Gebäude pro Jahr; [kWh/a]

$\eta_{Vt, bisSp}$  Wirkungsgrad (= 1 -Verluste) der Wärmeverteilung der Zusatzheizung bis zum Speicher; [-]

Tab. 5.20: Werte verschiedener Parameter für Solar-Kombisysteme in Abhängigkeit des Gebäudetyps, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: Simulationen mit Polysun 3.3, Demoversion, eigene Annahmen

		Gebäude mit 1 Wohneinheit (WE)	Gebäude mit 2 WE	Gebäude mit 3-10 WE	Gebäude mit > 10 WE
$a_{el}$	-	0,025	0,025	0,025	0,025
$P_{P,Sol-K,spez}$ (spez. Pumpenleistg.)	W/m <sup>2</sup> (Kollektor-fläche)	5,5	5	4	3,5
$LZ_{P,t}$ (tägl. Pumpenlaufzeit)	h/d	5	5	5	5
$\eta_{Vt,abSp,WW}$	-	0,8	0,79	0,75	0,74
$\eta_{Vt,abSp,RH}$	-	0,95	0,93	0,91	0,89
$\eta_{Vt,bisSp}$	-	0,98	0,97	0,97	0,97

Werte für solare Deckungsgrade werden in Abhängigkeit von der Heizlast des Gebäudes bestimmt. Zu diesem Zweck wird ein Diagramm aus Streicher (2006) herangezogen, welches die Abhängigkeit des solaren Gesamtdeckungsgrads von spezifischer Kollektorgröße ( $m^2/kW_{Heizlast}$ ) und spezifischem Heizspeichervolumen ( $m^3/kW_{Heizlast}$ ) darstellt.

Nach der Festlegung einer Bandbreite von typischen Werten für Kollektorflächen und Speichervolumen je nach Gebäudetyp (siehe Tab. 5.21) lassen sich bei Annahme einer bestimmten Heizlast spezifische Werte für Kollektorgröße und Speichervolumen ermitteln und daran anschließend der solare Gesamtdeckungsgrad (siehe Tabellen im Anhang 4). Solare Deckungsgrade für Warmwasser in Abhängigkeit von Kollektorfläche, Größe des Warmwasserspeichers und Warmwasserbedarf wurden durch Simulationen mit dem Modell von Frittum (Frittum 2004) bestimmt.

Tabelle 5.21: Typische Werte (Bandbreiten) für Brutto-Kollektorflächen ( $A_{Koll}$ ) und Speichergrößen ( $V_{Sp,Sol}$ ) bei Solar-Kombisystemen

	Gebäude mit 1 Wohneinheit (WE)	Gebäude mit 2 WE	Gebäude mit 3-10 WE	Gebäude mit > 10 WE
$A_{Koll}$ (m <sup>2</sup> )	15 – 20	20 – 30	35 - 55	80 - 140
$V_{Sp,Sol}$ (m <sup>3</sup> )	1 – 2	1,5 – 3	2,5 – 4,5	10 - 14

### 5.3 Datengrundlage

Die wichtigsten Daten zur Charakterisierung von Technologien bzw. von Energieträgern, welche im Modell Verwendung finden, sind:

- monetäre Kosten
- externe Kosten<sup>47</sup>:
- kumulierte Treibhausgasemissionen („Graue CO<sub>2</sub>-Äquivalente“) für Technologien bzw. spezifische Treibhausgasemissionsfaktoren für Energieträger
- kumulierte Energieverbräuche („Graue Energie“) für Technologien bzw. spezifische grauer Energieverbrauch für Energieträger
- technische Effizienzen / Nutzungsgrade (siehe Kap. 5.2, Tab. 5)
- durchschnittliche Lebensdauern
- Lernraten

In diesem Subkapitel werden schwerpunktmässig die Datengrundlagen zu monetären und externen Kosten sowie zu kumulierten Treibhausgasemissionen und Energieverbräuchen behandelt. Daten zu technischen Effizienzen bzw. Nutzungsgraden finden sich in Kap. 5.2, Tab. 5.13 bis 5.18, zu durchschnittlichen Lebensdauern und Lernraten siehe Kap. 6.2.1, Tab 6.17.

#### 5.3.1 Monetäre Kosten

##### 5.3.1.1 Laufende Kosten

###### *Energieträger / Brennstoffe*

Die wichtigsten Quellen zur Bestimmung der Preise verschiedener Energieträger sind im folgenden angeführt:

- <http://www.iwo-austria.at/60.0.html> (regelmässig aktualisierte Preise von Heizöl und einigen anderen Energieträgern)
- <http://www.e-control.at/portal/>, insbesondere [http://www.e-control.at/portal/page/portal/ECONTROL\\_HOME/STROM/STROMPREISE/ENDVERBRAUCHERPREISE](http://www.e-control.at/portal/page/portal/ECONTROL_HOME/STROM/STROMPREISE/ENDVERBRAUCHERPREISE) (Strompreise)
- [http://www.e-control.at/portal/page/portal/ECONTROL\\_HOME/GAS/GASPREISE/RETAIL\\_PRICES](http://www.e-control.at/portal/page/portal/ECONTROL_HOME/GAS/GASPREISE/RETAIL_PRICES) (Preise für Erdgas)
- [www.fernwaermewien.at](http://www.fernwaermewien.at), <http://www2.e-steiermark.com/de/fernwaerme/>, [www.linzag.at](http://www.linzag.at) (Preise für Fernwärme)

<sup>47</sup> In den Übersichten über Daten zu externen Kosten sind jeweils zwei Werte für externe Kosten angegeben, wobei die Spreizung im wesentlichen aus der unterschiedlichen Bewertung der externen Kosten von CO<sub>2</sub>-Emissionen resultiert (Kap. 5.3.2). Modell-Läufen mit dem Ziel „minimiere soziale Kosten“ (Kap. 6.2.2) ist der höhere Wert für externe Kosten zugrundegelegt. Bei Sensitivitätsanalysen bezüglich der Höhe externer Kosten wird dieser bereits höhere Wert noch mit dem Faktor 2 bzw. 3 multipliziert (Kap. 6.2.3).

- Steffens (2002): Kosten von Biomasse-Fernwärme Anlagen, Biomasse-Fernwärmepreise für Endkunden
- Haas / Kranzl (2002): Preise für Biomasse-Brennstoffe
- [http://www.eva.ac.at/\(de\)/enz/epi/ew-epi.htm](http://www.eva.ac.at/(de)/enz/epi/ew-epi.htm) (Energiepreisindex)

Die im Modell verwendeten Preise für Energieträger im Referenz-Szenario sind in Kap. 6.2.1., Tab. 6.15 und Tab. 6.16 angeführt.

### *Betrieb, Wartung und Instandhaltung von Heiz- und Warmwasserbereitungssystemen*

Die jährlichen Kosten für Betrieb, Wartung und Instandhaltung von Heiz- und Warmwasserbereitungssystemen werden nach folgender Formel berechnet:

$$K_{B,W,I} = E_{Hilf} \cdot p_{el} + K_{W,WE} + K_{W,K} + a_{i,WE} \cdot K_{WE} + a_{i,sonst} \cdot K_{RH,sonst} + a_{i,WE} \cdot K_{WW,Sp} + a_{i,sonst} \cdot K_{WW,sonst} \quad (5.49)$$

$K_{B,W,I}$  Jährliche Kosten für Betrieb, Wartung und Instandhaltung eines Heizsystems (und ev. integrierten Warmwasserbereitungssystems) [EUR/a]

$E_{Hilf}$  Jährlicher Bedarf an elektrischer Hilfsenergie [kWh]

$p_{el}$  Strompreis [EUR/kWh]

$K_{W,WE}$  Jährliche Kosten für Wartung des Wärmeerzeugers / Heizkessels [EUR/a]

$K_{W,K}$  Jährliche Kosten für Wartung des Kamins [EUR/a]

$a_{i,WE}$  relativer Anteil der Instandhaltungskosten an Kosten für Wärmeerzeuger bzw. Warmwasserspeicher [-]

$a_{i,sonst}$  relativer Anteil der Instandhaltungskosten an sonstigen Kosten für Heizsystem / Warmwasserbereitungssystem [-]

$K_{WE}$  Kosten des Wärmeerzeugers (Raumheizung) [EUR]

$K_{RH,sonst}$  Sonstige Kosten für Raumheizungssystem (ohne Wärmeerzeuger) [EUR]

$K_{WW,Sp}$  Kosten des Warmwasserspeichers [EUR]

$K_{WW,sonst}$  Sonstige Kosten für Warmwasserbereitungssystem [EUR]

Werte zum Bedarf an elektrischer Hilfsenergie von Heizsystemen sind Tab. 5.13 (Kap. 5.2.1) bzw. Anhang 3 zu entnehmen. Kosten für Wartung des Wärmeerzeugers und des Kamins sind Anhang 5 zu entnehmen.

Zur Berechnung der Instandhaltungskosten werden die Kosten für Wärmeerzeuger (bzw. Warmwasserspeicher) sowie die sonstigen Kosten des Heiz- (bzw. Warmwasserbereitungssystems) mit jeweils einem bestimmten Faktor ( $a_{i,WE} = 0,008$  (0,8%) im ersten Fall,  $a_{i,sonst} = 0,004$  (0,4%) im zweiten Fall) multipliziert.

### 5.3.1.2 Investitionskosten

#### 5.3.1.2.1 Heizsysteme

Da Heizsysteme aus verschiedenen Komponenten bestehen, ist es notwendig, diese verschiedenen Komponenten getrennt zu betrachten, um sich einen Überblick über Investitionskosten von Heizsystemen zu verschaffen.

Im Modell erfolgt folgende Einteilung der Komponenten eines Heizsystems:

- *Wärmeerzeuger*

Im Wärmeerzeuger wird die im jeweils verwendeten Energieträger enthaltene Energiemenge in Wärme umgewandelt und an ein Wärmedium (Wasser, Luft) abgegeben oder über Strahlung direkt nutzbar gemacht. Meistens wird Wärme durch Verbrennungsvorgänge erzeugt und die Wärme an das Wärmeträgermedium Wasser abgegeben, in diesem Fall entspricht der Wärmeerzeuger einem Heizkessel.

Möglich ist aber die Wärmeerzeugung auch ohne Verbrennungsvorgang, beispielsweise durch Stromdirektheizungen, Wärmepumpen oder Solarkollektoren.

Neben dem eigentlichen Wärmeerzeuger sind in der im Modell verwendeten Kostenkategorie "Wärmeerzeuger" auch die Kosten für Pufferspeicher (relevant bei Stückholzheizungen), Brennstoffzuführung (relevant bei automatisch beschickten Pellets- und Hackschnitzelheizungen), Regelungseinrichtungen, Installation des Wärmeerzeugers und Abgasventilatoren (relevant bei Brennwertgeräten) inkludiert.

- *Wärmeverteilung*

Aufgabe der Wärmeverteilung ist der Transport der im Wärmeerzeuger erzeugten Wärme über ein Wärmeträgermedium (bei Heizsystemen in der Regel Wasser) an die Einrichtungen zur Wärmeabgabe (in der Regel Heizkörper/Radiatoren).

- *Wärmeabgabe*

In konventionellen Zentralheizungssystemen erfolgt die Wärmeabgabe über Heizkörper (auch als Radiatoren bezeichnet). Daneben werden auch einzelne Bauteile durch Integration entsprechender Leitungen als Wärmeabgabeflächen eingesetzt (Fußbodenheizung, Wandflächenheizung). Diese Art der Wärmeabgabe ist insbesondere für Niedertemperaturheizsysteme von Relevanz. (Im Fall von Einzelöfen und Stromdirektheizungen sind Wärmeerzeuger und Wärmeabgeber ident.)

- *Lagerung des Energieträgers und andere konstruktive Maßnahmen*

Energieträger, die nicht leitungsgebunden sind, benötigen Platz zur Lagerung. Für flüssige Energieträger (Heizöl, Flüssiggas) dient ein Tank zur Lagerung, für feste Energieträger (Stückholz, Holzpellets, Hackschnitzel, Kohle) ein entsprechender Lagerraum.

Unter "andere konstruktive Maßnahmen" werden hier Maßnahmen bei der Errichtung von Wärmepumpenheizsystemen verstanden, die ein Entziehen von Umgebungswärme ermöglichen (Erdsonden, Erdkollektoren, etc.) und die bei Wärmepumpenheizsystemen einen bedeutenden Anteil der Investitionskosten bilden.

- *Kamin*

Einerseits kann bei Wechsel des Heizsystems eine Anpassung des Kamins an das neue Heizsystem erforderlich sein (zum Beispiel sollte bei Verwendung von Brennwertgeräten der Kamin säurebeständig sein), andererseits kann eine Kaminsanierung ab einem gewissen Alter des Kamins (bzw. je nach Zustand des Kamins) ohnehin sinnvoll sein.

- *Anschluß*

Anschlußkosten fallen bei den leitungsgebundenen Energieträgern Erdgas und Fernwärme für die erstmalige Herstellung eines Anschlusses an.

Im Fall eines Wechsels des Heizsystems fallen auf jeden Fall Investitionskosten für einen neuen Wärmeerzeuger an, andere Komponenten werden nicht notwendigerweise getauscht bzw. neu errichtet. Ob gemäß dem im Modell verwendeten Algorithmus zur Berechnung der Investitionskosten von Heizsystemen andere Komponenten getauscht bzw. neu errichtet werden, hängt von deren Alter und Vorhandensein ab. Unterschiedliche technische Nutzungsdauern bzw. Zeitspannen, nach denen ein Tausch erfolgen muß, werden angenommen. Das Alter der verschiedenen Komponenten eines Heizsystems ist in der Definition der Gebäudesegmente festgelegt (siehe Kap. 5.1.1 zur Definition von Gebäudesegmenten).

*Tabelle 5.22: Technische Nutzungsdauern verschiedener Komponenten von Heiz- und Warmwassersystemen, im Modell verwendete Werte, nach Ablauf der technischen Nutzungsdauer ist entweder Austausch oder Sanierung notwendig*

<i>Komponente</i>	<i>technische Nutzungsdauer (Jahre), im Modell verwendete Werte</i>
Wärmeerzeuger	20
Wärmeverteilung	40
Heizkörper	25
Tank für Heizöl	30
Lagerraum feste Brennstoffe	50
konstruktive Maßnahmen Wärmepumpen	50
Kamin	35
Warmwasserspeicher	25

## Verwendete Berechnungsformeln

### Wärmeerzeuger

Der Bereich der für das Modell relevanten Heizlasten pro Gebäude reicht von etwa 3 kW (renovierte hochgedämmte Einfamilienhäuser) bis 100 kW (großes Mehrfamilienhaus, errichtet vor 1919, nicht renoviert). Eine entsprechend große Bandbreite sollte auch von den im Modell abgebildeten Wärmeerzeugern abgedeckt werden können. Die Kosten für einen bestimmten Wärmeerzeuger werden in Abhängigkeit der maximalen Wärmeleistung spezifiziert. Die maximale Wärmeleistung entspricht der Heizlast multipliziert mit einem Überdimensionierungsfaktor.

$$K_{WE} = f(P_{WE}) = f(p_0 \cdot f_{\ddot{u}}) \quad (5.50)$$

$K_{WE}$  Investitionskosten für einen Wärmeerzeuger [EUR]

$P_{WE}$  maximale Wärmeleistung eines Wärmeerzeugers [kW]

$p_0$  Gebäude-Heizlast [kW]

$f_{\ddot{u}}$  Faktor für Überdimensionierung [-]

Der Faktor für Überdimensionierung wird für eine Referenzheizlast (15 kW) festgelegt und in Abhängigkeit von der Heizlast modelliert. Je höher die Heizlast, desto geringer wird der Überdimensionierungsfaktor.

$$f_{\ddot{u}}(p) = 1 + \frac{f_{\ddot{u}}(p_{ref}) - 1}{\left(\frac{p}{p_{ref}}\right)^k} \quad (5.51)$$

$f_{\ddot{u}}(p)$  Überdimensionierungsfaktor für Heizlast p

$f_{\ddot{u}}(p_{ref})$  Überdimensionierungsfaktor für Referenzheizlast  $p_{ref}$

$k$  Korrekturfaktor

Tabelle 5.23: Beispiel für Bestimmung des Überdimensionierungsfaktor in Abhängigkeit von der Heizlast ( $p_{ref} = 15$  kW,  $k = 0,35$ ,  $f_{\ddot{u}}(p_{ref}) = 1,3$ )

	5 kW	10 kW	15 kW	30 kW	50 kW	70 kW	100 kW
$f_{\ddot{u}}$	1,44	1,35	1,30	1,24	1,20	1,17	1,15

Unterhalb der Referenzheizlast (15 kW) ist der Überdimensionierungsfaktor größer als der für die Referenzheizlast  $p_{ref}$  spezifizierte Überdimensionierungsfaktor, über der Referenzheizlast größer, wie auch anhand Tabelle 5.23 ersichtlich ist.

Weiters werden minimale Leistungen des Wärmeerzeugers berücksichtigt, die eine untere Schranke für die Kosten des Wärmeerzeugers definieren.

$$\text{Falls } P_{WE} < P_{WE, \min} \text{ dann ist } K_{WE} = f_{\ddot{u}}(P_{WE, \min}) \quad (5.52)$$

$P_{WE, \min}$  minimal mögliche Leistung eines Wärmeerzeugers

Die im Modell definierten minimalen Leistungen orientieren sich an der Untergrenze des Leistungsspektrums von am Markt angebotenen Geräten. Eine Übersicht über Überdimensionierungsfaktoren und minimale Leistungen der Wärmeerzeuger bietet Anhang 6.

Die Berechnung der Investitionskosten für Wärmeerzeuger in Abhängigkeit von der Wärmeleistung erfolgt im wesentlichen in zwei Ansätzen:

$$1. K_{WE} = c + a \cdot P_{WE} \quad (5.53)$$

$$2. K_{WE} = c + a \cdot P_{WE}^{(b+1)}, \quad 0 < b < -1 \quad (5.54)$$

In beiden Formelansätzen gibt es einen konstanten, nicht von  $P_{WE}$  abhängigen Teil und einen variablen (von  $P_{WE}$  abhängigen) Teil.

Der zweite Formelansatz wurde von der Arbeit von Bacher (2000) übernommen. In diesem Ansatz werden zunächst aufgrund von Marktübersichten Kostendaten pro kW Wärmeleistung für Wärmeerzeuger verschiedener Leistung ermittelt und der nicht-lineare Näherungszusammenhang  $y = a \cdot x^b$  unterstellt, wobei  $y$  für spezifische Kosten (pro kW Wärmeleistung) und  $x$  für Wärmeleistung (in kW) steht.

Die Bestimmung der Koeffizienten  $a$  und  $b$  erfolgt in zwei Schritten. Die Gleichung  $y = a \cdot x^b$  wird logarithmiert:  $\ln(y) = \ln(a) + \ln(x) \cdot b$

Durch lineare Regression werden anschließend Schätzwerte für die Koeffizienten  $a$  und  $b$  ermittelt.

Nach Multiplikation der spezifischen Kosten mit der jeweiligen Wärmeleistung ergeben sich dann die Investitionskosten für den jeweiligen Wärmeerzeuger:

$$K_{WE} = y \cdot P_{WE} = a \cdot P_{WE}^b \cdot P_{WE} = a \cdot P_{WE}^{(b+1)} \quad (5.55)$$

Abb. 1 zeigt aufgrund von Marktübersichten ermittelte spezifische Kosten und die daraus ermittelte Näherungskurve für Gaskessel (Quelle: Bacher 2000, adaptiert).

Die Näherungsformel für Kosten von Gaskessel (ohne Montage) gemäß Bacher (2000) lautet also:

$$K_{WE} = 1273,9 \cdot P_{WE}^{(-0,884 + 1)}, \quad (a = 1273,9; b = -0,884) \quad (5.56)$$

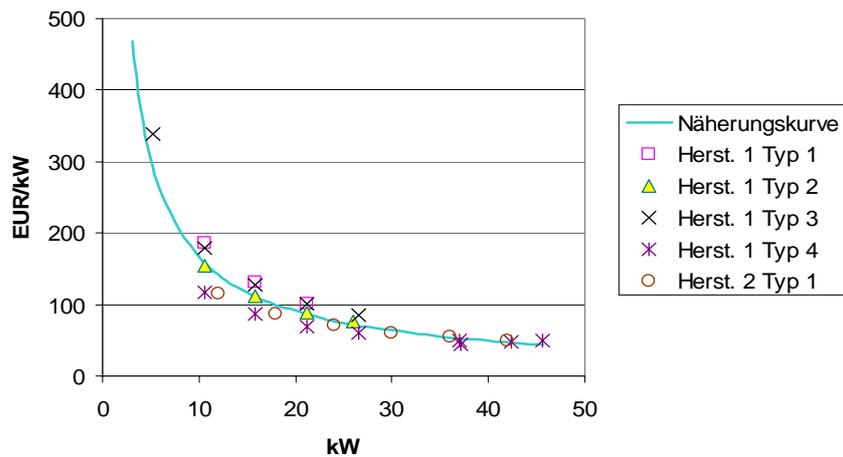


Abb. 5.2: Spezifische Kosten (EUR/kW) für Gaskessel, empirische Kostendaten (2 Hersteller, 5 Gerätetypen) und errechnete Näherungskurve, Quelle: Bacher (2000), adaptiert

In Anhang 7 sind die im Modell verwendeten Näherungsformeln angeführt. Die Bestimmung der Investitionskosten für Stückholzkessel, Hackschnitzelkessel, Pelletskessel, Pelletsöfen und Kohlekessel erfolgt nach Ansatz 1 ( $K_{WE} = c + a \cdot P_{WE}$ ), für Gaskessel, Ölkessel und Wärmepumpen nach Ansatz 2 ( $K_{WE} = c + a \cdot P_{WE}^{(b+1)}$ ).

Eine wesentliche Quelle für Näherungsformeln nach Ansatz 1 ist die Arbeit von Haas / Kranzl (2000), für Näherungsformeln nach Ansatz 2 die Arbeit von Bacher (2000). Die Formeln aus der Literatur wurden mit eigenen Berechnungen ergänzt und adaptiert. Folgende Quellen wurden neben den oben angeführten zum Abgleich und zur Adaptierung von Kostendaten herangezogen:

- „Kostenvergleich für Heizsysteme in Niederösterreich“, Goißer (2004)
- „Moderne Holzheizungen“, Hrsg. „die umweltberatung“ – NÖ-Süd, Wr. Neustadt, Schauer et al. (o. J.)
- „Holzpellet-Heizungen“, Holz (2005)
- „Holzfeuerungsanlagen“ Steffens (2002)
- „Moderne Holzheizungen: Neue Technologien – neue Marktchancen“, Broschüre des Landesenergieverein Steiermark, Schauer (1999)
- Projekt „Bioheat“, [www.bioheat.info/handbook/heatcost\\_de-at.html](http://www.bioheat.info/handbook/heatcost_de-at.html)
- Projekt „INVERT“, [www.invert.at](http://www.invert.at),
- „Markterhebung Pelletsfeuerungen“, [http://www.energyagency.at/\(de\)/publ/pdf/pelletsessel\\_marktuebersicht.pdf](http://www.energyagency.at/(de)/publ/pdf/pelletsessel_marktuebersicht.pdf)
- „Marktübersicht Öl-Brennwertkessel“, [http://www.energyagency.at/publ/pdf/oil\\_kessel.pdf](http://www.energyagency.at/publ/pdf/oil_kessel.pdf)
- verschiedene Herstellerprospekte

Die meisten hier angeführten Übersichten beziehen sich auf Wärmeerzeuger kleiner Leistung (< 30 kW), Steffens (2002) und das Projekt „Bioheat“ beziehen sich auch auf Feuerungsanlagen größerer Leistung ( $\geq 100$  kW).

In Tabelle 5.24 sind die vom Modell berechneten Investitionskosten von Wärmeerzeugern (inkl. Zusatzeinrichtungen wie Pufferspeicher, Brennstoffzuführung, Regelungseinrichtungen, Installation des Wärmeerzeugers, Abgasventilatoren) für verschiedene Wärmeleistungen zwischen 5 kW und 100 kW angeführt. Hackschnitzel-, Pelletskessel und Wärmepumpen weisen hier die höchsten Kosten auf, Gas-, Ölkessel und Pelletsofen die niedrigsten Kosten. Sehr niedrige Kosten sind auch bei Stromdirektheizungen (E-Konvektoren, E-Nachtspeicheröfen) bei Leistungen  $\leq 15$  kW gegeben, zu beachten ist bei Stromdirektheizungen, dass bei diesen Systemen Kosten für Wärmeverteilung und Wärmeabgabe entfallen, weshalb diese Systeme auch im höheren Leistungsbereich im Investitionskostenvergleich gut abschneiden, wenn gesamte Investitionskosten betrachtet werden.

*Tabelle 5.24: Kosten für Wärmeerzeuger nach Wärmeleistung des Wärmeerzeugers (in EUR) inkl. Regelungseinrichtungen, Einrichtungen zur Brennstoffförderung und Abgasanlage (für Brennwertgeräte), ohne Montage/Installation, vom Modell errechnete Werte*

	5 kW	10 kW	15 kW	30 kW	50 kW	70 kW	100 kW
Holzvergaserkessel	-	7145	7145	8462	-	-	-
Hackschnitzelkessel	-	-	16043	16789	18280	19771	22008
Pelletskessel (mit Raumaustr.)	-	10847	11165	12754	14873	16992	20171
Pelletsofen Luft	3780	4300	4950	-	-	-	-
Pelletsofen Wasser	5200	5470	6145	-	-	-	-
Gaskessel	-	2973	3148	4083	4360	5560	5786
Gas-Kombitherme	-	-	2649	-	-	-	-
Gas-Brennwertkessel	-	4799	5053	6736	7138	8926	9253
Ölkessel	-	3601	3818	4828	5168	6410	6684
Öl-Brennwertkessel	-	5255	5547	7304	7767	9599	9976
Kohlekessel	-	6073	6073	7193	-	-	-
Wärmepumpe Luft-Wasser	8455	9460	10343	12047	-	-	-
Wärmepumpe Sole	7669	8801	9818	11835	13583	14873	16374
Wärmepumpe Sole Tiefenbohrung	7669	8801	9818	11835	13583	14873	16374
Wärmepumpe Wasser/Wasser	8481	9197	10084	11803	13254	14307	15514
E-Konvektoren	1269	2538	3806	7613	12688	17763	25376
E-Nachtspeicheröfen	1877	3753	5630	11259	18766	28216	37532

Die Berechnung der Kosten für Stromdirektheizungen und Nachtspeicheröfen weicht von den oben angeführten Ansätzen ab. In diesen Fällen wird die Anzahl der Heizgeräte ermittelt und danach mit den Kosten pro Heizgerät multipliziert. Die Anzahl der Heizgeräte wird entweder durch Division der maximal benötigten Wärmeleistung mit der

Wärmeleistung pro Heizgerät oder durch Multiplikation der Anzahl der Wohnungen mit einem bestimmten Faktor bestimmt (siehe Formeln 5.57, 5.58). Die zweite Variante der Bestimmung der Anzahl der Heizgeräte, die für Gebäude mit relativ kleinem Heizwärmebedarf relevant ist, geht davon aus, dass eine Mindestanzahl von Heizgeräten pro Wohnung erforderlich ist, auch bei geringem Heizwärmebedarf. Formeln und Koeffizienten sind aus Bacher (2000) entnommen.

$$n_{EK} = \max(n_W \cdot 3,5; P_{WE} / P_{EK}) \quad (5.57)$$

$$n_{NO} = \max(n_W \cdot 2; P_{WE} / P_{NO}) \quad (5.58)$$

$$P_{EK} = \frac{P_{WE}}{n_{EK}} \quad (5.59)$$

$$P_{NO} = \frac{P_{WE}}{n_{NO}} \quad (5.60)$$

$$K_{EK} = n_{EK} \cdot (182,1 \cdot P_{EK}^{0,199} + K_{I, EK}) \quad (5.61)$$

$$K_{NO} = n_{NO} \cdot (466,8 \cdot P_{NO}^{0,594} + K_{I, NO}) \quad (5.62)$$

$n_{EK}$  ... Anzahl von E-Konvektoren (Stromdirektheizungen)

$n_{NO}$  ... Anzahl von Strom-Nachtspeicheröfen

$n_W$  ... Anzahl der Wohnungen pro Gebäude

$P_{EK}$  Wärmeleistung pro E-Konvektor [kW]

$P_{NO}$  Wärmeleistung pro Nachtspeicherofen [kW]

$K_{EK}$  Investitionskosten für E-Konvektoren (pro Gebäude) [EUR]

$K_{NO}$  Investitionskosten für E-Nachtspeicheröfen (pro Gebäude) [EUR]

$K_{I, EK}$  Kosten für Installation eines E-Konvektors [EUR]

$K_{I, NO}$  Kosten für Installation eines E-Nachtspeicherofens [EUR]

Zu den gesamten dem Wärmeerzeuger zugeordneten Kosten zählen neben den Kosten für den Wärmeerzeuger im engeren Sinn Kosten für Montage/Installation, Regelungseinrichtungen, Abgasanlage und Brennstoffzufuhr. Die verwendeten Kosten für Montage/Installation sind Anhang 8, für Regelungseinrichtungen und Abgasanlage Tab. 5.25 zu entnehmen<sup>48</sup>.

<sup>48</sup> Im Fall von Biomassekesseln sind Kosten für Montage/Installation, Regelungseinrichtungen, Abgasanlage und Brennstoffzufuhr bereits in den in Anhang 7 angeführten Berechnungsformeln inkludiert.

Tab. 5.25: Kosten für Regelungseinrichtungen und Abgasanlage von Wärmeerzeugern (in EUR),  
Datenquellen: Bacher (2000), Frey et al. (1994), eigene Annahmen, MFH=Mehrfamilienhaus

	Einfam.- haus	Zweifam.- haus	kleines MFH	großes MFH
Regelungseinrichtungen	900	900	1500	2500
Abgasanlage	900	900	1500	2000

Die verwendeten Ansätze zur Berechnung der Kosten von

- Wärmeverteilung
- Wärmeabgabe
- Lagerung des Energieträgers und andere bauliche Maßnahmen
- Anschluß
- Kamin

sind Anhang 9 zu entnehmen.

### 5.3.1.2.2 Warmwasserbereitung

#### **Integrierte Warmwasserbereitung**

Die Kosten für in das Heizsystem integrierte Warmwasserbereitung gliedern sich in Kosten für den Warmwasserspeicher, Kosten für Wärmeverteilung und eventuell anfallende Kosten für zusätzlichen Lagerraumbedarf an Brennstoff. Kosten für Wärmeverteilung werden nur dann eingerechnet, falls diese neu errichtet oder ersetzt wird. Die Formeln für Kosten des Warmwasserspeichers und der Wärmeverteilung sind von Bacher (2000) entlehnt und adaptiert. Kosten für zusätzlichen Lagerraumbedarf ( $K_{WW,int,BL}$ ) orientieren sich am zusätzlichen Endenergiebedarf (und damit Brennstoffbedarf) für die Warmwasserbereitung, wobei die Berechnungsansätze aus Anhang 9 (A.9.3) zur Anwendung kommen.

$$K_{WW,int} = K_{WW,int,Sp} + K_{WW,int,Vtlg} + K_{WW,int,BL} \quad (5.63)$$

$$K_{WW,int} = 1000 + 95 \cdot V_{WW,Sp}^{0,475} \quad (5.64)$$

$$V_{WW,Sp} = \frac{N_{EWW,d,Geb} \cdot 3600}{\eta_{WE} \cdot c_{p,H_2O} \cdot \Delta T_{WW}} \quad (5.65)$$

$$K_{WW,int,Vtlg} = 850 \cdot n_W \quad (5.66)$$

$K_{WW,int}$  Investitionskosten für ins Heizsystem integrierte Warmwasserbereitung [EUR]

$K_{WW,int,Sp}$  Kosten für Warmwasserspeicher bei integrierter Warmwasserbereitung [EUR]

$K_{WW,int,Vtlg}$  Kosten für Wärmeverteilung bei integrierter Warmwasserbereitung [EUR]

$K_{WW,int,BL}$	Zusatzkosten für Brennstofflagerung bei integrierter Warmwasserbereitung [EUR]
$V_{WW,Sp}$	Volumen des Warmwasserspeichers [l]
$NE_{WW,d,Geb}$	Nutzenergiebedarf für Warmwasser pro Tag pro Gebäude [kWh]
$\eta_{WE}$	Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers [-]
$c_{p,H_2O}$	spezifische Dichte von Wasser (4,19 kJ/kg.K)
$\Delta T_{WW}$	Temperaturdifferenz zwischen warmen und kaltem Wasser (38 °K im Modell)

### Einzelssysteme Warmwasserbereitung

Fünf verschiedene nicht in das Heizsystem integrierte Einzelssysteme für die Warmwasserbereitung werden im Modell abgebildet:

- Dezentrale Elektro-Warmwasserspeicher (pro Wohneinheit)
- Zentraler Elektro-Warmwasserspeicher (für das gesamte Gebäude)
- Dezentrale Elektro-Durchlauferhitzer
- Warmwasser-Wärmepumpe (für Ein- und Zweifamilienhäuser)
- Solaranlage zur Warmwasserbereitung (mit elektrischer Zusatzheizung)

Für alle Einzelssysteme zur Warmwasserbereitung gilt:

$$K_{WE,E} = K_{WW,E,Sp} + K_{WW,E,Vtlg} \quad (5.67)$$

$K_{WW,E}$  Investitionskosten für nicht in das Heizsystem integrierte Einzelssysteme zur Warmwasserbereitung [EUR]

$K_{WW,E,Sp}$  Kosten für Warmwasserspeicher bei Einzelssystemen zur Warmwasserbereitung [EUR]

$K_{WW,E,Vtlg}$  Kosten für Wärmeverteilung bei Einzelssystemen zur Warmwasserbereitung [EUR]

bzw. für E-Durchlauferhitzer und Warmwasser-Wärmepumpen:

$$K_{WE,E} = K_{WW,E,WE} + K_{WW,E,Vtlg} \quad (5.68)$$

$K_{WW,E,WE}$  Kosten für Wärmeerzeuger bei Einzelssystemen zur Warmwasserbereitung [EUR]

Die verwendeten Ansätze zur Berechnung der Kosten von

- Warmwasserspeichern
- Wärmeverteilung bei Einzelssystemen zur Warmwasserbereitung
- Wärmeerzeuger bei Einzelssystemen zur Warmwasserbereitung

sind Anhang 10 zu entnehmen.

### 5.3.1.2.3 Solaranlagen

Solaranlagen zur Warmwasserbereitung in Ein- und Zweifamilienhäusern werden als Ein-Speichersysteme (nur Warmwasserspeicher), in Mehrfamilienhäusern als Zwei-Speichersysteme modelliert. Der kleinere Speicher dient hier als Bereitschafts- bzw. Warmwasserspeicher, der größere Speicher als Energie- bzw. Pufferspeicher. Es sind auch Kombi-Speicher erhältlich (Pufferspeicher mit integriertem Bereitschaftsspeicher), diese werden im Modell nicht berücksichtigt.

Solar-Kombisysteme sind prinzipiell als Zwei-Speichersysteme abgebildet (Warmwasserspeicher und Pufferspeicher).

Die Kosten für Solaranlagen setzen sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Kollektor
- Speicher (Warmwasserspeicher und ev. Pufferspeicher)
- Regelung und Zubehör
- Warmwasserverteilleitungen (wie im konventionellen Warmwassersystem, unabhängig von der Solaranlage)
- Leitungen speziell für die Solaranlage
- Montage
- Planung (für große Anlagen bzw. Kombisysteme relevant)

$$K_{Sol} = K_{Kol} + K_{Sp,sol} + K_{Reg} + K_{Vtlg,konv} + K_{Vtlg,sol} + K_{M,sol} + K_{P,sol} \quad (5.69)$$

$K_{Sol}$  Investitionskosten Solaranlage (zur Warmwasserbereitung oder Kombisystem) [EUR]

$K_{Kol}$  Kosten der Solarkollektoren [EUR]

$K_{Sp,sol}$  Gesamtkosten für Speicher (Warmwasserspeicher, Pufferspeicher) [EUR]

$K_{Reg}$  Kosten für Regelung [EUR]

$K_{Vtlg,konv}$  Kosten für Wärmeverteilung der Warmwasserbereitung (unabhängig von der Solaranlage) [EUR]

$K_{Vtlg,sol}$  Kosten der Leitungen für die Solaranlage [EUR]

$K_{M,sol}$  Kosten für Montage der Solaranlage [EUR]

$K_{P,sol}$  Kosten für Planung der Solaranlage [EUR]

$$K_{Kol} = K_{Kol, sp} \cdot A_{Kol} \quad (5.70)$$

$$K_{Sp, sol, WW} = K_{Sp1, sp} \cdot V_{Sp1} + K_{Sp2, sp} \cdot V_{Sp2} \quad (5.71)$$

$$K_{Sp, sol, KS} = K_{Pu, sp} \cdot V_{Pu} + K_{WW - Sp, sp} \cdot V_{WW - Sp} \quad (5.72)$$

$K_{Kol,sp}$  spezifische Kosten für Kollektor, pro Kollektorfläche [EUR/m<sup>2</sup>]

$A_{Kol}$  Kollektorfläche [m<sup>2</sup>]

$K_{Sp,sol,WW}$	Gesamtkosten für Speicher bei Solaranlagen zur Warmwasserbereitung [EUR]
$K_{Sp1,sp}$	spezifische Kosten für Speicher 1, pro Volumen [EUR/l]
$K_{Sp2,sp}$	spezifische Kosten für Speicher 2, pro Volumen [EUR/l]
$V_{Sp1}$	Volumen für Speicher 1 [l]
$V_{Sp2}$	Volumen für Speicher 2 [l]
$K_{Sp,sol,KS}$	Gesamtkosten für Speicher bei Solar-Kombisystemen (Warmwasserbereitung + Heizungsunterstützung) [EUR]
$K_{Pu,sp}$	spezifische Kosten für den Pufferspeicher, pro Volumen [EUR/l]
$K_{WW-Sp,sp}$	spezifische Kosten für Warmwasserspeicher, pro Volumen [EUR/l]
$V_{Pu}$	Volumen des Pufferspeichers [l]
$V_{WW-Sp}$	Volumen des Warmwasserspeichers [l]

In Anhang 11 sind die im Modell verwendeten Werte verschiedener Kostenkomponenten in Abhängigkeit der Gebäudegröße / des Gebäudetyps für Warmwasser-Solaranlagen und für Solar-Kombisysteme zusammengefasst. Anhang 12 gibt eine Übersicht über getroffene Annahmen zur Dimensionierung von Solaranlagen.

#### 5.3.1.2.4 Dämmstoffe und Dämmsysteme

Betrachtet man die Kosten für 1 m<sup>2</sup> gedämmte Fläche, teilen sich die Kosten auf in variable, von der Dämmstoffdicke bzw. vom Dämmvolumen abhängige Kosten und fixe, von der Dämmstoffdicke unabhängige Kosten. Die nach dieser Terminologie „fixen“ Kosten sind also nur von der gedämmten Fläche abhängig. Zu den variablen Kosten zählen in erster Linie Kosten für den Dämmstoff, weiters Kosten für andere Materialien, deren Einsatz mit der Dämmdicke korreliert und Kosten für die Holzkonstruktion (falls vorhanden). Zu den fixen Kosten zählen Arbeitskosten und Materialkosten, wobei Arbeitskosten diesen Kostenfaktor dominieren.

Die Formel zur Berechnung der Kosten für die Dämmung eines Bauteils lautet also:

$$K_{D, Bt} = A_{Bt} \cdot (K_v \cdot d_D + K_f) \quad (5.73)$$

$$K_v = K_D + K_a + a_H \cdot K_H \quad (5.74)$$

$K_{D, Bt}$	Kosten der Dämmung für Bauteil Bt [EUR]
$A_{Bt}$	Fläche des Bauteils [m <sup>2</sup> ]
$K_v$	volumensabhängige Kosten der Dämmung (pro Dämmvolumen) [EUR/m <sup>3</sup> ]
$K_f$	flächenabhängige Kosten der Dämmung (unabhängig von der Dämmdicke) [EUR/m <sup>2</sup> ]
$d_D$	Dämmstoffdicke [m]

$K_D$	Kosten des Dämmstoffs [EUR/m <sup>3</sup> ]
$K_a$	andere variable Kosten (Materialkosten, die abhängig von der Dämmstoffdicke sind) [EUR/m <sup>3</sup> ]
$K_H$	Kosten Holzkonstruktion [EUR/m <sup>3</sup> ]
$a_H$	Flächenanteil der Holzkonstruktion [-]

Pro Bauteil werden zwei oder drei verschiedene Dämmsysteme berücksichtigt.

*Fassadendämmung:*

- a) Wärmedämmverbundsystem
- b) Dämmung in Holzkonstruktion / hinterlüftete Fassade

*Oberste Geschoßdecke:*

- a) Anbringen von Dämmplatten, Annahme: Mix aus 40% begehbaren, 60% nicht begehbaren Platten
  - b) Dämmung in Holzkonstruktion
  - c) Distanzbodensystem
- alle Konstruktionen an der Oberseite der Decke

*Kellerdecke (Unterste Geschoßdecke):*

- a) Anbringen von Dämmplatten
- b) Dämmung in Holzkonstruktion

In Anhang 13 sind Tabellen über die Kosten von Dämmstoffen und Dämmsystemen und herangezogene Datenquellen angeführt.

### 5.3.1.2.5 Fenster

Insgesamt sechs Fenstertypen (PVC-Rahmen, Holzrahmen, 3 Glasqualitäten) sind im Modell berücksichtigt. Die Ermittlung der Kosten beruht auf folgenden Annahmen: Holzfenster gleicher Glasqualität sind um 30% teurer als PVC-Fenster, bei gleichem Rahmen sind Fenster mit  $U_F=1,1$  um 30% teurer, Fenster mit  $U_F=0,8$  um 70% teurer als Fenster mit  $U_F=0,8$  (siehe Tab. 5.26 zu Kosten verschiedener Fenstertypen).

Tab. 5.26: Kosten verschiedener Fenstertypen, im Modell verwendete Werte,  $U_F$  = U-Wert des gesamten Fensters, Datenquellen: siehe unten

Fenstertyp	U-Wert Glas (W/m <sup>2</sup> K)	Materialkosten (EUR/m <sup>2</sup> )	Montagekosten (EUR/m <sup>2</sup> )
PVC-Fenster, $U_F=1,3$	1,1	364	45
PVC-Fenster, $U_F=1,1$	0,9	473,2	45
PVC-Fenster, $U_F=0,8$	0,4 – 0,7	618,8	54
Holzrahmen- Fenster, $U_F=1,3$	1,1	280	45
Holzrahmen – Fenster, $U_F=1,1$	0,9	364	45
Holzrahmen – Fenster, $U_F=0,8$	0,4 – 0,7	476	54

Folgende Quellen wurden für die Ermittlung der Kosten von Fenstern herangezogen:

- Preislisten von Herstellern (Internet)
- persönliche Auskunft von Herstellern (Messe „Bauen und Energie“)
- Projekt “INVERT”, [www.invert.at](http://www.invert.at)
- „Wirtschaftliche und ökologische Optimierung der Heizenergieversorgung“, Haas (1999)
- „Altbaumodernisierung im Detail“, Böhning / Schmitz (2002)
- „Energieeffiziente Wohngebäude“, Schulze Darup (2002)

### 5.3.2 Externe Kosten

#### *Definition Externe Kosten*

„Externe Effekte sind Wirkungen, die auf das Verhalten eines oder mehrerer Individuen zurückzuführen sind, aber nicht nur diese, sondern (oder auch nur) andere Individuen betreffen und die nicht durch Gegenleistungen abgegolten werden. Negative externe Effekte oder externe Kosten sind für die betroffenen Individuen unerwünschte Effekte, positive externe Effekte oder externe Nutzen sind für die betroffenen Individuen erwünschte Effekte.“ (Definition gemäß Adensam et al. 2002, S. 3).

Ein Beispiel für einen negativen externen Effekt bzw. die Verursachung externer Kosten sind gesundheitliche Beeinträchtigungen ausgelöst durch Emissionen von Luftschadstoffen. Aufgrund der mehr oder weniger großräumigen Verteilung von Luftschadstoffen liegt es auf der Hand, dass Auswirkungen dieser nicht nur die Emittenten selbst betreffen. Ein weiteres Beispiel für das Auftreten externer Effekte sind Effekte, die durch den Klimawandel bedingt sind, welcher durch Emission von Treibhausgasemissionen ausgelöst wird. In diesem Fall wird das Auseinanderklaffen von Verursachern und Betroffenen (wie das bei externen Effekten generell der Fall ist) besonders deutlich. Während die Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen in der Nordhemisphäre (USA, Europa, Japan, China) situiert sind, sind wahrscheinlich – zumindest nach heutigem Wissensstand über die Konsequenzen des Klimawandels - die Hauptbetroffenen von negativen Auswirkungen in Ländern der Südhemisphäre.

Da sich externe Kosten bzw. externe Nutzen nicht in Marktpreisen widerspiegeln, sind Eingriffe von außerhalb des Marktes erforderlich, um externe Effekte zu „internalisieren“. Externe Kosten sollten beim Verursacher wirksam werden (z.B. durch Einführung / Erhöhung von Steuern), externe Nutzen können durch Transferzahlungen an den Verursacher abgegolten werden. Energie- bzw. CO<sub>2</sub>-Steuern oder Emissionszertifikate sind Maßnahmen zur Internalisierung externer Kosten.

#### *Methoden zur Bestimmung externer Kosten / Probleme bei der Bestimmung externer Kosten*

Gemäß Adensam et al. (2002), S. 4ff. erfolgt die Ermittlung von externen Kosten in 3 Schritten:

1. Identifizierung externer Effekte
2. Quantifizierung dieser Effekte
3. Monetarisierung der Effekte

Die Identifizierung externer Effekte beschäftigt sich mit der Frage, welche externen Effekte einer bestimmten Aktivität zuzuordnen sind. Es kann schwierig sein, externe Effekte zu identifizieren, insbesondere wenn es sich um mögliche externen Effekte in der Zukunft handelt.

Bei der Quantifizierung werden Ursache – Wirkungszusammenhänge betrachtet (z.B. Wie wirkt sich eine bestimmte Emissionsmenge eines Schadstoffs auf Schäden an Gebäuden

aus?). Oft sind derartige Ursache – Wirkungsbeziehungen umstritten und eine Quantifizierung schwierig.

Für die Monetarisierung schließlich werden grundsätzlich zwei Ansätze verfolgt: der Schadenkostenansatz oder der Vermeidungskostenansatz.

Beim Schadenkostenansatz werden die durch externe Effekte verursachten Schäden abgeschätzt und monetär bewertet. Die Monetarisierung kann durch verschiedene Methoden erfolgen (Abschätzung der „Willingness to Pay“, Abschätzung der „Willingness to Accept“, hedonistische Preisanalyse, Reparaturkostenermittlung).

Beim Vermeidungskostenansatz werden die Kosten zur Vermeidung von Schäden bzw. zur Erreichung bestimmter Reduktionsziele (deren Erreichung die Vermeidung von Schäden erwarten lässt) ermittelt. Die Höhe dieser Kosten hängt natürlich vom Reduktionsziel ab.

Wie in den bisherigen Ausführungen bereits angedeutet wurde, ist die Ermittlung bzw. Monetarisierung von externen Kosten mit einigen Schwierigkeiten und Unsicherheiten behaftet. Dies beginnt bereits beim Schritt der Identifizierung („Konnten alle wesentlichen externen Effekte identifiziert werden?“), setzt sich über die Quantifizierung fort („Wie können Ursache-Wirkungsbeziehungen quantitativ beschrieben werden?“) und endet bei der eigentlichen Monetarisierung. Die oben angeführten Methoden der Monetarisierung haben jeweils ihre Stärken und Schwächen, worauf aber an dieser Stelle nicht im Detail eingegangen werden soll<sup>49</sup>.

Insbesondere eine monetäre Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels erscheint problematisch. Hohmeyer (1996) demonstriert die Problematik der Bewertung am Beispiel von Ernteaussfällen, die eine mögliche Folge von Klimaänderungen sein können. Ein Ernteaussfall von 200 kg Getreide kann in Berechnungsvariante 1 mit dem Ernteaussfall eines amerikanischen Landwirts bewertet werden, der etwa 80 US\$ beträgt. In Variante 2 läßt sich argumentieren, dass ein Ernteaussfall desselben Ausmaßes in einem afrikanischen Land zum Hungertod eines Menschen führen kann. Wie kann ein Todesfall monetär bewertet werden? Darf menschliches Leben monetär bewertet werden? Ist Variante 1 oder Variante 2 bei der Ermittlung der externen Kosten heranzuziehen? Bei Beantwortung dieser Fragen müssen ethisch-normative Entscheidungen getroffen werden.

Ein weiterer Parameter von großem Einfluß ist die Wahl der Diskontierungsrate, da mit den meisten Auswirkungen des Treibhauseffekts erst in fernerer Zukunft zu rechnen ist. Angenommen, der oben angeführte Ernteaussfall in der Höhe von 80US\$ tritt in 100 Jahren ein, so beträgt dessen Gegenwartswert bei einer Diskontierungsrate mit 1% 30 US\$, bei einer Diskontierung mit 10% jedoch nur 0,006 US\$. Mit der Wahl der Diskontierungsrate wird somit ein Urteil über eine weitere ethisch-normative Frage, nämlich die der intergenerationellen Gerechtigkeit, gefällt.

Aufgrund der oben argumentierten besonders hohen Unsicherheiten einer Anwendung des Schadenkostenansatzes im Fall von Effekten des Klimawandels wird in Adensam et al. (2002) der Vermeidungskostenansatz herangezogen, um die externen Effekte von Treibhausgasemissionen zu monetarisieren. Es werden also jene Kosten betrachtet, die

---

<sup>49</sup> Für eine Diskussion dieser Monetarisierungsansätze siehe z.B. Adensam et al. S. 5ff.

entstehen, um aktiv die Treibhausgasemissionen auf ein bestimmtes Niveau (z.B. Kyoto-Ziel) zu reduzieren.

### *Verwendete Daten*

Die in dieser Arbeit verwendeten Werte zur Berechnung externer Kosten basieren auf der Studie „Externe Kosten im Hochbau“ (Adensam et al. 2002) sowie auf Werten, die in Haas/Kranzl (2002) verwendet werden.

In der Studie „Externe Kosten im Hochbau“ wird auf Arbeiten, die Umweltschäden anhand von sogenannten „Ökopotenzialen“ quantifizieren, zurückgegriffen:

Zu diesen Ökopotenzialen zählen:

- Beitrag zum Treibhauseffekt bzw. Global Warming Potential (GWP), angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent
- Abbau des stratosphärischen Ozons bzw. Ozone Depletion Potential (ODP), angegeben in kg R11-Äquivalent
- Photochemische Oxidantienbildung (= Bildung von bodennahem Ozon) bzw. Photochemical Ozone Creation Potential (POCP), angegeben in kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-Äquivalent
- Versauerung bzw. Acidification Potential (AP), angegeben in kg SO<sub>2</sub>-Äquivalent
- Überdüngung bzw. Nutrifcation Potential (NP), angegeben in kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-Äquivalent

Der Beitrag des Treibhausgaspotenzials zu den externen Kosten wird über Vermeidungskosten<sup>50</sup> ermittelt, der Beitrag der anderen Potenziale über Schadenskosten berechnet. Für die Vermeidungskosten von Treibhausgasemissionen wird ein Minimalwert (25,44 €/t CO<sub>2</sub>-Äqu.)<sup>51</sup> und ein Maximalwert (61,77 €/t CO<sub>2</sub>-Äqu.)<sup>52</sup> angenommen. Im folgenden wird für Berechnung der „minimalen externen Kosten“ der Minimalwert pro CO<sub>2</sub>-Äquivalent verwendet, für Berechnung der „maximalen externen Kosten“ der Maximalwert pro CO<sub>2</sub>-Äquivalent.

---

<sup>50</sup> Begründung für die Wahl der Vermeidungskosten siehe oben.

<sup>51</sup> Minimalwert basierend auf Adensam et al. (1996), Lechner et al. (1998).

<sup>52</sup> Maximalwert basierend auf Balandynowicz et al. (1995). Als Reduktionsziel liegt dieser Studie das Torontoziel (20%ige Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2005 im Vergleich zu 1988) zugrunde.

Tabelle 5.26: Übersicht über spezifische externe Kosten der einzelnen Ökopotenziele

Ökopotenzial	Kostenart	spez. externe Kosten (€/t ...)	Anmerkung
GWP Treibhauseffekt	Vermeidungs- kosten	25,44 €/t CO <sub>2</sub> -Äqu.	Minimalwert
		61,77 €/t CO <sub>2</sub> -Äqu.	Maximalwert
ODP Abbau Ozon (Stratosphäre)	Schadenkosten	11.850 €/t R11-Äqu	Krankheits- und Mortalitätskosten
POCP Bildung bodennahes Ozon	Schadenkosten	265 €/t C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äqu.	Mortalitätskosten
AP Versauerung	Schadenkosten	1.690 €/t SO <sub>2</sub> -Äqu.	Wald- und Gebäudeschäden
NP Nitrifizierung (Überdüngung)	Schadenkosten	1.700 €/t PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äqu.	Gesundheitskosten

In der Arbeit von Haas/Kranzl (2002) wird bei der Berechnung der externen Kosten der Verbrennung verschiedener Brennstoffe ein etwas anderer Ansatz verfolgt. Neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen werden für alle bedeutsamen Luftschadstoffe (SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, Staub) spezifische externe Kosten für die Berechnung der gesamten externen Kosten herangezogen. Die Werte für diese spezifischen externen Kosten (siehe Tab. 5.27, Werte angegeben in EURct/kg) stammen aus einer Studie des Umwelt und Prognose-Institut Heidelberg (UPI 1991).

Tab. 5.27: Externe Kosten verschiedener Luftschadstoffe, nach Haas/Kranzl (2002), Primärquelle: UPI 1991

Schadstoff	EURct/kg
CO <sub>2</sub> -Äqu.	2,5 – 14,5
SO <sub>2</sub>	366
CO	13
NO <sub>x</sub>	459
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	366
Staub	369

Da hier im Vergleich zur Berechnung der externen Kosten basierend auf Ökopotenzenzen zusätzliche Komponenten einfließen (CO, NO<sub>x</sub>, Staub), sind Werte der externen Kosten der Verbrennung verschiedener Energieträger in diesem Berechnungsmodus tendenziell höher.

Für diese Arbeit wurden die externen Kosten der Verbrennung von Energieträgern in einer Mischvariante berechnet (die externen Kosten der Treibhausgasemissionen wurden von Adensam et al. (2002) entnommen, die externen Kosten der Luftschadstoffe von Haas / Kranzl (2002)).

Tab. 5.28: Externe Kosten der Verbrennung verschiedener Energieträger I, Vergleich von zwei Berechnungsvarianten

Energieträger	Berechnungsvariante „Externe Kosten im Hochbau“		in dieser Arbeit verwendete Berechnungsvariante (Mischform)	
	min. ext. Kosten (€/kWh Endenergie)	max. ext. Kosten (€/kWh Endenergie)	min. ext. Kosten (€/kWh Endenergie)	max. ext. Kosten (€/kWh Endenergie)
Heizöl EL	0,943	2,11	1,17	2,35
Erdgas	0,72	1,68	0,79	1,75
Stückholz	0,1	0,134	0,9	1,02
Waldhackgut	0,12	0,17	0,86	0,99
Pellets (Sägenebenprod.)	k.A.	k.A.	0,29	0,36
Pellets (Kurzumtriebshackgut)	k.A.	k.A.	0,58	0,88
Pellets (Mix)	k.A.	k.A.	0,35	0,45

Wie aus Tabelle 5.28 hervorgeht, differieren die Werte für Heizöl und Erdgas in den beiden Berechnungsvarianten schwach, während bei Stückholz und Waldhackgut große Unterschiede bestehen. Die Unterschiede resultieren daher, dass die externen Kosten der CO-, NO<sub>x</sub>- und Staubemissionen bei diesen Brennstoffen in der zweiten Variante (Tabelle rechts) relativ stark zu Buche schlagen, während sie in der ersten Variante (Tabelle links) nicht berücksichtigt sind.

Tab. 5.29: Externe Kosten verschiedener Energieträger II, für Modell verwendete Werte

Energieträger	min. ext. Kosten (€/kWh Endenergie)	Max. ext. Kosten (€/kWh Endenergie)	Datenquelle
Fernwärme Wien	0,53	1,18	Ext. Kosten I, S. 67, multipliziert mit Korrekturfaktor 1,1 (Berücksichtigung von Luftschadstoffen (CO, NO <sub>x</sub> , Staub))
Fernwärme sonst (außerh. v. Wien)	0,75	1,65	abgeleitet von „Fernwärme Wien“ (Korrekturfaktor 1,4)
Fernwärme Biomasse	0,77	0,9	abgeleitet von Werten für „Waldhackgut“, Korrekturfaktor 0,9 (wegen schadstoffärmerer Verbrennung)
el. Strom (Österreich Mix)	0,94	2	Ext. Kosten I, S. 67 (Korrekturfaktor 1,1)
el. Strom (Österreich Winter)	1,37	2,97	abgeleitet von „el. Strom (Österreich Mix)“, Korrekturfaktor 1,47
el. Strom (UCPTE Mix)	2,2	4,26	Ext. Kosten I, S. 67 (Korrekturfaktor 1,1)
Kohle/Koks	1,65	3,3	abgeleitet von „Heizöl EL“, Korrekturfaktor 1,41

Externe Kosten für die übrigen Energieträger sind aus Tabelle 5.29 ersichtlich. Die im Berechnungsmodus basierend auf Ökopotenzen nicht einfließenden Komponenten (CO, NO<sub>x</sub>, Staub) sind durch Multiplikation der Werte aus „Externe Kosten I“ (Adensam et al. 2002) mit einem Korrekturfaktor 1,1 berücksichtigt. Externe Kosten der Nutzung von Energieträgern, für die in Adensam et al. (2002) keine externe Kosten angegeben sind, sind abgeleitet, wie jeweils in der Spalte „Datenquelle“ in Tabelle 5.29 angegeben ist. Der Korrekturfaktor basiert in erster Linie auf Unterschieden der verbrennungsverursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen.

In einigen Arbeiten (z.B. in Mötzl/Zelger 2000) werden für nachwachsende Rohstoffe CO<sub>2</sub>-Gutschriften veranschlagt. Diese Gutschriften entsprechen der Menge an CO<sub>2</sub>, die die Pflanze im Laufe ihres Lebens aufgenommen und als C-hältige Biomasse gebunden hat. Bei Berücksichtigung von CO<sub>2</sub>-Gutschriften können nachwachsende Rohstoffe bzw. Materialien mit einem hohen Anteil an nachwachsenden Rohstoffen negative CO<sub>2</sub>-Äquivalente aufweisen. Falls der Rohstoff am Ende seines technischen Einsatzes verbrannt wird oder verrottet, wird dieser gebundene Kohlenstoff in Form von CO<sub>2</sub> oder CH<sub>4</sub> (bei Verrottung) frei. Es ist also eine Frage des Betrachtungszeitraums, ob CO<sub>2</sub>-Gutschriften einzurechnen sind oder nicht.

In dieser Arbeit werden CO<sub>2</sub>-Gutschriften nicht berücksichtigt, das heißt, dass nachwachsende Rohstoffe im Vergleich zu Bilanzierungen, wo CO<sub>2</sub>-Gutschriften berücksichtigt sind, relativ benachteiligt sind. Falls nachwachsende Rohstoffe aber auch ohne Berücksichtigung von CO<sub>2</sub>-Gutschriften am besten abschneiden, liegt die Aussage „Nachwachsende Rohstoffe haben niedrigere CO<sub>2</sub>-Äquivalente“ eher auf der „sicheren Seite“.

Ob CO<sub>2</sub>-Gutschriften zur Anwendung kommen oder nicht, hat einerseits unmittelbaren Einfluß auf die Höhe der kumulierten CO<sub>2</sub>-Äquivalente und somit auch auf die Höhe der externen Kosten.

Tab. 5.30: Maximale externe Kosten für verschiedene Dämmstoffe, Vergleich verschiedener Quellen und Berechnungsarten, Datenquellen: Externe Kosten I (Adensam et al. 2002), GEMIS 4.2 Österreich, Ökologie der Dämmstoffe (Mötzl/Zelger 2000), ergänzt mit eigenen Berechnungen

Dämmstoff	Ext. Kosten I (mit CO <sub>2</sub> -Gutschrift)	GEMIS 4.2 Öst. (*) (ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift)	Ökologie der Dämmst. (mit CO <sub>2</sub> -Gutschrift)	Ökologie der Dämmst. (ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift)	verwendeter Wert (ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift)	verw. Wert (pro Vol.)
	maximale externe Kosten (€/kg)					(€/m <sup>3</sup> )
EPS	31	55	23	23	36	7,3
Steinwolle	-	8	10	10	9	2,7 – 13,5
Glaswolle	12,3	17	15,3	15,3	14,9	3 – 22,3
Zellulose	4	1,1	1,9	1,9	3	1,2 – 1,6
Kork	-8,5	-	-8	2,3	2,3	2,6
Flachs	2,8	-	3,6	10	10	3
Hanf	-6	-	-2	2,9	2,9	0,9 – 2,9
Schafwolle	-4,4	-	1,3	4,4	4,4	0,65
Holzfaserdämmplatte	-5	2,5	-1,2	6	4,3	2,2 – 6,5
Exp. Perlit	3,9	-	5	5	4,4	4

(\*) unterschiedlicher Berechnungsansatz bei GEMIS 4.2 Österreich

Tabelle 5.30 zeigt einerseits die Streuung der Werte für maximale externe Kosten bei Verwendung von drei unterschiedlichen Datenquellen sowie die letztendlich für das hier beschriebene Modell verwendeten Werte. Die Unterschiede bezüglich Berechnungsmodus mit und ohne CO<sub>2</sub>-Gutschrift sind ebenfalls ersichtlich. Die Berechnung der Werte auf Basis der Daten von GEMIS 4.2 Österreich<sup>53</sup> folgte einem unterschiedlichen Berechnungsansatz. Hier flossen CO<sub>2</sub>-Äquivalente, SO<sub>2</sub>-Äquivalente, NO<sub>x</sub>, Staub, CO und C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> in die Berechnung ein, während in den beiden anderen Fällen die Berechnung mit Hilfe der Ökopoteniale (siehe oben) erfolgte.

Die deutlich höchsten Werte für externe Kosten weist EPS (Expandiertes Polystyrol) auf, gefolgt von den mineralischen Dämmstoffen (Glaswolle, Steinwolle), die geringsten externen Kosten verursachen Kork, Hanf und Zellulose. Zu beachten ist, dass die Werte in Tabelle 5.30 (abgesehen von der letzten Spalte) pro Masse (kg) angegeben sind, in der letzten Spalte pro Volumen (m<sup>3</sup>). Die Bandbreite der Werte für externe Kosten pro Volumen ergibt sich daraus, dass Dämmstoffe je nach Anwendungsbereich in verschiedenen Dichten angeboten werden. Steinwoll- und Glaswollämmplatten mit

<sup>53</sup> GEMIS steht für „Globales Emissions Modell Integrierter Systeme“ und wurde in Deutschland als Instrument zur vergleichenden Analyse von Umwelteffekten der Energiebereitstellung und -nutzung entwickelt und wird ständig weiterentwickelt. GEMIS verfügt über eine umfangreiche Datenbasis und ermöglicht Energie- und Emissionsbilanzierungen. Eine speziell für Österreich adaptierte Version von GEMIS wird vom Umweltbundesamt angeboten (<http://www.umweltbundesamt.at/ueberuns/produkte/gemis/>). Allgemeine Informationen finden sich unter [www.gemis.de](http://www.gemis.de).

entsprechend hoher Dichte ( $150 \text{ kg/m}^3$ ) erreichen deutlich höhere externe Kosten pro  $\text{m}^3$  als EPS ( $20 \text{ kg/m}^3$ ). Schafwolle, Zellulose und Hanf weisen bei dieser Betrachtungsweise die geringsten externen Kosten auf.

Die prozentuellen Anteile der externen Kosten an den monetären Kosten sind relativ gering, sie liegen maximal bei 7,7% (EPS), abgesehen von Glaswolle (3,3% – 7,7% ) und Steinwolle (3% - 4,6%) liegen diese Werte für die übrigen Dämmstoffe unter 3%.

### 5.3.3 Energie- und Treibhausgasbilanzierungen

#### 5.3.3.1 Definitionen

##### *Graue Energie*

„Als Graue Energie wird die Energiemenge bezeichnet, die für die Herstellung, Transport und Lagerung (inkl. aller Vorprodukte) sowie die Entsorgung eines Produktes verbraucht wird, im Gegensatz zum direkten Energieverbrauch bei dessen Anwendung.“<sup>54</sup>.

Das Konzept der Grauen Energie läßt sich sowohl auf Produkte als auch auf Dienstleistungen anwenden. Ursprünglich wurde der Begriff „Graue Energie“ in der Schweiz in den 1970er-Jahren geprägt und wurde zunächst nur auf den Energieaufwand importierter Güter bezogen. Mittlerweile ist der Begriff aber auch im übrigen deutschen Sprachraum gebräuchlich und bezieht sich nicht nur auf importierte Güter, sondern generell auf den kumulierten indirekten Energieaufwand für Produkte und Dienstleistungen. (Spreng 1995, S. 46ff.).

Anders ausgedrückt, läßt sich Graue Energie als diejenige Energiemenge bezeichnen, „welche im Zusammenhang mit einem Produkt oder einer Dienstleistung aufgewendet werden muss, aber nicht unbedingt unmittelbar bemerkt wird.“ (May 1996, S. 7)

Im Fall des Betriebs einer Heizung stellt der Brennstoffverbrauch den direkten und unmittelbar bemerkbaren Energieverbrauch dar. Dargestellt am Beispiel einer Ölheizung fallen zusätzlich zum Brennstoffverbrauch die folgenden indirekten Energieaufwände an (May 1996, S. 7):

- Brennstoffbereitstellung (Ölförderung- und Transport, Raffination, Entschwefelung, Anlieferung)
- Heizkesselherstellung (Produktionsaufwände, Unterhalt der Herstellerfirma)
- Bereitstellung der Infrastruktur (Öltank, Kamin, Betrieb von Brenners und Umwälzpumpen)
- Unterhalt des Heizungssystems (Service, Ersatzteile, Rauchfangkehrer)
- Entsorgung (Abfälle, Ersatz des Heizkessels)

Diese indirekten Aufwände sind für Endverbraucher nicht unmittelbar wahrnehmbar und auch für Experten nicht leicht zu quantifizieren. Je nach angewandter Methodik und Datengrundlage können Werte für Graue Energie daher in einem durchaus erheblichen Ausmaß variieren.

Im deutschen Sprachraum werden auch einige andere Begriffe, die der „Grauen Energie“ im wesentlichen bedeutungsgleich sind, verwendet:

- Kumulierter Energieaufwand
- Kumulierter Energieverbrauch
- Primärenergieinhalt
- Primärenergieaufwand

---

<sup>54</sup> Diese Definition des Begriffs „Graue Energie“ ist der Online-Enzyklopädie Wikipedia ([http://de.wikipedia.org/wiki/Graue\\_Energie](http://de.wikipedia.org/wiki/Graue_Energie)) entnommen.

Im englischen Sprachraum entsprechen dem Begriff „Graue Energie“ die Begriffe „embodied energy“ oder seltener „embedded energy“.

#### *Kumulierter Energieaufwand (KEA)*

In der VDI-Richtlinie 4600 wird der „Kumulierte Energieaufwand“ folgendermaßen definiert:

„Der Kumulierte Energieaufwand gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwandes an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. Dieser Energieaufwand stellt die Summe der Kumulierten Energieaufwände für die Herstellung ( $KEA_H$ ), die Nutzung ( $KEA_N$ ) und die Entsorgung ( $KEA_E$ ) eines ökonomischen Gutes dar, wobei für diese Teilsummen anzugeben ist, welche Vor- und Nebenstufen miteinbezogen sind.“ (zitiert nach Hutter / Köhler (1999), S. 2)

#### *Kumulierter Energieverbrauch (KEV)*

„Die Summe aller Primärenergien zur Herstellung und Nutzung eines Produkts oder einer Dienstleistung inklusiver aller Vorketten, jedoch ohne die stofflich genutzten Energieträger wie z.B. Holz für Bauzwecke oder Erdöl für Kunststoffe. Diese stofflichen Aufwendungen werden im KEV nicht verbucht, sondern ihre Masse ist in einer Rohstoffbilanz extra zu erfassen. Ebenso werden Aufwendungen zur Entsorgung nicht in den KEV einbezogen.

Der KEV unterscheidet sich damit vom kumulierten Energie-Aufwand (KEA) nach der VDI-Richtlinie 4600 vor allem darin, dass nur die Energiemengen einbezogen sind, die energetisch genutzt ("verbraucht") wurden. Der KEA rechnet dagegen auch die stofflich genutzten Energiemengen mit ein, da diese - ungeachtet ihrer energetischen oder stofflichen Nutzung - gefördert bzw. bereitgestellt ("aufgewendet") werden müssen, und durch ihren Heizwert die gesamten Primärenergieaufwendungen erhöhen. Im KEA sind auch die Entsorgungsaufwände enthalten, wobei hier auch Gutschriften für z.B. Energierückgewinnung aus stofflich genutzten Energieträgern (Holz, Kunststoffe...) eingerechnet werden.

Durch die unterschiedlichen Definitionen stellt der KEA eine Größe mit starkem Ressourcenbezug dar, der KEV mit Emissionsbezug.“<sup>55</sup>

In dieser Arbeit wird im folgenden bei stofflich genutzten Energieträgern der Kumulierte Energieverbrauch für die Herstellung ( $KEV_H$ ) als Maß für die Graue Energie verwendet. Für energetisch (also nicht stofflich) genutzte Energieträger wird der  $KEA_H$  verwendet, die im Energieträger enthaltene und in Nutzenergie umgewandelte Energiemenge also

---

<sup>55</sup> Diese Definition des KEV ist der Homepage der Forschungsstelle für Energiewirtschaft ([http://www.ffe.de/details/ganz/kea\\_ind/index.htm](http://www.ffe.de/details/ganz/kea_ind/index.htm)) entnommen.

eingerechnet. Für alle anderen Stoffe ist der  $KEV_H$  und der  $KEA_H$  praktisch ident<sup>56</sup>. Energieaufwände für die Entsorgung werden nicht berücksichtigt. KEA und KEV können in einen nicht-erneuerbaren und einen erneuerbaren Anteil geteilt werden. Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch korreliert sehr gut mit wesentlichen Umweltbelastungen, insbesondere mit  $CO_2$ -Emissionen.

#### *Kumulierte bzw. Graue Treibhausgasemissionen ( $CO_2$ -Äquivalente)*

Bei der Errechnung von  $CO_2$ -Äquivalenten eines Prozesses werden die Wirkungen aller Treibhausgase (THG) berücksichtigt. Die Treibhausgase werden nach ihrem Treibhauspotenzial bewertet, die aufaddierten Produkte aus Treibhauspotenzial und Menge aller Treibhausgase bilden das  $CO_2$ -Äquivalent.

Ein Treibhauspotenzial (THP) ist

„das massenbezogene Äquivalent der Treibhauswirkung von THG, bezogen auf das „Leit-“Gas  $CO_2$  – daher wird es in  $CO_2$ -Äquivalenten angegeben. Das THP ist aufgrund der Wirkungscharakteristik von THG und deren unterschiedlichen atmosphärischen Verweildauern ein zeitliches Integral über einen bestimmten Zeitraum. Üblich sind THP-Angaben für 100 Jahre.“ (Fritsche / Schmidt 2004, S. 47)

#### *Graue $CO_2$ -Äquivalente ( $CO_2$ -Äqu.<sub>H</sub>)*

In dieser Arbeit wird auch der Ausdruck „Graue  $CO_2$ -Äquivalente“ (analog zum Begriff „Graue Energie“) verwendet, welcher sich auf die kumulierten Treibhausgasemissionen für die Herstellung eines Produkts ( $CO_2$ -Äqu.<sub>H</sub>) bezieht. Der Begriff „Graue  $CO_2$ -Äquivalente“ ist zwar nicht gebräuchlich, erscheint aber aufgrund der Analogie zur „Grauen Energie“ sinnvoll und wird deshalb verwendet.

### 5.3.3.2 Methodische Aspekte von Bilanzierungen

Zwei wesentliche Methoden für Energie- bzw. Emissionsbilanzierungen sind die energetische Input-Output-Analyse sowie die Prozesskettenanalyse.

#### *Energetische Input-Output-Analyse*

Bei der energetischen Input-Output-Analyse werden „die kumulierten Energieaufwendungen für ein Produkt über die Multiplikation der Energieintensitäten<sup>57</sup> von verschiedenen Produktions- und Dienstleistungsbereichen innerhalb einer Volkswirtschaft [...] mit den Ab-Werk-Preisen der Produkte ermittelt, wobei auch die

---

<sup>56</sup> Abgesehen von zumeist vernachlässigbaren Unterschied, die sich aus der Anwendung stofflich genutzter Energieträger in der vorgelagerten Prozesskette ergeben können.

<sup>57</sup> Energieaufwand auf den Geldwert bezogen.

zwischen den Sektoren gehandelten Energie- und Stoffströme berücksichtigt werden.“ (Gürzenich 2002, S. 4)

Die Energieintensität (angegeben beispielsweise in kWh/€) eines bestimmten Produktes, das einem bestimmten volkswirtschaftlichen Sektor zugeordnet werden kann, wird also mit dem Geldwert (in EUR) dieses Produktes multipliziert und man erhält den kumulierten Energieaufwand für die Herstellung dieses Produktes gemäß der energetischen Input-Output-Analyse.

Vorteilhaft an dieser Methode ist die einfache und schnelle Anwendbarkeit, nachteilig ist die begrenzte Genauigkeit. Da es sich bei den Energieintensitäten um über einen gesamten Sektor gemittelte Werte handelt, liefert diese Methode für ein „typisches“ Produkt aus dem jeweiligen Sektor brauchbare Ergebnisse.

### *Prozesskettenanalyse*

Die Prozesskettenanalyse versucht, die relevanten Prozesse für die Herstellung eines Produktes ausgehend vom Endprodukt über die komplette Kette an vorgelagerten Produkten / Prozessen bis hin zur Rohstoffgewinnung zu identifizieren und durch Heranziehen spezifischer Stoffdaten eine primärenergetische bzw. emissionsorientierte Bewertung vorzunehmen.

Ein Prozeß ist gemäß Fritsche / Schmidt (2004) „eine bestimmte Aktivität, um einen gegebenen Energie- oder Stoffinput in einen anderen Energie- oder Stoffoutput zu überführen oder diese zu transportieren.“ Neben den direkten Inputs, die einem Prozeß zuzuordnen sind, sind auch Hilfsstoffe, Hilfsenergien und Vorleistungen in Form von Maschinen zu berücksichtigen.

Aufgrund der detaillierten Vorgangsweise bei der Erstellung einer Prozesskettenanalyse ist diese im Vergleich zur energetischen Input-Output-Analyse deutlich genauer und insbesondere für Produkte mit hohem Gehalt an Grauer Energie der energetischen Input-Output-Analyse vorzuziehen (Gürzenich 2002, S. 5). Nachteilig ist die oft anzutreffende fehlende oder mangelhafte Datenverfügbarkeit, weshalb Messungen von Energieinputs und -outputs einzelner Prozesse notwendig sein können.

Prozessketten können sehr komplex sein, z.B. auch rekursive Schleifen beinhalten. Wichtig ist auch die Definition geeigneter Abbruchkriterien (Definitionen, welche Prozesse keine Berücksichtigung mehr finden).

Bei der Erstellung von Energiebilanzen treten verschiedene methodische Probleme / Fragestellungen auf. Dazu zählen:

- Definition von Systemgrenzen (Bilanzraum) und Abbruchkriterien
- Bewertung erneuerbarer Energieträger (Vernachlässigung der eingesetzten erneuerbaren Energiemengen versus Berücksichtigung der Nutzungsgrade bei der Umwandlung)
- Bewertung von Sekundärrohstoffen (internes / externes Recycling)
- Datenqualität (Vertrauenswürdigkeit, Transparenz der Datenermittlung, Repräsentativität von Einzeldaten, Annahmen, Schätzungen)
- methodische Konsistenz (Anwendung der gleichen Methodik für alle untersuchten Systeme)

- Kuppelproduktion (falls in einem Prozess mehrere Produkte hergestellt werden, wie sind die Energie- und sonstigen Inputs den verschiedenen Produkten zuzuteilen?)

Für eine Diskussion dieser Probleme siehe beispielsweise Corradini et al. (1999), S. 15ff. , Spreng (1994), S. 48ff. oder May (1996), S. 14ff.

### Verwendete Werte

Eine Übersicht über im Modell über verwendete Werte für graue Energie sowie graue Treibhausgasemissionen von Energieträgern und Dämmstoffen befindet sich in Anhang 14.

#### 5.3.3.3 Bilanzierung von Fenstern

Aluminium- und Holz-Aluminium-Fenster wurden im Modell nicht berücksichtigt. Diese beiden Fenstertypen erzielen bei keinem der vier angewandten Kriterien (monetäre Kosten, soziale Kosten, Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen, Lebenszyklus-Energieverbrauch) minimale Werte, wie anhand Tabelle 5.31 nachvollzogen werden kann (abgesehen von monetären Kosten). Die in Tab. 5.31 angegebenen Werte beziehen sich auf ein Fenster mit den Maßen 1,23 m \* 1,48 m (1,82 m<sup>2</sup>). Die Glasqualität ist bei den Berechnungen immer gleich angenommen (Isolierglasverbund), die Werte stammen aus Eyerer/Reinhardt (2000), S. 122ff., externe Kosten stammen aus eigener Berechnung, zugrundeliegende Werte siehe Anhang 13.

Hinsichtlich monetärer Kosten sind PVC-Fenster am günstigsten (siehe Tabelle 5.25), da die Anteile externer Kosten an den monetären Kosten sehr gering sind und Unterschiede in den externen Kosten zwischen Fenstern mit unterschiedlichen Rahmenmaterialien wenig ausgeprägt sind (siehe Tabelle 5.31), weisen auch bezüglich des Kriteriums soziale Kosten PVC-Fenster die niedrigsten Werte auf. Hinsichtlich externer Kosten, Grauer Energie und Grauen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten weisen Fenster mit Holzrahmen die niedrigsten Werte auf. Holz-Aluminium-Fenster liegen hinsichtlich externer Kosten, Grauer Energie und Grauen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten etwa gleichauf mit PVC-Fenstern, falls das Recyclingpotenzial berücksichtigt wird, schneiden sie besser ab als PVC-Fenster, aber immer schlechter als Holzfenster. Aluminium-Fenster schneiden sowohl bei externen Kosten, Grauer Energie und Grauen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten am schlechtesten ab. Dies gilt selbst für den Fall, dass das Recyclingpotenzial eingerechnet wird.

Im Modell verwendete Werte für externe Kosten, grauen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten und graue Energie befinden sich in Anhang 15.

Tab. 5.31: Einfluß verschiedener Rahmenmaterialien und Berechnungsannahmen auf Graue Energie (Primärenergieinhalt PEI), CO<sub>2</sub>-Äquivalente und externe Kosten, Werte pro Fenster (1,82 m<sup>2</sup>), Datenquelle: Eyerer/Reinhardt (2000), eigene Berechnung bei externen Kosten

Material Fensterrahmen / Berechnungsannahme	PEI (kWh/Fenster)	CO <sub>2</sub> -Äquivalente (kg/Fenster)	Min. ext. Kosten (EUR/Fenster)	max. ext. Kosten (EUR/Fenster)
PVC	695,4	147	4,7	10
PVC, Ausschöpfung Recyclingpotenzial	649,3	132,6	4,26	9,1
Holz	632,8	73,9	2,9	5,6
Holz, Ausschöpfung Recyclingpotenzial	585,3	62,4	2,53	4,8
Holz, ohne Anteil nachwachsende Rohstoffe	436,7	-	-	-
Holz, ohne nachwachsende R. + Recyclingpotenzial	389,2	-	-	-
Aluminium	1368,8	293,1	9,15	19,8
Aluminium, Ausschöpfung Recyclingpotenzial	1000,5	224,9	7,1	15,3
Holz-Aluminium	954,7	139,9	4,74	9,8
Holz-Alu, Ausschöpfung Recyclingpotenzial	799,8	92,7	3,3	6,7
Holz-Alu, ohne Anteil nachwachsende Rohstoffe	785	-	-	-
Holz-Alu, ohne nachwachsende R. + Recyclingpotenzial	630,1	-	-	-

### 5.3.3.4 Bilanzierung von Heizsystemen und Solaranlagen

Grundlage für die Ermittlung nicht-monetärer Parameter (externe Kosten, kumulierter Energieaufwand, kumulierte Treibhausgasemissionen) von Heizsystemen und Solaranlagen bilden *Massenbilanzen* dieser Systeme.

Als Beispiel für Massenbilanzierung einer Heizungsanlage ist in folgender Tabelle (Tab. 5.32) die Massenbilanz eines Pelletskessels dokumentiert.

Tabelle 5.32: Massenbilanz eines Pelletskessels (15 kW) inklusive Raumaustragung, Quelle: Bruck/Fellner (2002), Anhang C, S. 76, Primärquelle: Kunst (2001)

Bezeichnung der Komponente / des Werkstoffs	Bezeichnung gemäß Ökopotenzial-Datenbank	Masse (kg)
Stahlprofile	Baustahl	18,1
Stahlblech beschichtet	Stahlblech (verzinkt)	66,6
Stahlblech roh	Stahl unlegiert ETH	212,8
Stahlblech verzinkt	Stahlblech (verzinkt)	30,3
Edelstahl	Stahl hochlegiert ETH	11,8
Gusseisen	Gusseisen ETH	1,6
Aluminium	Aluminium (50% Prim 50% Sek.)	0,4
Holz	Holzbaustoffe Kantschnittholz	0,4
Elektro- motoren	Stahl unlegiert ETH	15,18
	Kupfer ETH	12,42
Elektronik	Stahl, verzinkt	2,4
Kabelbaum	HD PE ETH	4,26
	Kupfer ETH	2,84
Glaswolle	Glaswolle	4,3
Keramikfaser	Keramik ETH	0,4
Vermiculite	Rohvermiculit	7,5
Kunststoffteile	Polypropylen ETH	0,8
Gummi	EPDM Gummi ETH	0,4
Pulverbeschichtung	Pulverlack nach EMPA Fensterrahmenstudie	1,6
Abgasrohr	Stahl unlegiert ETH	2,26
Summe		396,36

Verschiedene Varianten des Werkstoffs Stahl (Stahl unlegiert, Stahl hochlegiert, Stahlblech verzinkt) bilden den Hauptanteil (90,7%) an der Gesamtmasse des

Pelletsessels. Bei Kenntnis der spezifischen Werte (externe Kosten, kumulierter Energieaufwand etc., siehe Anhang 16) pro Werkstoff pro Masseneinheit lassen sich aus der Massenbilanz die Gesamtwerte berechnen. Die mittlere Spalte von Tabelle 5.32 gibt die Bezeichnung des Werkstoffs gemäß Ökopotenzial-Datenbank<sup>58</sup> wider.

Tab. 5.33: Vergleich von externen Kosten, "embedded" CO<sub>2</sub>-Äquivalenten und kumuliertem Energieverbrauch für die Herstellung verschiedener Heizsysteme (nur Wärmeerzeuger), Quellen: . Quelle: Bruck/Fellner (2002), Anhang C (Primärquelle: Kunst (2001)); eigene Berechnungen

Heizsystem	Referenz- heizlast (kW)	Referenz- masse (kg)	min. ext. Kosten (EUR)	max. ext. Kosten (EUR)	CO <sub>2</sub> - Äquivalent (kg)	KEV (kWh)
Stückholzkessel	20	550	32,6	68,5	987	2502
Pufferspeicher 1500 l		305	33	69	980	2009
Hackschnitzel-kessel	25	777	94	170	2080	4620
Pelletsessel (inkl. Raumaustr.)	15	396	43,7	78,3	954	2172
Pelletsofen	6	130	14,3	25,7	313	713
Pelletsofen mit Wassertasche	8	150	16,5	29,6	360	820
Gaskessel	15	95	5,7	11,9	172	387
Gas-Kombitherme	18	53	3,2	6,7	96	216
Gas-Brennwert- kessel	15	95	5,7	11,9	172	387
Ölkessel	15	130	21,5	41,3	545	553
Kohlekessel	20	305	18,1	38	548	1387
Fernwärme Sekundäranlage (EFH)		100	12,1	23,8	324	444
Fernwärme Wärmetauscher (MFH)		600	58,1	117,5	1634	2785
Fernwärmestation pro Wohneinheit (MFH)		45	5,4	10,7	146	200
Wärmepumpe Luft/Wasser	15	275 (inkl. )	44,8	91,7	1291	1369
Wärmepumpe Sole / Wasser	7	145	107,2	243,8	3759	885
Wärmepumpe Wasser / Wasser	7	150	119,1	235,2	3195	1035
Strom-Konvektoren	0,8 - 1 (pro Konv.)	4,65	0,4	0,9	12	45
Strom-Nachtspeicher	2 - 3	130	5,1	11	162	252
Solaranlage 6 m2 Kollektorfl, Speicher 300 l			58,1	112,9	1510	4447
Solaranlage 15 m2 Kollfl., Puffersp. 1500 l, WW-sp. 300 l			127,3	251,1	3409	10375

<sup>58</sup> Siehe Adensam et al. 2002, S. 57 ff. bzw. das EDV-Programm „Externe Kosten“ (<http://www.iswb.at/index.htm?room=ecobuilding&page=xco-tool.htm&itm=7/2/1>). Das in den Bezeichnungen verwendete Kürzel „ETH“ bedeutet, dass die Daten aus der Studie „Baustoffdaten – Ökoinventare“ stammen (Mithrsg. ETH Zürich)

Wie aus Tabelle 5.33 zu ersehen ist, sind die externen Kosten für Wärmeerzeuger relativ gering im Vergleich zu den monetären Kosten. Der prozentuelle Anteil der externen Kosten an den monetären liegt zumeist zwischen 0,1 und 2 %. (Z.B. Hackschnitzelkessel (0,8%-1,5%), Pelletskessel (0,5%-1%), Ölkessel (0,4%-0,7%), Gaskombitherme (0,08%-0,17%), Solaranlage für Warmwasser (1,2%-2,4%)).

Biomassekessel (insbesondere Hackschnitzelkessel) weisen unter den Heizkesseln die höchsten kumulierten Energieverbräuche aufgrund ihrer relativ hohen Massen auf. Auch Solaranlagen weisen relativ hohe kumulierte Energieverbräuche auf. Dies liegt neben dem Einbeziehen von Speicher und sonstigen Teilen in die Berechnung vor allem am relativ hohen Aluminium-Anteil der Kollektoren (Annahme von 6,4 kg pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche für den Modellkollektor).

Auffallend sind bei Wärmepumpen hohe CO<sub>2</sub>-Äquivalente, welche vor allem auf den Anteil des Kältemittels (hier R407C) mit sehr hohem spezifischen CO<sub>2</sub>-Äquivalent (1610 kg/kg) zurückzuführen sind.

Sehr gut schneiden in diesem Vergleich Gasgeräte ab – für die Herstellung von Gasgeräten weisen alle Bilanzierungsparameter niedrige Werte auf.

## 6. Ergebnisse I – ohne Berücksichtigung energiepolitischer Instrumente

In diesem Kapitel wird zunächst die Wirkungsweise des Modells anhand der Anwendung auf einzelne Modellgebäude demonstriert. Danach werden Ergebnisse der Modellanwendung auf den gesamten Wohngebäudebestand Österreichs für ein Referenz-Szenario vorgestellt. Abschließend werden die Einflüsse der Variation wesentlicher Rahmenbedingungen wie Energiepreisniveaus oder Austauschraten diskutiert. Energiepolitische Instrumente wie Investitionszuschüsse oder Steuern finden bei den in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnissen keine Berücksichtigung. Die Auswirkungen dieser Instrumente werden in Kap. 7 diskutiert.

### 6.1. Anwendung des Modells auf einzelne Modellgebäude

Die Anwendung der unterschiedlichen Optimierungsziele

- minimiere monetäre Kosten
- minimiere soziale Kosten (= Summe von monetären und externen Kosten)
- minimiere Treibhausgasemissionen
- minimiere Energieverbrauch

auf verschiedene Modellgebäude wird im folgenden dargestellt. Bei der Auswahl der Modellgebäude und der dazugehörigen Heiz- und Warmwassersysteme sind solche mit einer relativ großen Verbreitung bevorzugt. Alle vier Grund-Gebäudetypen (Einfamilienhaus, Zweifamilienhaus, kleines Mehrfamilienhaus, großes Mehrfamilienhaus) und unterschiedliche Bauperioden<sup>59</sup> sind berücksichtigt. Im konkreten handelt es sich um folgende Modellgebäude:

- Einfamilienhaus, Bauperiode 1945-1960, Heizsystem: Stückholz zentral, Warmwasser: elektrisch
- Einfamilienhaus, Bauperiode 1961-1970, Heizsystem: Öl zentral, Warmwasserbereitung integriert
- Einfamilienhaus, Bauperiode 1971-1980, Heizsystem: Gas zentral, Warmwasserbereitung integriert
- Zweifamilienhaus, Bauperiode vor 1919, Heizsystem: E-Nachtspeicheröfen, Warmwasserbereitung: E-Speicher
- Zweifamilienhaus, Bauperiode 1961-1970, Heizsystem: Öl zentral, Warmwasserbereitung integriert
- kleines Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1945 – 1960, Heiz- und Warmwassersystem: dezentraler Mix<sup>60</sup>
- kleines Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1971 – 1980, Heiz- und Warmwassersystem: Fernwärme

---

<sup>59</sup> Siehe auch Kap. 5.1.1 zur Disaggregation des Gebäudebestands.

<sup>60</sup> Erläuterung „dezentraler Mix“ siehe Kap. 4.2., S. 37ff.

- großes Mehrfamilienhaus, Bauperiode vor 1919, Heiz- und Warmwassersystem: dezentraler Mix
- großes Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1945-1960, Heiz- und Warmwassersystem: dezentraler Mix
- großes Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1961-1970, Heizsystem: Öl zentral, Warmwasserbereitung integriert
- großes Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1971-1980, Heizsystem: Fernwärme

6.1.1 Einfamilienhäuser

- *Einfamilienhaus, Bauperiode 1961-1970, Heizsystem: Öl zentral, Warmwasserbereitung integriert*

Installationszeitpunkt des Heiz-/Warmwassersystems: 1994

Letzter Fenstertausch: 1985,  $U_{\text{Fenster}} = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$

Letzte Änderung Fassade: 1970,  $U_{\text{Außenwand}} = 1,25 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U_{\text{Ob. Geschoßdecke}} = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $U_{\text{Kellerdecke}} = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$

Heizlast (bezogen auf die Bruttogeschoßfläche):  $p_{0\text{BGF}} = 3,36 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tab. 6.1: Übersicht Modellergebnisse für Einfamilienhaus, Bauperiode 1961-1970, Heizsystem: Öl zentral, Warmwasserbereitung integriert

	Jahr	Maßnahme	U-Wert(e) nach Maßnahme (W/m <sup>2</sup> K)	Heizlast ( $p_{0\text{BGF}}$ ) nach Maßnahme (W/m <sup>2</sup> K)
minimiere monetäre Kosten	2006	Dämmung der obersten Geschoßdecke: 10,9 cm; Dämmstoff EPS	0,28	2,9
	2010	Dämmung Fassade: 10,7 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,3	1,88
	2014	Wechsel Heiz-/Warmwassersystem; Gas-Kombitherme; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer		
	2018	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,47
minimiere soziale Kosten	2006	Wechsel Heizsystem; Stückholz zentral; Warmwasserb. integriert		
	2007	Dämmung der obersten Geschoßdecke: 7,3 cm; Dämmstoff EPS	0,38	2,95
	2010	Dämmung Fassade: 6,5 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,4	2,04
	2018	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,63
minimiere Treibhausgas- emissionen	2006	Generalsanierung: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Hanf-Dämmplatten Keller: 15 cm, Hanf neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Holzpellets Etagenofen, Warmwasserb. integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 0,15$ $U_{\text{K}} = 0,26$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,94
	2017	Wechsel Heizsystem: Solar-Kombisystem mit Holzpellets Etagenofen, Warmwasserb. integriert		
minimiere Energie- verbrauch	2006	Generalsanierung: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, EPS neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem, Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 0,16$ $U_{\text{K}} = 0,26$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,95

- *Einfamilienhaus, Bauperiode 1945-1960, Heizsystem: Stückholz zentral, Warmwasserber.: elektrisch*

Installationszeitpunkt Heizsystem: 1993; Warmwassersystem: 1988

Letzter Fenstertausch: 1980,  $U_{\text{Fenster}} = 3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$

Letzte Änderung Fassade: 1980,  $U_{\text{Außenwand}} = 1,35 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U_{\text{Ob. Geschoßdecke}} = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $U_{\text{Kellerdecke}} = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$

Heizlast (bezogen auf die Bruttogeschößfläche):  $p_{0\text{BGF}} = 3,71 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tab. 6.2: Übersicht Modellergebnisse für Einfamilienhaus, Bauperiode 1945-1960, Heizsystem: Stückholz zentral, Warmwasserber.: E-Speicher

	Jahr	Maßnahme	U-Wert(e) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Heizlast ( $p_{0\text{BGF}}$ ) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
minimiere monetäre Kosten	2008	Wechsel WW-system: E-Durchlauferhitzer; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer		
	2011	Dämmung der obersten Geschoßdecke: 6,5 cm; Dämmstoff EPS	0,41	3,32
	2013	Wechsel Heizsystem: Fernwärme Wien; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer		
	2014	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	2,74
	2020	Dämmung Fassade: 5,25 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,47	1,75
minimiere soziale Kosten	2006	Dämmung der obersten Geschoßdecke: 8 cm; Dämmstoff EPS	0,35	3,29
	2008	Wechsel WW-system: E-Durchlauferhitzer; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer		
	2013	Wechsel Heizsystem: Fernwärme Wien; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer		
	2014	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	2,7
	2020	Dämmung Fassade: 6,4 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,41	1,66
minimiere Treibhausgas- emissionen	2006	Generalsanierung: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, Schafwolle neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Holzpellets Etagenofen, Warmwasserb. integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 0,16$ $U_{\text{K}} = 0,27$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,98
	2017	Wechsel Heizsystem: Solar-Kombisystem mit Holzpellets Etagenofen, Warmwasserb. integriert		
minimiere Energie- verbrauch	2006	Generalsanierung: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, EPS neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem, Wärmepumpe Grundwasser, Warmwb. int.	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 0,16$ $U_{\text{K}} = 0,26$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,97

- *Einfamilienhaus, Bauperiode 1971-1980, Heizsystem: Gas zentral, Warmwasserbereitung integriert*

Installationszeitpunkt des Heiz-/WW-systems: 1997

Letzter Fenstertausch: 1978,  $U_{\text{Fenster}} = 2,2 \text{ W/m}^2\text{K}$

Letzte Änderung Fassade: 1975,  $U_{\text{Außenwand}} = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U_{\text{Ob. Geschoßdecke}} = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $U_{\text{Kellerdecke}} = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$

Heizlast (bezogen auf die Bruttogeschoßfläche):  $p_{0\text{BGF}} = 1,99 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tab. 6.3: Übersicht Modellergebnisse für Einfamilienhaus, Bauperiode 1971-1980, Heizsystem: Gas zentral, Warmwasserbereitung integriert

	Jahr	Maßnahme	U-Wert(e) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Heizlast ( $p_{0\text{BGF}}$ ) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
minimiere monetäre Kosten	2011	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,82
	2015	Dämmung Fassade: 6,4 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,32	1,43
	2017	Wechsel Heiz-/WW-system: Gas-Kombitherme; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer		
minimiere soziale Kosten	2011	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,82
	2015	Dämmung Fassade: 7,9 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,29	1,39
	2017	Wechsel Heiz-/WW-system: Stückholz zentral, WW integriert; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer		
minimiere Treibhausgas- emissionen	2006	therm. Verbesserung ges. Gebäudehülle: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, Schafwolle neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ )	$U_{\text{OG}} = 0,1$ $U_{\text{Aw}} = 0,14$ $U_{\text{K}} = 0,25$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,9
	2008	Wechsel Heiz-/WW-system: Holzpellets Etagenofen, Warmwasserb. integriert		
	2019	Wechsel Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem mit Holzpellets Etagenofen, Warmwasserb. integriert		
minimiere Energie- verbrauch	2006	therm. Verbesserung ges. Gebäudehülle: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, EPS neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ )	$U_{\text{OG}} = 0,1$ $U_{\text{Aw}} = 0,14$ $U_{\text{K}} = 0,24$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,9
	2008	Wechsel Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem, Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert		

Anhand dieser drei Beispiele von Modellgebäuden lässt sich erkennen, dass bei Anwendung der Optimierungsziele „minimiere monetäre Kosten“ und „minimiere soziale Kosten“ in erster Linie Maßnahmen bei Überschreitung der jeweiligen Nutzungsdauern

getroffen werden. Dies gilt für Fenstertausch, Dämmung der Außenfassade und Wechsel des Heiz-/Warmwasserbereitungssystems. Dämmung der obersten Geschoßdecke erfolgt bei den älteren Gebäuden (Bauperioden vor 1970), da hier ein schlechterer thermischer Ausgangszustand vorliegt (U-Wert  $\geq 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Der Wechsel des Energieträgers folgt zu Erdgas oder Fernwärme (minimiere monetäre Kosten) bzw. zu Stückholz oder Fernwärme (minimiere soziale Kosten).

Die gewählten Maßnahmen unter den Bedingungen „minimiere Treibhausgasemissionen“ und „minimiere Energieverbrauch“ sind ähnlich. Es kommt hier bevorzugt zur „Generalsanierung“ bzw. zur thermischen Verbesserung der gesamten Gebäudehülle (falls Wechsel des Heizsystems noch nicht erlaubt ist) bereits im ersten Jahr des Simulationszeitraums (2006). Die maximal erlaubten Dämmdicken werden gewählt – bei nicht eingeschränkter Optimierung wären diese noch höher. Meistens werden die Dämmstoffe Schafwolle oder Hanf gewählt.

6.1.2 Zweifamilienhäuser

- *Zweifamilienhaus, Bauperiode vor 1919, Heizsystem: E-Nachtspeicheröfen, Warmwasserbereitung: E-Speicher*

Installationszeitpunkt Heizsystem: 1990; Warmwassersystem: 1988

Letzter Fenstertausch: 1965,  $U_{\text{Fenster}} = 3,1 \text{ W/m}^2\text{K}$

Letzte Änderung Fassade: 1965,  $U_{\text{Außenwand}} = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U_{\text{Ob. Geschoßdecke}} = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $U_{\text{Kellerdecke}} = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$

Heizlast (bezogen auf die Bruttogeschoßfläche):  $p_{0\text{BGF}} = 2,79 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tab. 6.4: Übersicht Modellergebnisse für Zweifamilienhaus, Bauperiode vor 1919, Heizsystem: E-Nachtspeicheröfen, Warmwasserbereitung: E-Speicher

	Jahr	Maßnahme	U-Wert(e) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Heizlast ( $p_{0\text{BGF}}$ ) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
minimiere monetäre Kosten	2006	therm. Verbesserung ges. Gebäudehülle: Ob. Geschoßdecke: 10,4 cm, Schafwolle Fassade: 8,7 cm, Schafwolle Keller: 9,1 cm, EPS neue Fenster: PVC ( $U = 1,3$ )	$U_{\text{OG}} = 0,28$ $U_{\text{Aw}} = 0,3$ $U_{\text{K}} = 0,4$ $U_{\text{F}} = 1,3$	1,17
	2008	Wechsel WW-system: E-Durchlauferhitzer; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer		
	2010	Wechsel Heizsystem: E-Nachtspeicheröfen; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer		
minimiere soziale Kosten	2006	therm. Verbesserung ges. Gebäudehülle: Ob. Geschoßdecke: 12,2 cm, Schafwolle Fassade: 10,3 cm, Schafwolle Keller: 10,6 cm, EPS neue Fenster: PVC ( $U = 1,3$ )	$U_{\text{OG}} = 0,25$ $U_{\text{Aw}} = 0,27$ $U_{\text{K}} = 0,36$ $U_{\text{F}} = 1,3$	1,11
	2007	Wechsel Heiz-/WW-system: Stückholz zentral, WW integriert		
minimiere Treibhausgas- emissionen	2006	Generalsanierung: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, Schafwolle neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Holzpellets Etagenofen, Warmwasserb.: Solar-integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 0,15$ $U_{\text{K}} = 0,28$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,87
minimiere Energie- verbrauch	2006	Generalsanierung: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, EPS Keller: 15 cm, EPS neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem, Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert	$U_{\text{OG}} = 0,13$ $U_{\text{Aw}} = 0,14$ $U_{\text{K}} = 0,27$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,85

- *Zweifamilienhaus, Bauperiode 1961-1970, Heizsystem: Öl zentral, Warmwasserbereitung integriert*

Installationszeitpunkt Heiz-/Warmwasserbereitungssystem: 1994

Letzter Fenstertausch: 1985,  $U_{\text{Fenster}} = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$

Letzte Änderung Fassade: 1970,  $U_{\text{Außenwand}} = 1,25 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U_{\text{Ob. Geschosbedcke}} = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $U_{\text{Kellerdecke}} = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$

Heizlast (bezogen auf die Bruttogeschosfläche):  $p0_{\text{BGF}} = 2,82 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tab. 6.5: Übersicht Modellergebnisse für Zweifamilienhaus, Bauperiode 1961-1970, Heizsystem: Öl zentral, Warmwasserbereitung integriert

	Jahr	Maßnahme	U-Wert(e) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Heizlast ( $p0_{\text{BGF}}$ ) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
minimiere monetäre Kosten	2006	Wechsel Heiz-/WW-system: Wärmepumpe Luft/Wasser, WW-ber. integriert		
	2010	Dämmung Fassade: 5,4 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,45	2,15
	2018	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,91
minimiere soziale Kosten	2006	Wechsel Heiz-/WW-system: Stückholz zentral, WW-ber. integriert		
	2007	Dämmung der obersten Geschosbedcke: 7,3 cm; Dämmstoff EPS	0,38	2,41
	2010	Dämmung Fassade: 6,5 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,4	1,7
	2018	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,46
minimiere Treibhausgas- emissionen	2006	Generalsanierung: Ob. Geschosbedcke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Hanf-Dämmplatten Keller: 15 cm, Hanf-Dämmplatten neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Holzpellets Etagenofen, Warmwasserb.: integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 0,15$ $U_{\text{K}} = 0,26$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,85
	2017	Wechsel Heiz-/WW-system: Solar- Kombisystem mit Holzpellets Etagenofen, Warmwasserb. integriert		
minimiere Energie- verbrauch	2006	Generalsanierung: Ob. Geschosbedcke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, EPS neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar- Kombisystem, Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 0,16$ $U_{\text{K}} = 0,26$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,86

Bemerkenswert ist im Fall des Modellgebäudes, welches elektrisch beheizt wird (Tab. 6.4), dass hier der eher seltene Fall einer thermischen Verbesserung der gesamten Außenhülle bei Anwendung der Kriterien „minimiere monetäre Kosten“ und „minimere soziale Kosten“ auftritt. Einerseits müssten im Jahr 2006 ohnehin Fenstertausch und Erneuerung der Außenfassade aufgrund Überschreitung der Nutzungsdauer erfolgen, andererseits begünstigt der relativ teure Energieträger Strom die Wirtschaftlichkeit von Verbesserungsmaßnahmen an der Gebäudehülle. Weiters ist bemerkenswert, dass im Fall „minimiere monetäre Kosten“ E-Nachtspeicheröfen im Jahr 2010 (das Jahr, in dem das Heizsystem erneuert werden muss) das ökonomisch günstigste Heizsystem darstellen. Das liegt an den vergleichsweise sehr geringen Investitionskosten und an der bereits optimierten Gebäudehülle und dem dadurch verringerten Energiebedarf.

Ein auffallender Unterschied der Ergebnisse im Fall des Modellgebäudes, welches mit Öl-Zentralheizung ausgestattet ist (Tab. 6.5), im Vergleich zum äquivalenten Einfamilienhaus-Modellgebäude (siehe Tab. 6.1.) ist die Wahl einer Luft/Wasser-Wärmepumpe im Jahr 2006 unter der Annahme „minimiere monetäre Kosten“. Dies liegt an den relativ niedrigeren Investitionskosten (bezogen auf die Heizlast) für dieses System. Ansonsten sind die Abweichungen im Vergleich zum äquivalenten Einfamilienhaus-Modellgebäude geringfügig.

### 6.1.3 Kleine Mehrfamilienhäuser

- *Kleines Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1945 – 1960, Heiz- und Warmwassersystem: dezentraler Mix<sup>61</sup>*

Letzter Fenstertausch: 1980,  $U_{\text{Fenster}} = 3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$

Letzte Änderung Fassade: 1970,  $U_{\text{Außenwand}} = 1,35 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U_{\text{Ob. Geschoßdecke}} = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $U_{\text{Kellerdecke}} = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$

Heizlast (bezogen auf die Bruttogeschoßfläche):  $p_{0\text{BGF}} = 2,59 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tab. 6.6: Übersicht Modellergebnisse für kleines Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1945 – 1960, Heiz- und Warmwassersystem: dezentraler Mix

	Jahr	Maßnahme	U-Wert(e) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Heizlast ( $p_{0\text{BGF}}$ ) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
minimiere monetäre Kosten	2006	Dämmung der obersten Geschoßdecke: 11,1 cm; Dämmstoff EPS	0,28	2,28
	2010	Dämmung Fassade: 10,1 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,29	1,58
	2013	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,15
	2019	Dämmung Kellerdecke/Fußboden: 8,8 cm; Dämmstoff EPS	0,37	1,03
minimiere soziale Kosten	2006	Dämmung der obersten Geschoßdecke: 12,8 cm; Dämmstoff EPS	0,25	2,27
	2007	Dämmung Kellerdecke/Fußboden: 9,8 cm; Dämmstoff EPS	0,35	2,14
	2010	Dämmung Fassade: 11,6 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,26	1,43
	2013	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1
minimiere Treibhausgas- emissionen	2006	Generalsanierung: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, Hanf-Dämmplatten neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem mit Holzpellets-Zentralhgz., Warmwasserb. Integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 0,16$ $U_{\text{K}} = 0,27$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,8
minimiere Energie- verbrauch	2006	Generalsanierung: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, EPS Fassade: 25 cm, EPS Keller: 15 cm, EPS neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem, Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. Integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 0,14$ $U_{\text{K}} = 0,26$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,79

<sup>61</sup> Erläuterung „dezentraler Mix“ siehe Kap. 4.2., S. 37ff.

- *Kleines Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1971 – 1980, Heiz- und Warmwassersystem: Fernwärme*

Installationszeitpunkt Heiz-/Warmwasserbereitungssystem: 1995

Letzter Fenstertausch: 1977,  $U_{\text{Fenster}} = 2,2 \text{ W/m}^2\text{K}$

Letzte Änderung Fassade: 1975,  $U_{\text{Außenwand}} = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U_{\text{Ob. Geschoßdecke}} = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $U_{\text{Kellerdecke}} = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$

Heizlast (bezogen auf die Bruttogeschoßfläche):  $p0_{\text{BGF}} = 1,44 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tab. 6.7: Übersicht Modellergebnisse für kleines Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1971 – 1980, Heiz- und Warmwassersystem: Fernwärme

	Jahr	Maßnahme	U-Wert(e) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Heizlast ( $p0_{\text{BGF}}$ ) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
minimiere monetäre Kosten	2010	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,32
	2015	Dämmung Fassade: 5 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,36	1,12
minimiere soziale Kosten	2010	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,32
	2015	Dämmung Fassade: 5 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,36	1,12
minimiere Treibhausgas- emissionen		Generalsanierung: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, Hanf-Dämmplatten neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem mit Holzpellets-Zentralhgz., Warmwasserb. Integriert	$U_{\text{OG}} = 0,1$ $U_{\text{Aw}} = 0,14$ $U_{\text{K}} = 0,25$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,75
minimiere Energie- verbrauch		Generalsanierung: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, EPS neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem, Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert	$U_{\text{OG}} = 0,1$ $U_{\text{Aw}} = 0,14$ $U_{\text{K}} = 0,24$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,75

Unter den Kriterien „minimiere monetäre Kosten“ und „minimiere soziale Kosten“ erfolgt kein Wechsel des Energieträgers für die beiden Modellgebäude aus der Gruppe der kleinen Mehrfamilienhäusern. Da der Energieträger hier „dezentraler Mix“ bzw. Fernwärme ist, wird vom Modell kein Wechsel des Energieträgers erzwungen<sup>62</sup>. Eine Dämmung der obersten Geschoßdecke erfolgt nur beim Modellgebäude aus der Periode

<sup>62</sup> Die Änderung der Zusammensetzung des „dezentralen Mixes“ wird exogen vorgegeben, bei Fernwärme gibt es keine Notwendigkeit, eine Heizanlage pro Gebäude oder pro Wohneinheit zu erneuern.

1945 – 1960, da hier der Ausgangszustand ausreichend schlecht bzw. der U-Wert im Ausgangszustand ( $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) ausreichend hoch ist. Ansonsten erfolgen unter „minimiere monetäre Kosten“ und „minimiere soziale Kosten“ vor allem erzwungene Maßnahmen (Überschreitung der Nutzungsdauer).

#### 6.1.4 Große Mehrfamilienhäuser

- *Großes Mehrfamilienhaus, Bauperiode vor 1919, Fassade denkmalgeschützt, Heiz- und Warmwassersystem: dezentraler Mix*

Letzter Fenstertausch: 1960,  $U_{\text{Fenster}} = 3,1 \text{ W/m}^2\text{K}$

Letzte Änderung Fassade: 1910,  $U_{\text{Außenwand}} = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U_{\text{Ob. Geschoßdecke}} = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $U_{\text{Kellerdecke}} = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$

Heizlast (bezogen auf die Bruttogeschosßfläche):  $p_{0\text{BGF}} = 1,93 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tab. 6.8: Übersicht Modellergebnisse für großes Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1971 – 1980, Heiz- und Warmwassersystem: Fernwärme

	Jahr	Maßnahme	U-Wert(e) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Heizlast ( $p_{0\text{BGF}}$ ) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
minimiere monetäre Kosten	2006	therm. Verbesserung ges. Gebäudehülle (außer Fassade): Ob. Geschoßdecke: 10,7 cm, EPS Keller: 9,4 cm, EPS neue Fenster: PVC ( $U = 1,3$ )	$U_{\text{OG}} = 0,28$ $U_{\text{Aw}} = 1,0$ $U_{\text{K}} = 0,39$ $U_{\text{F}} = 1,3$	1,3
minimiere soziale Kosten	2006	therm. Verbesserung ges. Gebäudehülle (außer Fassade): Ob. Geschoßdecke: 12,5 cm, EPS Keller: 10,9 cm, EPS neue Fenster: PVC ( $U = 1,3$ )	$U_{\text{OG}} = 0,25$ $U_{\text{Aw}} = 1,0$ $U_{\text{K}} = 0,35$ $U_{\text{F}} = 1,3$	1,28
	2007	Wechsel Heiz-/WW-system: Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert		
minimiere Treibhausgas- emissionen	2006	Generalsanierung (außer Fassadendämmung): Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, Hanf-Dämmplatten neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem mit Holzpellets-Zentralhgz., Warmwasserb. integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 1,0$ $U_{\text{K}} = 0,28$ $U_{\text{F}} = 0,8$	1,18
minimiere Energie- verbrauch	2006	Generalsanierung (außer Fassadendämmung): Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, EPS neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem, Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 1,0$ $U_{\text{K}} = 0,27$ $U_{\text{F}} = 0,8$	1,18

Bei diesem Modellgebäude ist die Fassade denkmalgeschützt, Maßnahmen an der Fassade sind also nicht erlaubt. Im Fall des äquivalenten Gebäudes ohne Denkmalschutz erfolgen die gleichen Maßnahmen, zusätzlich wird aber auch die Fassade gedämmt. Bemerkenswert ist, dass die Maßnahme der thermischen Verbesserung der gesamten Gebäudehülle auch unter den Kriterien „minimiere monetäre Kosten“ und „minimiere soziale Kosten“ im Jahr 2006 erfolgt (Fenstertausch muss aber in diesem Jahr erfolgen, weil die technische Lebensdauer der bestehenden Fenster bereits erreicht wurde).

- *Großes Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1945-1960, Heiz- und Warmwassersystem: dezentraler Mix*

Letzter Fenstertausch: 1980,  $U_{\text{Fenster}} = 3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$

Letzte Änderung Fassade: 1970,  $U_{\text{Außenwand}} = 1,35 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U_{\text{Ob. Geschößdecke}} = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $U_{\text{Kellerdecke}} = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$

Heizlast (bezogen auf die Bruttogeschößfläche):  $p_{0\text{BGF}} = 1,94 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tab. 6.9: Übersicht Modellergebnisse für großes Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1945-1960, Heiz- und Warmwassersystem: dezentraler Mix

	Jahr	Maßnahme	U-Wert(e) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Heizlast ( $p_{0\text{BGF}}$ ) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
minimiere monetäre Kosten	2006	Dämmung der obersten Geschößdecke: 11,3 cm; Dämmstoff EPS	0,27	1,71
	2010	Dämmung Fassade: 10,3 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,29	1,24
	2013	therm. Verbesserung ges. Gebäudehülle: Kellerdecke: 8,7 cm, EPS Fenster: PVC ( $U=1,3$ ); Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	$U_{\text{K}} = 0,38$ $U_{\text{F}} = 1,3$	0,88
minimiere soziale Kosten	2006	Wechsel Heiz-/WW-system: Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert		
	2010	Dämmung Fassade: 5,5 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,46	1,54
	2013	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,28
minimiere Treibhausgas- emissionen	2006	Generalsanierung: Ob. Geschößdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, Hanf-Dämmplatten neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem mit Holzpellets-Zentralhgz., Warmwasserb. integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 0,16$ $U_{\text{K}} = 0,26$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,72
minimiere Energie- verbrauch	2006	Generalsanierung: Ob. Geschößdecke: 25 cm, Schafwolle, Fassade: 25 cm, EPS Keller: 15 cm, EPS, neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem, Wärmepumpe Grundwasser, Warmwb. integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 0,14$ $U_{\text{K}} = 0,26$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,71

- *Großes Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1961-1970, Heizsystem: Öl zentral, Warmwasserbereitung integriert*

Installationszeitpunkt Heiz-/Warmwasserbereitungssystem: 1991

Letzter Fenstertausch: 1985,  $U_{\text{Fenster}} = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$

Letzte Änderung Fassade: 1968,  $U_{\text{Außenwand}} = 1,25 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U_{\text{Ob. Geschosßdecke}} = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $U_{\text{Kellerdecke}} = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$

Heizlast (bezogen auf die Bruttogeschosßfläche):  $p0_{\text{BGF}} = 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tab. 6.10: Übersicht Modellergebnisse für großes Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1961-1970, Heizsystem: Öl zentral, Warmwasserbereitung integriert

	Jahr	Maßnahme	U-Wert(e) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Heizlast ( $p0_{\text{BGF}}$ ) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
minimiere monetäre Kosten	2006	Wechsel Heiz-/WW-system: Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert		
	2008	Dämmung Fassade: 5 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,47	1,47
	2018	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,27
minimiere soziale Kosten	2006	Wechsel Heiz-/WW-system: Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert		
	2008	Dämmung Fassade: 5,27 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,46	1,46
	2018	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,26
minimiere Treibhausgas- emissionen		Generalsanierung: Ob. Geschosßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Hanf-Dämmplatten Keller: 15 cm, Hanf-Dämmplatten neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem mit Holzpellets-Zentralhgz., Warmwasserb. integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 0,15$ $U_{\text{K}} = 0,26$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,7
minimiere Energie- verbrauch		Generalsanierung: Ob. Geschosßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, EPS Keller: 15 cm, EPS neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ ) neues Heiz-/WW-system: Solar-Kombisystem, Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert	$U_{\text{OG}} = 0,14$ $U_{\text{Aw}} = 0,14$ $U_{\text{K}} = 0,26$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,7

*Großes Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1971-1980, Heizsystem: Fernwärme*

Installationszeitpunkt Heiz-/Warmwasserbereitungssystem: 1997

Letzter Fenstertausch: 1977,  $U_{\text{Fenster}} = 2,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ Letzte Änderung Fassade: 1975,  $U_{\text{Außenwand}} = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  $U_{\text{Ob. Geschoßdecke}} = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $U_{\text{Kellerdecke}} = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ Heizlast (bezogen auf die Bruttogeschosßfläche):  $p0_{\text{BGF}} = 1,19 \text{ W/m}^2\text{K}$ 

Tab. 6.11: Übersicht Modellergebnisse für großes Mehrfamilienhaus, Bauperiode 1971 – 1980, Heiz- und Warmwassersystem: Fernwärme

	Jahr	Maßnahme	U-Wert(e) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Heizlast ( $p0_{\text{BGF}}$ ) nach Maßnahme ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
minimiere monetäre Kosten	2008	Wechsel Heiz-/WW-system: Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert		
	2010	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,09
	2015	Dämmung Fassade: 5 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,36	0,95
minimiere soziale Kosten	2008	Wechsel Heiz-/WW-system: Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert		
	2010	Fenstertausch; PVC; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	1,3	1,09
	2015	Dämmung Fassade: 5 cm; Dämmstoff EPS; Grund: Überschreitung Nutzungsdauer	0,36	0,95
minimiere Treibhausgas- emissionen	2006	therm. Verbesserung ges. Gebäudehülle: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, Hanf-Dämmpl. neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ )	$U_{\text{OG}} = 0,1$ $U_{\text{Aw}} = 0,14$ $U_{\text{K}} = 0,25$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,68
	2008	Wechsel Heiz-/WW-system: Solar- Kombisystem, Holzpellets-Zentralhgz., Warmwasserb. integriert		
minimiere Energie- verbrauch	2006	therm. Verbesserung ges. Gebäudehülle: Ob. Geschoßdecke: 25 cm, Schafwolle Fassade: 25 cm, Schafwolle Keller: 15 cm, EPS neue Fenster: Holz ( $U = 0,8$ )	$U_{\text{OG}} = 0,1$ $U_{\text{Aw}} = 0,14$ $U_{\text{K}} = 0,24$ $U_{\text{F}} = 0,8$	0,68
	2008	Wechsel Heiz-/WW-system: Solar- Kombisystem, Wärmepumpe Grundwasser, Warmwasserb. integriert		

Im Gegensatz zu den anderen Gebäudetypen fällt auf, dass für große Mehrfamilienhäuser ab dem Baujahr 1961 Grundwasser-Wärmepumpen als im monetären Sinn günstigstes System gelten (diese werden sogar vor Überscheitung der Nutzungsdauer gewählt). Die Durchdringung von Wärmepumpen im Bereich der Mehrfamilienhäuser ist allerdings durch Restriktionen begrenzt (siehe Tab. 6.13).

#### 6.1.5 Resümee aus den Einzelanalysen:

- Erzwungene Maßnahmen (Fenstertausch, Dämmung der Fassade, Wechsel des Heiz-/Warmwasserbereitungssystems nach Ablauf der Nutzungsdauer) überwiegen bei Anwendung der Kriterien „minimiere monetäre Kosten“ und „minimiere soziale Kosten“.
- Unter den nicht erzwungenen Maßnahmen ist die Maßnahme „Dämmung der obersten Geschoßdecke“ die häufigste, vorausgesetzt, dass der Ausgangszustand in thermischer Hinsicht entsprechend schlecht ist (Baujahr vor 1970).
- Unter „minimiere soziale Kosten“ erfolgt ein nicht erzwungener Heizsystemwechsel etwas häufiger im Vergleich zu „minimiere monetäre Kosten“. Dieser Heizsystemwechsel (z.B. zu Stückholz) kann geringere Dämmdicken bei nachfolgenden Dämmmaßnahmen im Vergleich zu „minimiere monetäre Kosten“ bedingen. Bei gleichem Energieträger sind die Dämmdicken bei Minimierung der sozialen Kosten allerdings höher.
- Im Fall der großen Mehrfamilienhäuser stellt ein Wechsel des Heizsystems zu einer Grundwasser-Wärmepumpe häufig die ökonomischste Variante dar.
- Abgesehen von einem Wechsel zu Wärmepumpen erfolgt im Fall „minimiere monetäre Kosten“ bevorzugt ein Energieträgerwechsel zu Erdgas oder Fernwärme, im Fall „minimiere soziale Kosten“ zu Stückholz oder Fernwärme. Vereinzelt ist bei entsprechend niedriger Heizlast auch ein Wechsel zu Stromheizungen (Nachtspeicheröfen) die ökonomisch (monetär) günstigste Variante.
- Unter den Kriterien „minimiere Treibhausgasemissionen“ und „minimiere Energieverbrauch“ sind die gewählten Maßnahmen nur in geringem Maß von den Gebäudespezifikationen abhängig und sehr ähnlich. Es werden die maximal erlaubten Dämmdicken gewählt. Bevorzugte Dämmstoffe sind Schafwolle, Hanf und EPS<sup>63</sup>. Als Heizsysteme werden häufig Solar-Kombisysteme gewählt, entweder in Kombination mit Pelletsheizungen<sup>64</sup> (minimiere Treibhausgasemissionen) oder Grundwasser-Wärmepumpen (minimiere Energieverbrauch).

---

<sup>63</sup> Die Wahl von EPS unter der Bedingung „minimiere Energieverbrauch“ resultiert daher, dass der etwas niedrigere Energieverbrauch aufgrund niedrigeren U-Werts bei Dämmung mit EPS bei gleicher Dämmdicke den höheren Anteil an grauer Energie bei EPS kompensiert.

<sup>64</sup> Biomasseheizungen (Stückholz, Hackschnitzel, Holzpellets) liegen bezüglich kumulierter Treibhausgasemissionen sehr eng beisammen (siehe auch Kap. 6.2.2. „minimiere Treibhausgasemissionen“, Tab. 6.18)

## 6.2. Anwendung des Modells auf den gesamten Wohngebäudebestand Österreichs

In diesem Unterkapitel werden Ergebnisse der Modellanwendung auf den gesamten Wohngebäudebestand Österreichs für ein Referenz-Szenario vorgestellt, wobei zunächst auf wesentliche Eckpunkte des Referenz-Szenarios eingegangen wird. Nach einem Vergleich der Ergebnisse unter Anwendung der verschiedenen Optimierungsziele im Referenz-Szenario werden die Einflüsse der Variation wesentlicher Rahmenbedingungen wie Energiepreinsniveaus oder Austauschraten diskutiert. Es soll hier noch einmal erwähnt werden, dass nach dem Jahr 2002 errichtete Gebäude nicht berücksichtigt werden.

### 6.2.1. Definition eines „Referenz-Szenarios“

Als Referenzjahr für die Definition von Gebäudeklassen und Gebäudesegmenten wurde aufgrund von Datenverfügbarkeit<sup>65</sup> das Jahr 2002 gewählt.

Das Startjahr der Simulationsperiode ist also 2003, das Ende der Periode für die hier dargestellten Simulationsläufe ist 2020. Für den bereits vergangenen Zeitraum von 2003 bis 2005 wird ein Standardlauf („minimiere monetäre Kosten“ zu Bedingungen des Referenz-Szenarios) herangezogen, erst ab dem Jahr 2006 gelten die Bedingungen des jeweiligen Modell-Laufs<sup>66</sup>.

Im „Referenz-Szenario“ sind keine energiepolitischen Instrumente (Investitionszuschüsse, Steuern) definiert<sup>67</sup>.

Ein Szenario besteht aus einer Reihe von Parameterdefinitionen, wobei es möglich ist, für jedes Jahr des untersuchten Zeitraums unterschiedliche Werte festzulegen. Die Parameterdefinitionen werden in folgende Kategorien unterteilt:

#### 1. Ressourcenpotenziale:

Endenergieverbrauchspotenziale für Energieträger, im Modell spezifiziert für Energieträger aus Biomasse (Stückholz, Holzpellets, Hackschnitzel, Biomasse-Fernwärme), grundsätzlich aber auch für andere Energieträger anwendbar.

Tabelle 6.12: Spezifikation von Ressourcenpotenzialen für Biomasse-Energieträger, Referenz-Szenario

	2005	2020	2005	2020
	GWh		PJ	
Stückholz	21435	24444	77	88
Hackschnitzel	3148	7778	11	28
Holzpellets	2083	5556	7,5	20
Biomasse-Fernwärme	787	1944	2.83	7

<sup>65</sup> Siehe auch Kapitel 4. Die Hauptquelle für die Definition von Gebäudesegmenten ist die Publikation „Wohnungen 2002“ (Statistik Austria 2003).

<sup>66</sup> Die Modellergebnisse unterscheiden sich daher erst ab dem Jahr 2006.

<sup>67</sup> Kapitel 7 widmet sich der Diskussion der Wirkung energiepolitischer Instrumente.

2. Maximale Durchdringungsraten:

Maximaler relativer Anteil (bezogen auf Wohneinheiten) des Einsatzes einer bestimmten Technologie in einem bestimmten Jahr.

Tabelle 6.13: Spezifikation von max. Durchdringungsraten, Ausschnitt, Referenz-Szenario

	2005	2020
	<i>rel. Anteil (%) an Wohneinheiten</i>	
<i>1-/2-familienhäuser</i>		
Stückholz zentral	30%	30%
Hackschnitzel zentral	10%	10%
Holzpellets zentral	40%	40%
Holzpellets Einzelofen	3%	3%
Holzpellets Etagenhzg.	7%	7%
Wärmepumpen	50%	50%
Fernwärme Wien	0,95%	3%
Fernwärme Rest	4,2%	10%
Fernwärme Biomasse	3,3%	7%
Solar-Warmwasser	80%	85%
Solar-Kombisysteme	50%	57%
<i>Mehrfamilienhäuser</i>		
Hackschnitzel zentral	3%	6%
Holzpellets zentral	5%	9%
Wärmepumpen	3%	7%
Fernwärme Wien	21%	37%
Fernwärme Rest	20,5%	30%
Fernwärme Biomasse	0,53%	2%
Solar-Warmwasser	6%	17%
Solar-Kombisysteme	2%	6%

Wie Tabelle 6.13 zeigt, sind für einige Technologien (z.B. Wärmepumpen, Fernwärme, Solartechnologien) die maximalen Durchdringungsraten als ansteigend modelliert.

3. Maximale Austauschraten:

Maximaler relativer Anteil (bezogen auf Wohneinheiten) der Durchführung einer bestimmten Maßnahme in einem bestimmten Jahr. Die maximalen Austauschraten sind für den Zeitraum 2003 – 2005 etwas niedriger angesetzt als für den Zeitraum 2006 – 2020 (siehe Tabelle 6.14)

Tabelle 6.14: Spezifikation von maximalen Austauschraten, Referenz-Szenario

	rel. Anteil (%) an Wohneinheiten	
	2003 - 2005	2006 - 2020
Dämmung Außenwand	1%	1,5%
Dämmung ob. Geschoßdecke	1%	1,5%
Dämmung Kellerdecke / Fußboden	1%	1,5%
Dämmung Außenw. und Fenstertausch	0,8%	1,2%
Dämm-Maßnahmen, gesamt	1,2%	2%
Verbesserung gesamte Gebäudehülle	0,6%	1%
Generalsanierung (Verbesserung gesamte Gebäudehülle + neues Heiz-/WW-system)	0,5%	0,8%
Fenstertausch	1,2%	1,8%
Tausch Heizsystem	4,5%	5%
Tausch Warmwasserbereitung	4,5%	5%

#### 4. Preisentwicklung von Energieträgern:

Es wird im Referenz-Szenario angenommen, dass eine weitere reale Steigerung der Preise für Energieträger bis 2020 stattfindet, mit jährlichen Preissteigerungsraten zwischen 0,3% und 1%, je nach Energieträger. Die im Vergleich zu den Vorjahren relativ hohen Preise für Heizöl und Holzpellets in den Jahren 2005/2006 gehen laut Referenz-Szenario im Jahr 2007 leicht zurück, steigen aber danach ebenfalls mit einer konstanten Preissteigerungsrate an<sup>68</sup>.

Tab. 6.15: Preisentwicklung von Energieträgern (für 2007 – 2020 angenommene Werte)<sup>69</sup>

	Preise in EURct/kWh (real, Preisbasis 2005)				jährl. Steigerung 2008 – 2020 (%)
	2005	2006	2007	2020	
Heizöl extraleicht	6,17	6,9	6,75	7,68	1%
Erdgas	5,32	5,67	5,71	6,33	0,8%
Holzpellets (eingeblesen)	3,5	4,53	4,3	4,77	0,8%
Holzpellets (in Säcken)	4,59	5,93	5,63	6,25	0,8%
Scheitholz	2,50	2,86	2,87	3,02	0,4%
Hackschnitzel	2,30	2,46	2,47	2,57	0,3%
Kohle/Koks	4,34	4,68	4,72	5,23	0,8%
Strom (Tag)	14,45	14,63	14,72	15,91	0,6%
Strom (Nacht)	10,11	10,24	10,3	11,14	0,6%
Strom (Wärmepumpe)	11,27	11,41	11,48	12,41	0,6%

<sup>68</sup> Für alle anderen Energieträger gibt es im Referenz-Szenario keinen Preisrückgang im Jahr 2007.

<sup>69</sup> Die Preise für Fernwärme sind hier nicht pro kWh angegeben wegen des teilweise hohen nicht verbrauchabhängigen Anteils im Gesamtpreis (siehe Tab. 6.16). Preise pro kWh hängen also sehr stark von der thermischen Qualität des Gebäudes ab.

Tab. 6.16: Preise für verschiedene Arten von Fernwärme im Jahr 2006<sup>70</sup>, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: Homepages von Fernwärmeversorgern, Steffens (2002)

	Arbeitspreis (EURct/kWh)	Grundpreis 1 (flächenbezogen, EUR/m <sup>2</sup> /Monat)	Grundpreis 2 (leistungsbezogen, EUR/kW/Jahr)	Meßpreis (EUR/Jahr)
Fernwärme Wien	3,18	0,305		
Fernwärme Rest	4,32	0,084	18	120
Fernwärme Biomasse	6,2		21,6	144

### 5. Weitere Szenarioparameter:

Zu dieser Kategorie werden z.B. Diskontraten (Zinssätze) oder Lebensdauern (technisch, kalkulatorisch) gerechnet. Zur Berechnung von Barwerten sind unterschiedliche Diskontraten für Konsumenten (private Entscheidungsträger) und Gesellschaft (öffentlicher Sektor als Subventionsgeber) vorgesehen, um die unterschiedliche Perspektive dieser Akteure zu berücksichtigen.

Tab. 6.17: Spezifikation weiterer Szenarioparameter, Ausschnitt, Referenz-Szenario

	Einheit	Wert
Heizgradtage	Kd	3666
Diskontrate (Konsument)	%	4
Diskontrate (Gesellschaft)	%	2,5
kalkulatorische Lebensdauer Heiz-/Warmwassersysteme	Jahre	10
kalkulatorische Lebensdauer Dämmung / Fenster	Jahre	15
technische Lebensdauer Heizsysteme (Wärmeerzeuger)	Jahre	20
technische Lebensdauer Wärmeverteilung	Jahre	40
technische Lebensdauer Fassade	Jahre	40
technische Lebensdauer Holzfenster	Jahre	30
technische Lebensdauer PVC-Fenster	Jahre	35
Lernrate (jährliche Verringerung der Investitionskosten) Solaranlagen	%	1
Lernrate Biomasse-Heizungen	%	0,5
Lernrate Wärmepumpen	%	0,2

<sup>70</sup> Als Preissteigerungsraten sind für Fernwärme Wien und Fernwärme Rest 0,5%, für Fernwärme Biomasse 0,45% angenommen.

### 6.2.2. Vergleich der Anwendung der verschiedenen Optimierungsziele unter den Annahmen des „Referenz-Szenarios“

#### Minimiere monetäre Kosten

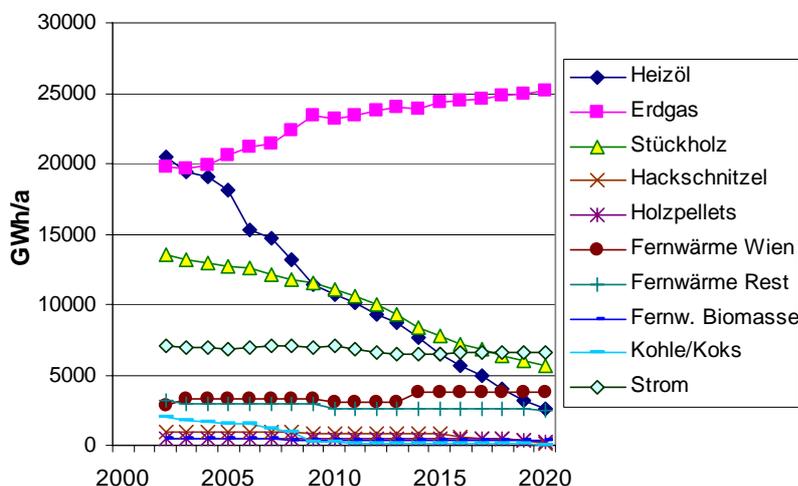


Abb. 6.1: Endenergieverbrauch (GWh/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung pro Energieträger, 2002 – 2020, minimiere monetäre Kosten, Referenz-Szenario

Die stärkste Änderung im Endenergieeinsatz betrifft den Energieträger Erdöl – der Endenergieverbrauch von Öl für Raumheizung und Warmwasserbereitung sinkt von rund 20.500 GWh/a auf ca. 2.500 GWh/a im Jahr 2020<sup>71</sup>. Dieser starke Rückgang von Öl hat in erster Linie mit massivem Energieträgerwechsel weg vom Öl zu tun, aber auch mit thermisch verbesserten Gebäuden mit geringerem Energiebedarf. Weitere markante Änderungen sind der Anstieg des Verbrauchs an Erdgas (von ca. 19.700 GWh/a auf 24.900 GWh/a), der Rückgang des Verbrauchs an Stückholz (von 13.500 GWh/a auf 5.800 GWh/a) sowie des Verbrauchs von Kohle. Die Verbrauchswerte für Elektrizität und Fernwärme stagnieren in etwa, der Verbrauch an Biomasse-Energieträgern (außer Stückholz) bleibt auf sehr niedrigem Niveau.

Die Verteilung von Energieträgern bzw. Heizsystemen nach Wohneinheiten zeigt Abb 6.2. Die Dominanz von Erdgas als Energieträger ist hier noch stärker zu erkennen, der Anteil von mit Erdgas beheizten Wohneinheiten steigt von 30,2% auf 50,3%. Der Wechsel zu Erdgas erfolgt sowohl von Öl, Stückholz als auch von Kohle. Auffallend ist auch das Wachstum des relativen Anteils an Wärmepumpen (von 1% auf 14,4%), diese kommen vor allem in Zweifamilienhäusern zum Einsatz. Aufgrund der vergleichsweise geringen Investitionskosten (innerhalb der verschiedenen Wärmepumpensysteme) setzen sich Luft-Wasser Wärmepumpen durch.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass trotz des Anstiegs des Einsatzes von Wärmepumpen und einem stagnierenden Anteil von Strom-Direktheizungen der Gesamtstromverbrauch für Raumheizung und Warmwasserbereitung nicht ansteigt. Dieser Umstand hängt mit dem sinkenden Energiebedarf pro Wohneinheit sowie dem relativ

<sup>71</sup> Bezüglich der absoluten Werte für den Energieverbrauch existieren in den offiziellen Quellen, sowie auch in der vorliegenden Arbeit, nicht unerhebliche statistische und methodische Unsicherheiten. Siehe dazu auch Fußnote 76.

geringen Energiebedarf der Wärmepumpen, aber auch mit dem sinkenden Anteil von Strom als Energieträger für Warmwasserbereitung (dieser sinkt von 28,9% auf 21,8% aller Wohneinheiten, siehe Abb. 6.3) zusammen. Der Anteil der Wohneinheiten mit integrierter Warmwasserbereitung steigt im betrachteten Zeitraum von 46% auf 58%<sup>72</sup>, dezentrale Warmwasserbereitung in Mehrfamilienhäusern stagniert. Der Anteil an Solar-Warmwassersystemen sinkt ab 2015.

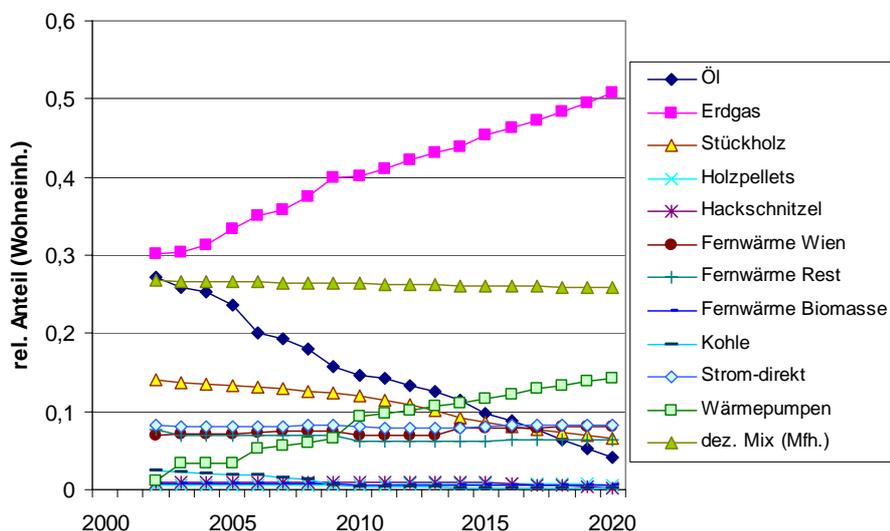


Abb. 6.2: Entwicklung des relativen Anteils (an Wohneinheiten) verschiedener Heizsysteme, 2002 – 2020, minimiere monetäre Kosten, Referenz-Szenario

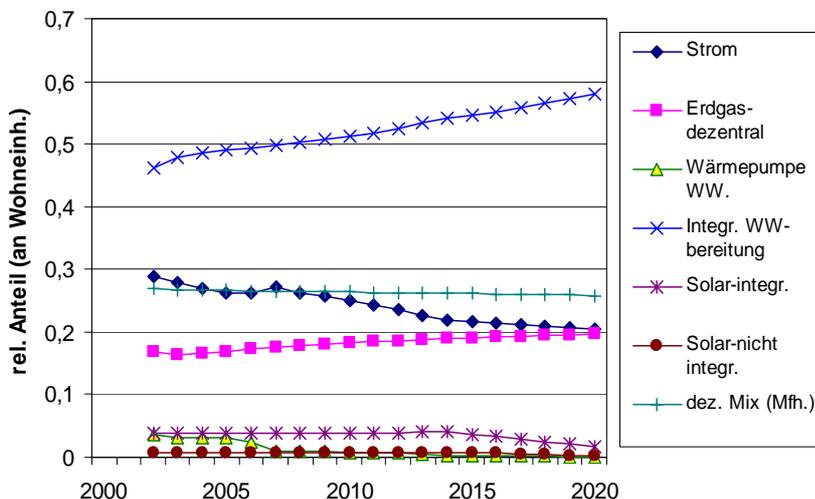


Abb. 6.3: Entwicklung des relativen Anteils (an Wohneinheiten) verschiedener Systeme zur Warmwasserbereitung, 2002 – 2020, minimiere monetäre Kosten, Referenz-Szenario

<sup>72</sup> Gas-Kombithermen in Ein- und Zweifamilienhäusern werden der Kategorie „integrierte Warmwasserbereitung“ zugeordnet, während sie in Mehrfamilienhäusern der dezentralen Warmwasserbereitung zugeordnet sind. In Mehrfamilienhäusern bedeutet dezentrale Versorgung, dass die Wärmeversorgung pro Wohneinheit erfolgt, die unterschiedlichen dezentralen Systeme sind unter dem Begriff „dezentraler Mix“ subsumiert (siehe auch Kap. 4.2, S. 37ff.). Hauszentralheizungen und Fernwärmeversorgung zählen in Mehrfamilienhäusern zu den zentralen Systemen.

## Minimiere soziale Kosten

Die auffallendsten Unterschiede bezüglich Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern bei Anwendung des Optimierungsziels „minimiere soziale Kosten“ im Vergleich zu „minimiere monetäre Kosten“ betreffen die Energieträger Erdgas und Stückholz, sowie in geringerem Maß Holzpellets und Fernwärme Wien (Abb. 6.4). Im Vergleich 2020 – 2002 ist ein leichtes Sinken des Verbrauchs von Erdgas sowie Stückholz zu beobachten, der Verbrauch von Stückholz ist aber deutlichen Fluktuationen unterworfen. Die Fluktuationen beim Verbrauch von Stückholz resultieren aus dem zeitweisen Überschreiten der Durchdringungsraten der Technologie „Stückholz Zentralheizung“ in Ein- und Zweifamilienhäusern<sup>73</sup>, sind also modelltechnisch begründbar. Weiters gibt es im Unterschied zu „minimiere monetäre Kosten“ einen stärkeren Anstieg des Verbrauchs von Fernwärme (Wien) sowie von Holzpellets.

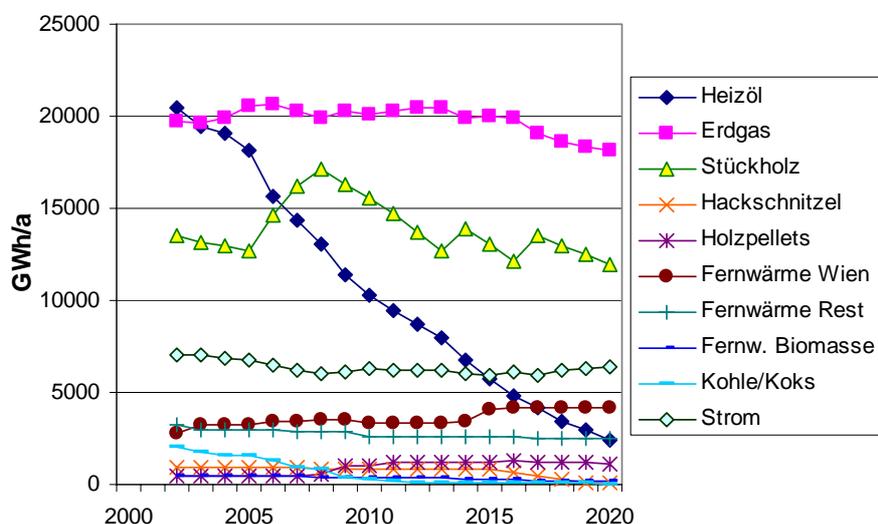


Abb. 6.4: Endenergieverbrauch (GWh/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung pro Energieträger, 2002 – 2020, minimiere soziale Kosten, Referenz-Szenario

Die bereits erwähnten Unterschiede zu „minimiere monetäre Kosten“ spiegeln sich auch bei Betrachtung der Entwicklung der relativen Anteile von Energieträgern bzw. Heizsystemen wider (Abb. 6.5). Die Verbreitung von Erdgas steigt weniger stark (von 30,2% auf 39,3% aller Wohneinheiten), die Verbreitung von Stückholz steigt leicht an, allerdings stark im Zeitverlauf fluktuierend. Ähnlich wie bei „minimiere monetäre Kosten“ erfolgt auch hier ein starker Anstieg des Einsatzes von Wärmepumpen (von 1% auf 16,5%), die Verbreitung von Holzpellets steigt auf 2,6%, wobei dieser Anstieg in erster Linie bei Zentralheizungen in Mehrfamilienhäusern erfolgt (aus Abb. 6.5 nicht unmittelbar ersichtlich).

<sup>73</sup> Die maximale Durchdringungsrates für „Stückholz zentral“ in Ein- und Zweifamilienhäusern liegt bei 30%. Solange diese überschritten ist, ist die Technologie „Stückholz zentral“ von der Optimierungsroutine ausgeschlossen. Der Anteil sinkt dann solange, bis diese Grenze wieder unterschritten wird und kann anschließend wieder steigen.

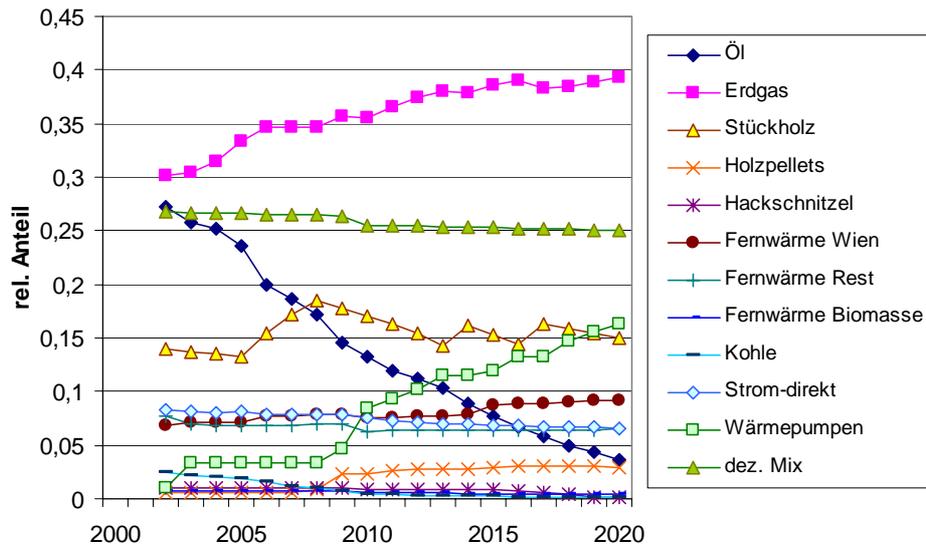


Abb. 6.5: Entwicklung des relativen Anteils (an Wohneinheiten) verschiedener Heizsysteme, 2002 – 2020, minimiere soziale Kosten, Referenz-Szenario

### Minimiere Treibhausgasemissionen

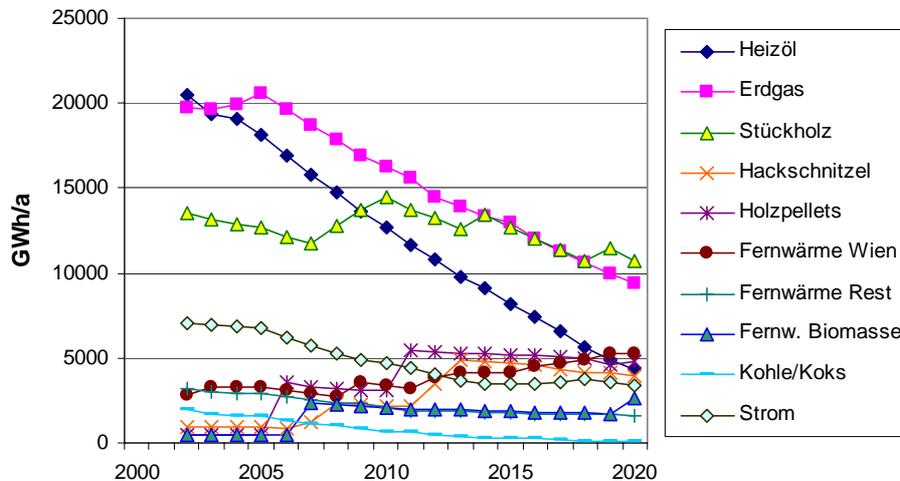


Abb. 6.6: Endenergieverbrauch (GWh/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung pro Energieträger, 2002 – 2020, minimiere Treibhausgasemissionen, Referenz-Szenario

Neben dem Endenergieverbrauch von Heizöl sinkt auch derjenige von Erdgas und Strom deutlich unter Anwendung des Kriteriums „minimiere Treibhausgasemissionen“. Ansteigend hingegen sind die Verbräuche für Holzpellets, Hackschnitzel, Fernwärme Wien und Fernwärme aus Biomasse, während der Endenergieverbrauch von Stückholz einem ähnlichen Verlauf folgt wie bei „minimiere soziale Kosten“, allerdings etwas stärker abfallend. Bei Holzpellets werden zumindest für einige Jahre der betrachteten Periode die Grenzen der Ressourcenverfügbarkeit überschritten, wobei diese Grenzen allerdings ansteigend modelliert sind (von ca. 2000 GWh/a bis ca. 5500/a im Jahr 2020).

Die Überschreitung von Grenzen der Ressourcenverfügbarkeit trifft auch für Fernwärme aus Biomasse zu.

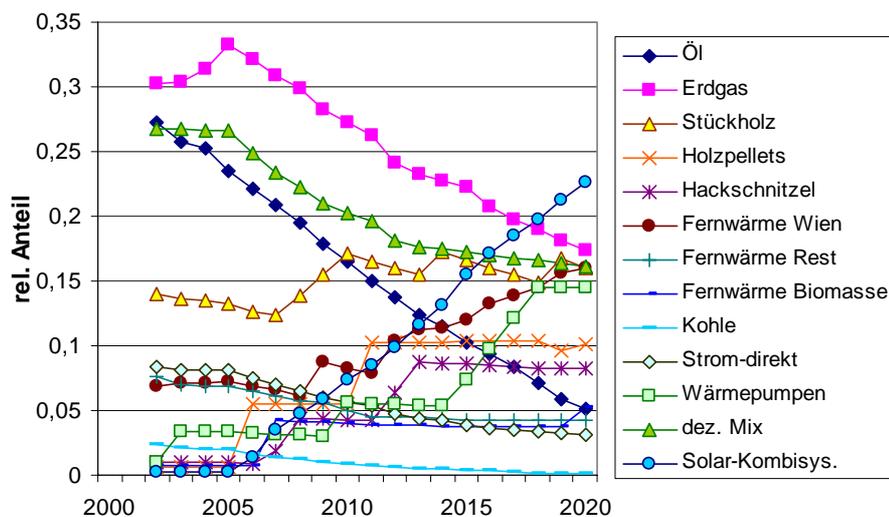


Abb. 6.7: Entwicklung des relativen Anteils verschiedener Heizsysteme, 2002 – 2020, minimiere Treibhausgasemissionen, Referenz-Szenario

Auffallend an der Entwicklung des relativen Anteils verschiedener Heizsysteme (Abb. 6.7) ist der starke Anstieg der Verbreitung von Solar-Kombisystemen (von 0,2% auf 23,1%). Daneben ist auch ein Anstieg bei den Biomasse-Energieträgern Holzpellets (bis 10%) und Hackschnitzel (bis 8,2%) sowie bei Fernwärme aus Biomasse (bis 5,3%) und bei „Fernwärme Wien“ (bis 17%) zu beobachten. Stückholz-Zentralheizungen nehmen leicht zu, allerdings bei sinkendem Gesamtverbrauch von Stückholz. Die Verbreitung von Wärmepumpen erfolgt in ähnlichem Ausmaß wie bei „minimiere monetäre Kosten“ und „minimiere soziale Kosten“, es kommen hier allerdings hauptsächlich Wasser-Wasser Wärmepumpen zum Einsatz.

Bei mehreren Energieträgern werden fallweise die Grenzen bezüglich maximaler Durchdringungsraten überschritten. Zu diesen Energieträgern gehören Stückholz, Hackschnitzel und Biomasse-Fernwärme bei Ein- und Zweifamilienhäusern sowie Holzpellets, Hackschnitzel, Biomasse-Fernwärme und Wärmepumpen im Bereich der Mehrfamilienhäuser. Bei Mehrfamilienhäusern werden auch die maximalen Durchdringungsraten für solare Warmwassersysteme und Solar-Kombisysteme überschritten.

Im Unterschied zu „minimiere monetäre Kosten“ und „minimiere soziale Kosten“ geht der relative Anteil des „dezentralen Mixes“ (dezentrale Wärmeversorgung in Mehrfamilienhäusern) zurück.

Die im Vergleich zu anderen Energieträgern relativ geringen kumulierten Treibhausgasemissionen von Biomasse-Energieträgern liegen eng beisammen und hängen wesentlich ab von Transportentfernung, Wahl des Transportmittels, Technologie der Gewinnung und Technologie der Weiterverarbeitung (insbesondere bei Pellets relevant) und sind daher mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.

Geringfügige Verschiebungen dieser Werte, die in der Fehler- bzw. Unsicherheitstoleranz liegen, können daher die Wahl innerhalb dieser Energieträger und damit die Ergebnisse beeinflussen. Sehr wahrscheinlich in diesem Zusammenhang ist, dass die kumulierten Treibhausgasemissionen von Pellets aufgrund aufwendigerer Produktionsverfahren im Zeitverlauf ansteigen werden, dieser Anstieg ist im Modell berücksichtigt. Für die anderen Biomasse-Energieträger werden nur sehr geringe Anstiege angenommen (siehe Tab. 6.18).

Tabelle 6.18: Zeitliche Entwicklung der kumulierten Treibhausgasemissionen ( $CO_2$ -Äquivalente in  $kg/kWh$  Endenergie) von Biomasse-Energieträgern

	$CO_2$ -Äquivalente ( $kg/kWh$ Endenergie)	
	2006	2020
Holzpellets	0,025	0,043
Hackschnitzel	0,037	0,041
Stückholz	0,0325	0,034
Fernwärme Biomasse	0,045	0,049

Der kontinuierliche Anstieg von Solaranlagen (auf 40% im Jahr 2020) zur Warmwasserbereitung ist aus Abb. 6.8 ersichtlich. Im Gegenzug dazu sinkt insbesondere elektrisch betriebene Warmwasserbereitung und konventionelle (ohne Solaranlage) integrierte Warmwasserbereitung.

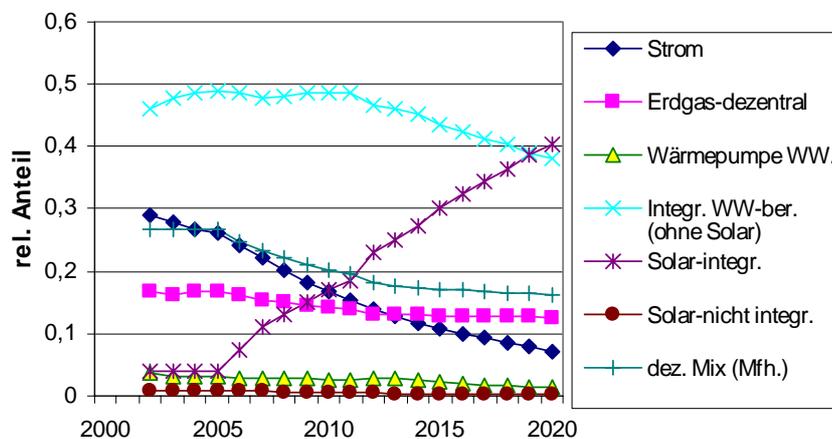


Abb. 6.8: Entwicklung des relativen Anteils (an Wohneinheiten) verschiedener Systeme zur Warmwasserbereitung, 2002 – 2020, minimiere Treibhausgasemissionen, Referenz-Szenario

Abb. 6.9 zeigt, welche Energieträger in Kombination mit Solar-Kombisystemen zum Einsatz kommen. Die wichtigsten sind Stückholz, Wärmepumpen, Hackschnitzel und Holzpellets, in geringerem Ausmaß Fernwärme aus Biomasse und „Fernwärme Wien“. Alle anderen Energieträger spielen in diesem Zusammenhang keine Rolle.

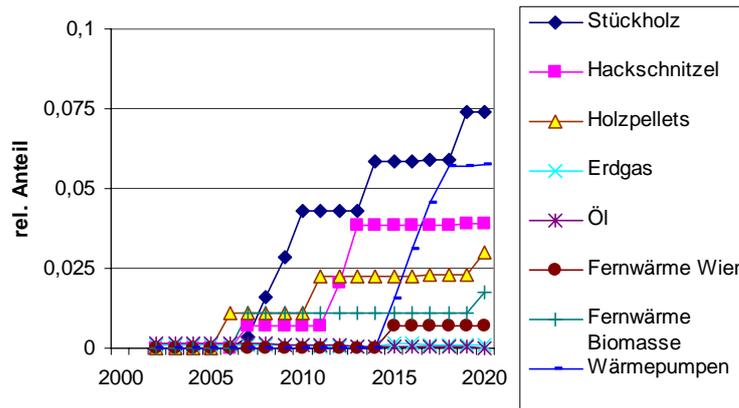


Abb. 6.9: Entwicklung des relativen Anteils (an Wohneinheiten) verschiedener Energieträger bei Solar-Kombisystemen, 2002 – 2020, minimiere Treibhausgasemissionen, Referenz-Szenario

### Minimiere (Lebenszyklus-)Energieverbrauch

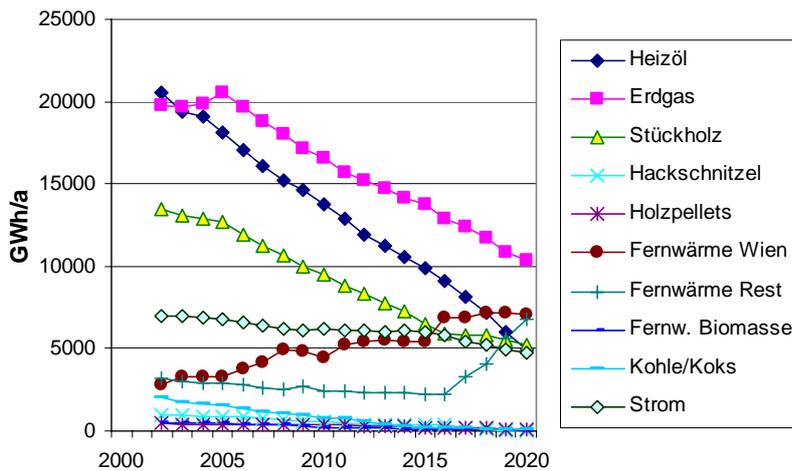


Abb. 6.10: Endenergieverbrauch (GWh/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung pro Energieträger, 2002 – 2020, minimiere (Lebenszyklus-) Energieverbrauch, Referenz-Szenario

Ähnlich wie im Fall „minimiere Treibhausgasemissionen“ sinken hier sowohl der Endenergieverbrauch von Heizöl als auch von Erdgas. Während der Verbrauch von Stückholz stärker abfällt, sinkt der Stromverbrauch weniger stark verglichen mit „minimiere Treibhausgasemissionen“, der Verbrauch an Fernwärme (außer aus Biomasse)<sup>74</sup> steigt stärker an. Der Verbrauch aller anderen Energieträger sinkt beinahe auf 0.

<sup>74</sup> Im Fall der Minimierung von (Lebenszyklus-) Energieverbrauch wird der Anteil an grauer Energie im Energieträger mitberücksichtigt (siehe auch Formeln 5.2 und 5.3, Kap. 5.1.2). Fernwärme Wien weist hier aufgrund eines eingerechneten Anteils an Kraft-Wärme-Kopplung niedrige Werte für graue Energie auf (siehe Tabelle im Anhang 12).

Wie Abb. 6.11 zeigt, werden ab 2014 Wärmepumpen aufgrund ihres vergleichsweise sehr geringen Endenergieverbrauchs die am häufigsten eingesetzte Form der Heizung (Anstieg bis 27,8%), Solar-Kombisysteme verbreiten sich ähnlich häufig wie im Fall „minimiere Treibhausgasemissionen“. Ab 2015 wird für Wärmepumpen in Ein- und Zweifamilienhäusern die Restriktion bezüglich maximaler Durchdringungsraten wirksam, weshalb ab diesem Zeitpunkt die Verbreitung von Wärmepumpen stagniert. Auch bei Solar-Kombisystemen dominieren Wärmepumpen. Erst ab 2015 können sich andere Systeme (Stückholz, Fernwärme) durchsetzen. Da Wasser/Wasser-Wärmepumpen innerhalb der Wärmepumpensysteme den höchsten Jahresnutzungsgrad (bzw. die höchste Jahresarbeitszahl) aufweisen, werden diese ausgewählt.

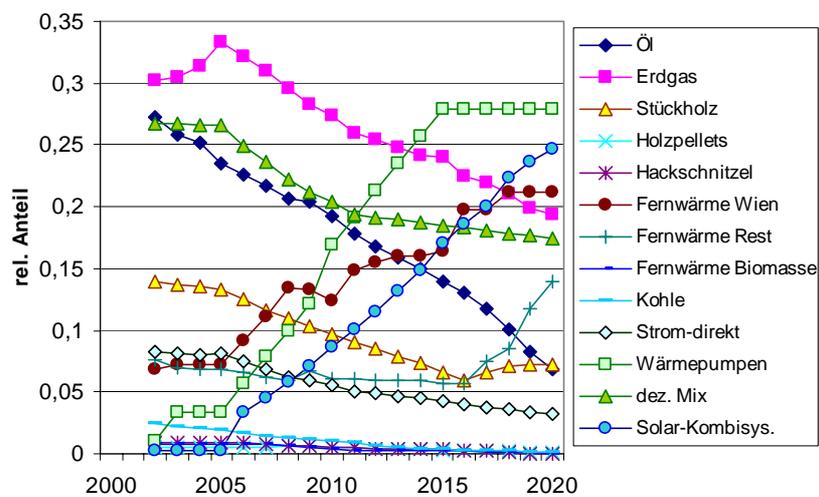


Abb. 6.11: Entwicklung des relativen Anteils (an Wohneinheiten) verschiedener Heizsysteme, 2002 – 2020, minimiere Energieverbrauch, Referenz-Szenario

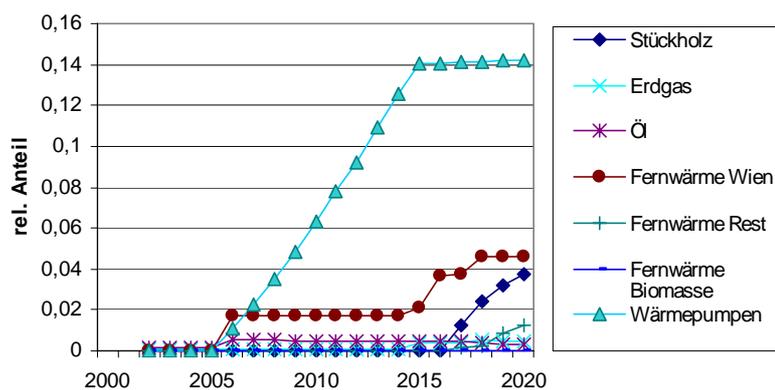


Abb. 6.12: Entwicklung des relativen Anteils (an Wohneinheiten) verschiedener Energieträger bei Solar-Kombisystemen, 2002 – 2020, minimiere Energieverbrauch, Referenz-Szenario

## Vergleich der Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch

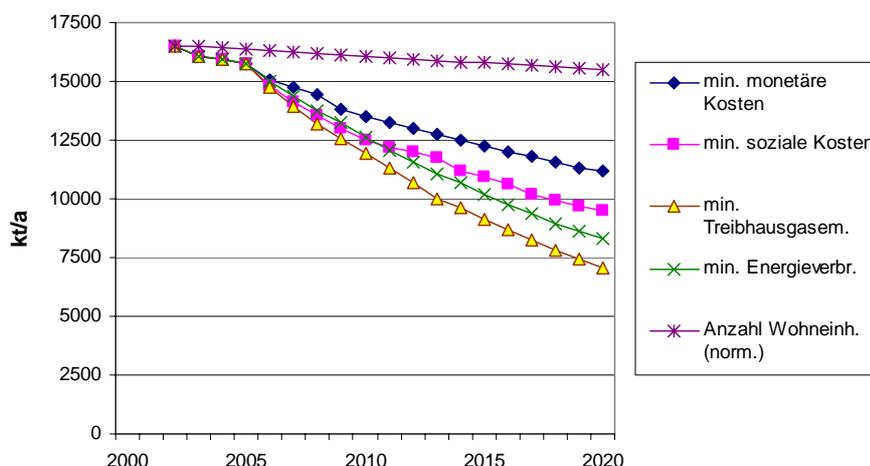


Abb. 6.13: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente, in kt/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand, 2002 – 2020, Vergleich der Optimierungsziele

Für alle vier Optimierungsziele sinken die Treibhausgasemissionen für Raumheizung und Warmwasserbereitung deutlich im Zeitverlauf (Abb. 6.13). Erwartungsgemäß am stärksten unter Anwendung des Kriteriums „minimiere Treibhausgasemissionen“ (von 16,5 Mt/a im Jahr 2002 auf ca. 7 Mt/a im Jahr 2020 bzw. um 57,4%), am schwächsten unter „minimiere monetäre Kosten“ (33,3%, Vergleich 2020 - 2002)<sup>75</sup>.

Ein kleiner Teil des Rückgangs der Treibhausgasemissionen lässt sich auf die sinkende Anzahl an Wohneinheiten (6,2% Rückgang im betrachteten Zeitraum) zurückführen, der größere Teil beruht aber auf verbesserter thermischer Qualität der Gebäude, effizienteren Heizsystemen und dem Einsatz CO<sub>2</sub>-ärmerer Brennstoffe. Wobei sich die CO<sub>2</sub>-Intensität des jeweils eingesetzten Energiemixes je nach Optimierungskriterium sehr unterschiedlich entwickelt, wie Abb. 6.14 zeigt.

In den Fällen „minimiere monetäre Kosten“ und „minimiere Energieverbrauch“ bleibt die CO<sub>2</sub>-Intensität des Energiemixes in etwa konstant. In diesen Fällen wird die Verringerung der CO<sub>2</sub>-Intensität durch Wechsel von Öl zu Erdgas durch den Rückgang des Einsatzes von Stückholz kompensiert. Erwartungsgemäß sinkt die CO<sub>2</sub>-Intensität am stärksten unter „minimiere Treibhausgasemissionen“ (um 33%, Vergleich 2020 – 2002), unter „minimere soziale Kosten“ sinkt diese um 13,6%.

<sup>75</sup> Zum Vergleich der absoluten Werte für Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch mit Daten der Statistik Austria siehe Fußnote 76.

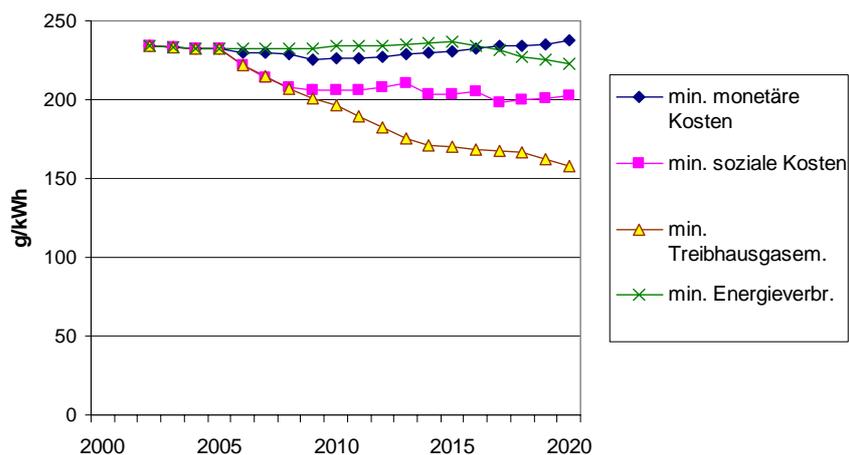


Abb. 6.14: Zeitliche Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Intensität (in g/kWh Endenergie) des jeweils eingesetzten Energie-Mixes für Raumheizung und Warmwasserber., 2002 – 2020, Vergleich der Optimierungsziele

Der zeitliche Verlauf des Endenergieverbrauchs ist für alle Simulationsfälle – abgesehen von „minimiere Energieverbrauch“ sehr ähnlich (Abb. 6.8). Im Fall „minimiere Energieverbrauch“ sinkt der Endenergieverbrauch für Raumheizung und Warmwasserbereitung von 254 PJ im Jahr 2002 auf 132 PJ im Jahr 2020 bzw. um 48%<sup>76</sup>. In den übrigen drei Fällen sinkt der Energieverbrauch im Zeitraum 2002-2020 zwischen 34% („minimiere monetäre Kosten“) und 36,4% („minimiere Treibhausgasemissionen“).

<sup>76</sup> Im Vergleich zu anderen Quellen (z.B. „Nutzenergieanalyse 2004“ (Statistik Austria 2005), 205 PJ Endenergieverbrauch in der Kategorie „Raumheizung und Klimaanlage“ für private Haushalte im Jahr 2002) werden hier höhere Absolutwerte für Energieverbrauch sowie Treibhausgasemissionen im Jahr 2002 errechnet. Das liegt u.a. an nicht unerheblichen statistischen und methodischen Unsicherheiten, die sich auch in der Abweichung verschiedener Quellen der Statistik Austria (Mikrozensus vs. Nutzenergieanalyse) zeigen. Ein weiterer Grund für die höheren Werte in dieser Arbeit ist, dass renovierte thermisch verbesserte Gebäude (insb. relevant für solche mit Baujahr vor 1970) nicht im Modell im Referenzjahr 2002 berücksichtigt werden. Bei den Treibhausgasemissionen kommt hinzu, dass bei Berechnung der CO<sub>2</sub>-Äquivalente hier „graue Anteile“ berücksichtigt sind, daher die spezifischen Treibhausgasemissionen pro Endenergie höher sind als sonst oft angenommen (siehe Tabelle A.12.2 im Anhang 2). Bei den hier dargestellten Ergebnissen sind also relative Reduktionen von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen über die Zeit aussagekräftiger als deren absoluten Werte.

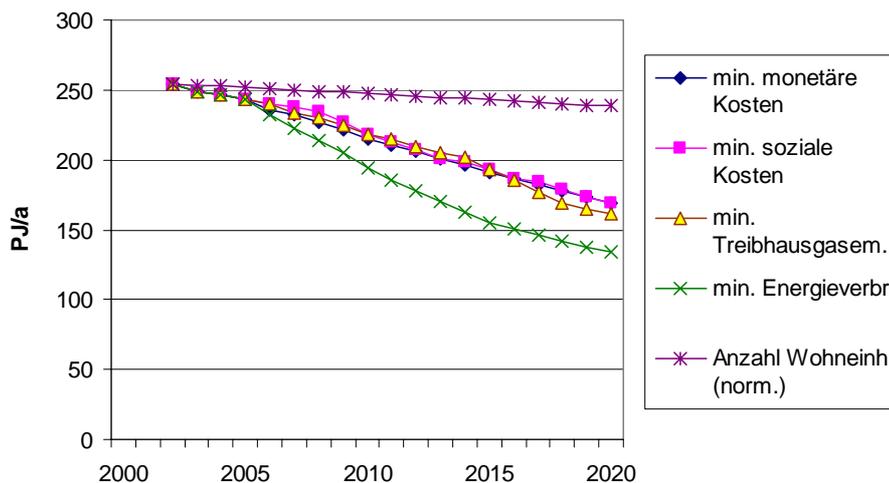


Abb. 6.15: Entwicklung des Endenergieverbrauchs (in PJ/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand, 2002 - 2020

Im Fall von „minimiere Energieverbrauch“ liegt der niedrigere Endenergieverbrauch teilweise am stärkeren Einsatz von Wärmepumpen und deren relativ niedrigen Endenergieverbrauch. Die Ursachen des relativ ähnlichen Verlauf des Endenergieverbrauchs bei den übrigen drei Optimierungszielen werden klarer bei Blick auf Tab. 6.19. Obwohl die durchschnittliche Heizlast für renovierte Gebäude im Vergleich zu „minimiere monetäre Kosten“ bei Anwendung der anderen Optimierungsziele sinkt (insbesondere für „minimiere Treibhausgasemissionen“ und „minimiere Energieverbrauch“), gilt das nicht in diesem Ausmaß für die durchschnittliche Heizlast aller Gebäude. Das liegt daran, dass die durchschnittliche Heizlast für nicht renovierte Gebäude unter „minimiere monetäre Kosten“ den niedrigsten Wert aufweist. Im Fall „minimiere monetäre Kosten“ werden also in stärkerem Maß zunächst die thermisch schlechtesten Gebäude saniert, weshalb die durchschnittliche Heizlast für die noch nicht sanierten Gebäude geringer ausfällt als in den anderen Fällen. In diesen Fällen werden zwar Gebäude mit höherer Ambitioniertheit saniert, aber die insgesamt pro Jahr zulässigen Sanierungen<sup>77</sup> werden gleichmäßiger auf alle Gebäudesegmente aufgeteilt (und nicht nur auf die thermisch schlechtesten).

Tab. 6.19: Durchschnittliche Heizlast für Gebäude nach Renovierungszustand im Jahr 2020

	durchschnittl. Heizlast im Jahr 2020 ( $W/m^2$ BGF)			
	min. mon. Kosten	min. soz. Kosten	min. THG-Emissionen	min. Energieverbr.
nicht renovierte Geb.	1,93	1,94	2,10	2,06
renovierte Gebäude	1,46	1,37	0,99	0,94
alle Gebäude	1,81	1,80	1,81	1,74

<sup>77</sup> Die maximal insgesamt pro Jahr zulässigen Sanierungen sind durch die maximalen Austauschraten festgelegt (siehe Kap. 6.2.1)

## Kumulierte Kosten und Treibhausgasemissionen

Tabelle 6.20 bietet eine Übersicht über während der Periode 2006-2020 kumulierte Investitions- und laufende Kosten (monetäre Kosten, externe Kosten), über kumulierte Treibhausgasemissionen sowie über Kosten für die Einsparung von Treibhausgasemissionen.

Tab. 6.20: Überblick über kumulierte Kosten und Treibhausgasemissionen sowie über Kosten für die Einsparung von Treibhausgasemissionen, Periode 2006 - 2020

		<i>minimiere monetäre Kosten</i>	<i>minimiere soziale Kosten</i>	<i>minimiere Treibhausgasemissionen</i>	<i>minimiere Energieverbrauch</i>
<i>monetäre Kosten</i>					
Investition	Mrd. EUR	4,67	5,97	13,17	15,01
laufender Betrieb	Mrd. EUR	47,05	45,63	44,56	42,69
Summe	Mrd. EUR	51,71	51,60	57,74	57,70
<i>externe Kosten</i>					
Investition	Mrd. EUR	0,07	0,10	0,21	0,28
laufender Betrieb	Mrd. EUR	14,83	14,23	13,31	13,26
Summe	Mrd. EUR	14,90	14,33	13,52	13,54
<i>Treibhausgasemissionen</i>					
Investition	Mt	0,86	1,27	2,67	3,62
laufender Betrieb	Mt	193,27	176,01	156,38	169,48
Summe	Mt	194,13	177,28	159,06	173,10
Delta Investitionskosten / Delta THG-Em. (Referenz = „min. mon. Kosten)	EUR/t		77,6	242,6	491,8

Alle kumulierten Kosten (außer externe Kosten) sind diskontiert, es wird also der Barwert berechnet. Kumulierte Investitionskosten sind darüberhinaus noch korrigiert, der Anteil der Investition, der über das Ende der Simulationsperiode hinausgeht, wird abgezogen<sup>78</sup>. Kumulierte Investitionskosten sind deutlich niedriger als kumulierte laufende Kosten<sup>79</sup>. Während kumulierte laufende Kosten in einem ähnlichen Bereich liegen, gibt es deutliche Unterschiede bei kumulierten Investitionskosten. Kumulierte Investitionskosten im Fall „minimiere Treibhausgasemissionen“ sind um den Faktor 2,82, im Fall „minimiere

<sup>78</sup> Falls beispielsweise die Investition im Jahr 2010 erfolgt, das Ende der Simulationsperiode 2020 ist, und die Lebensdauer der Investition 30 Jahre beträgt, wird nur ein Drittel der Investitionskosten berücksichtigt.

<sup>79</sup> Das liegt zum Teil auch an diesem Berechnungsmodus, würde nicht diskontiert und nicht korrigiert, wäre der relative Anteil der Investitionskosten höher. Beide Berechnungsschritte sind aber plausibel begründbar. Die Höhe der Diskontrate und die angenommenen Lebensdauern beeinflussen natürlich die Höhe der kumulierten Investitionskosten.

Energieverbrauch“ um den Faktor 3,2 höher als für den Fall „minimiere monetäre Kosten“.

Kumulierte externe Kosten<sup>80</sup> für den laufenden Betrieb sind in der Größenordnung eines Drittels (33-35%) der kumulierten laufenden monetären Kosten, während kumulierte externe Kosten der Investitionen sehr gering sind im Vergleich zu monetären Investitionskosten (< 2%). Der Investitionsanteil an den gesamten externen Kosten ist sehr gering, dies gilt auch für den Investitionsanteil der gesamten Treibhausgasemissionen. Treibhausgasemissionen und externe Kosten, die aus dem Betrieb der Heiz- und Warmwassersysteme resultieren, überwiegen also deutlich die „grauen“ Treibhausgasemissionen und externen Kosten.

Kumulierte Treibhausgasemissionen werden in den Fällen „minimiere soziale Kosten“, „minimiere Treibhausgasemissionen“ und „minimiere Energieverbrauch“ im Vergleich zu „minimiere monetäre Kosten“ reduziert. Jede zusätzliche eingesparte Tonne an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (bezogen auf die Emissionen im Fall „minimiere monetäre Kosten“ als Referenz) kostet im Fall „minimiere soziale Kosten“ 77,6 Euro, im Fall „minimiere Treibhausgasemissionen“ 242,6 Euro, im Fall „minimiere Energieverbrauch“ 491,8 Euro. Die unter der Annahme „minimiere soziale Kosten“ gewählten Maßnahmen sind also bezogen auf die eingesparten Treibhausgasemissionen deutlich kostengünstiger (um den Faktor 3,13 im Vergleich zu „minimiere Treibhausgasemissionen“, um den Faktor 6,34 im Vergleich zu „minimiere Energieverbrauch“). Die unter den Annahme „minimiere Treibhausgasemissionen“ und „minimiere Energieverbrauch“ gewählten Maßnahmen zur Treibhausgasreduktion sind also relativ teuer, dies gilt insbesondere für Solar-Kombisysteme.

---

<sup>80</sup> Die Werte für externe Kosten sind stark abhängig von der diesbezüglichen Bewertung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, siehe auch Kapitel 5.3.2.

### 6.2.3. Variation von Rahmenbedingungen

Die Sensitivität des Modells bezüglich Modifikationen der Werte von

- Austauschraten
- Energieträgerpreise
- Zinssätze
- Höhe von externen Kosten

werden in diesem Abschnitt diskutiert.

#### 6.2.3.1 Variation der Austauschraten

Im Vergleich zum Referenz-Szenario werden 4 verschiedene Varianten der Höhe der maximalen Austauschraten definiert, zwei mit höheren Austauschraten, zwei mit niedrigeren Austauschraten (siehe Tabelle 6.21).

Tab. 6.21: Übersicht über Varianten bzgl. Höhe der maximalen Austauschraten

	Referenz-Szenario	höhere Raten 1	höhere Raten 2	geringere Raten 1	geringere Raten 2
Dämmung Außenwand	1,5%	2,25%	3%	1,25%	1%
Dämmung ob. Geschoßdecke	1,5%	2,25%	3%	1,25%	1%
Dämmung Kellerdecke / Fußboden	1,5%	2,25%	3%	1,25%	1%
Dämmung Außenw. und Fenstertausch	1,2%	1,8%	2,4%	1%	0,8%
Dämm-Maßnahmen, gesamt	2%	3%	4%	1,6%	1,2%
Verbesserung gesamte Gebäudehülle	1%	1,5%	2%	0,8%	0,6%
Generalsanierung (Verbesserung gesamte Gebäudehülle + neues Heiz-/WW-system)	0,8%	1,2%	1,6%	0,65%	0,5%
Fenstertausch	1,8%	2,7%	3,6%	1,5%	1,2%
Tausch Heizsystem	5%	6%	7%	5%	4,5%
Tausch Warmwasserbereitung	5%	6%	7%	5%	4,5%

Unter der Bedingung, dass die maximalen Austauschraten für Maßnahmen an der Gebäudehülle im Vergleich zum Referenz-Szenario verdoppelt werden (Variante „höhere Austauschraten 2“) und „minimiere monetäre Kosten“ gewählt wird, verringern sich die Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 um 9,5% relativ zum Referenz-Szenario (Abb. 6.16). Im Fall einer Verringerung der Austauschraten gemäß Variante „niedrigere Austauschraten 2“ erhöhen sich die Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 um 5,7% relativ zum Referenz-Szenario.

Unter Anwendung des Zieles „minimiere soziale Kosten“ ergeben sich grundsätzlich ähnliche Verläufe, wobei die relativen Abweichungen etwas größer sind (12% geringere Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 bei Variante „höhere Austauschraten 2“, 6,6%

höhere Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 bei Variante „niedrigere Austauschraten 2“, siehe auch Tab. 6.22).

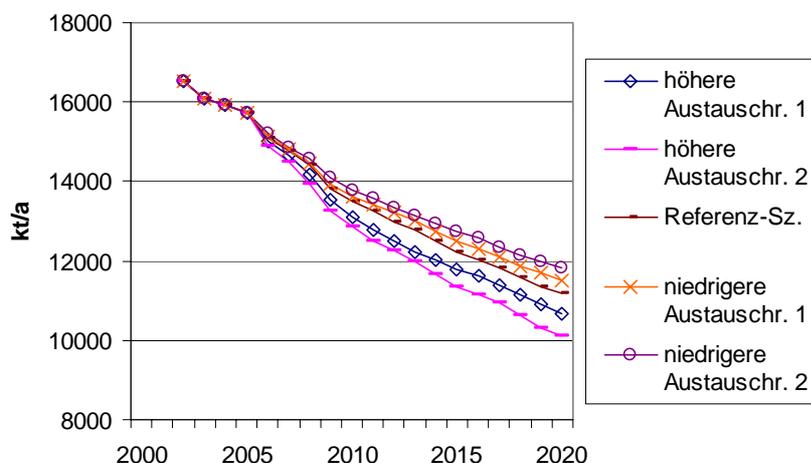


Abb. 6.16: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente, in kt/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand, 2002 – 2020, Vergleich von Varianten mit unterschiedlichen maximalen Austauschraten, minimiere monetäre Kosten

Tab. 6.22: Vergleich der Werte für das Jahr 2020 zwischen Referenz-Szenario des jeweiligen Optimierungskriteriums und Szenarien mit geänderten Austauschraten

	minimiere monetäre Kosten		minimiere soziale Kosten	
	höhere Austausch. 2	niedr. Austausch. 2	höhere Austausch. 2	niedr. Austausch. 2
Treibhausgasemissionen	- 9,5%	+ 5,7%	- 12%	+ 6,6%
Energieverbrauch	- 11,6%	+ 5,7%	- 13,2%	+ 4,9%
durchschnittl. Heizlast	- 12,3 %	+ 5,7%	- 12%	+ 6,1%

### 6.2.3.2 Variation der Energieträgerpreise

Tab. 6.23: Jährliche Preissteigerungsraten (%/Jahr) pro Energieträger, nach Preis-Variante

	Referenz-Sz.	hohe Preise 1	hohe Preise 2	niedrige Preise
Heizöl	1%	2%	2,5%	0,5%
Erdgas	0,8%	1,6%	2%	0,4%
Kohle/Koks	0,8%	1,6%	2%	0,4%
Strom	0,6%	1,2%	1,5%	0,3%
Fernwärme	0,5%	1%	1,25%	0,25%
Fernwärme Biomasse	0,45%	0,9%	1,2%	0,225%
Holzpellets	0,8%	1,6%	2%	0,4%
Hackschnitzel	0,4%	0,8%	1%	0,2%
Stückholz	0,3%	0,6%	0,8%	0,15%

Drei verschiedene Varianten für Preise von Energieträgern werden untersucht (zwei Varianten mit höheren Preisen, eine mit niedrigeren Preisen), die sich bezüglich der jährlichen Preissteigerungsraten unterscheiden (siehe Tab. 6.23)<sup>81</sup>.

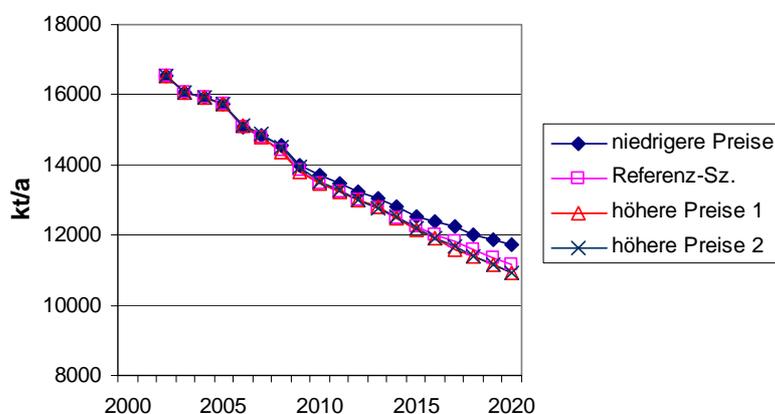


Abb. 6.17: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente, in kt/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand, 2002 – 2020, Vergleich von Varianten mit unterschiedlichen Preisniveaus, minimiere monetäre Kosten

Der Einfluß der verschiedenen Preisniveaus auf den Verlauf der Treibhausgasemissionen ist gering (siehe Abb. 6.17), etwas stärker ausgeprägt ist der Einfluß des niedrigen Preisniveaus (+ 4,81% mehr Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 verglichen zum Referenz-Szenario). Energieverbrauch und durchschnittliche Heizlast werden in noch geringerem Ausmaß von den Unterschieden in den Preisniveaus beeinflusst (siehe Tab. 6.24).

Tab. 6.24: Vergleich der Werte für das Jahr 2020 zwischen „minimiere monetäre Kosten, Referenz-Szenario“ und Szenarien mit geänderten Preisniveaus

	<i>höhere Preise 1</i>	<i>höhere Preise 2</i>	<i>niedrigere Preise</i>
Treibhausgas-emissionen	- 2,28%	- 2,41%	+ 4,81%
Energieverbrauch	- 1,64%	- 1,18%	+ 3,08%
durchschnittl. Heizlast	- 0,18%	- 0,05%	+ 0,68%

Die unterschiedlichen Preisniveaus beeinflussen die Wahl und damit die Verbreitung von Energieträgern. Erdgas und Erdöl wird in höherem Ausmaß, Stückholz und Wärmepumpen in geringerem Ausmaß unter den Vorgaben des Niedrigpreis-Szenarios eingesetzt im Vergleich zum Referenz-Szenario (Tab. 6.25). Für die Szenarien mit

<sup>81</sup> Im Niedrigpreis-Szenario gehen die Preise im Jahr 2007 wieder leicht zurück (etwa Niveau 2005) und steigen anschließend mit der in Tab. 6.10 angegebenen Steigerungsrate. In den anderen Preis-Szenarien steigen die Preise ab 2007 mit der angegebenen Rate.

höheren Preisen sind diese Relationen umgekehrt, wie bereits bei obigen Kriterien sind allerdings auch hier die Abweichungen zum Referenz-Szenario geringer.

Tab. 6.25: Relativer Anteil (an Wohneinheiten) von verschiedenen Energieträgern im Jahr 2020, Vergleich des Referenz-Szenarios (minimiere mon. Kosten) mit den Szenarien mit geänderten Preisniveaus

	Referenz-Sz.	höhere Preise 1	höhere Preise 2	niedrigere Preise
Heizöl	4,14%	3,86%	3,92%	4,71%
Erdgas	50,83%	48,92%	48,35%	54,39%
Stückholz	6,55%	7,09%	7,32%	5,77%
Wärmepumpen	14,26%	15,66%	15,51%	12,18%

### 6.2.3.3 Kombination von veränderten Austauschraten und Energiepreisniveaus

Wenn man die bisher beschriebenen Varianten bezüglich Austauschraten und Energiepreisniveaus gemeinsam betrachtet, so sollten sich die maximalen Abweichungen in Relation zum Referenz-Szenario in den Fällen

- niedrige Austauschraten 2, niedrigere Energiepreise
  - höhere Austauschraten 2, höhere Energiepreise 2
- ergeben.

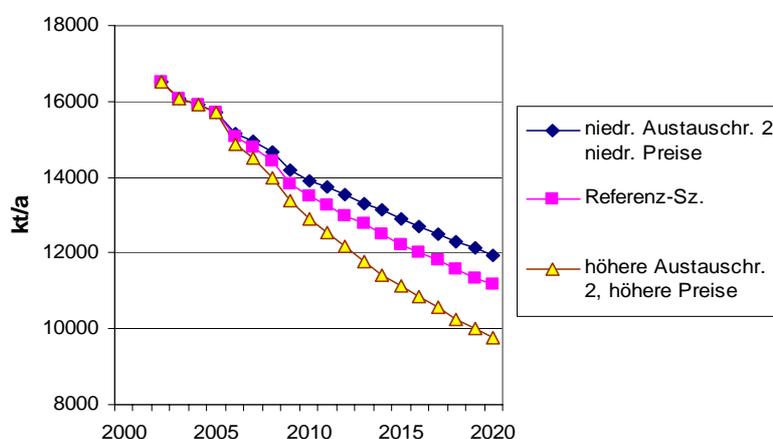


Abb. 6.18: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente, in kt/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand, 2002 – 2020, Vergleich verschiedener Varianten, minimiere monetäre Kosten

Tatsächlich sind die Unterschiede zum Referenz-Szenario noch ein wenig stärker ausgeprägt als bei alleiniger Anwendung der Variation der Austauschraten. Unter der Variante „niedrige Austauschraten 2, niedrigere Energiepreise“ erhöhen sich die Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 um 6,7% relativ zum Referenz-Szenario, unter „höhere Austauschraten 2, höhere Energiepreise 2“ verringern sich die Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 um 12,6% relativ zum Referenz-Szenario (Abb.

6.18). Werden die Jahre 2002 und 2020 verglichen, ergibt sich in erstem Fall eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 27,9%, in zweitem Fall eine Reduktion von 40,9%.

Diese beiden Werte (27,9%, 40,9%) geben also eine Bandbreite für mögliche Reduktionen an Treibhausgasemissionen bei Anwendung von „minimiere monetäre Kosten“ an unter zusätzlicher Variation von Austauschraten und Energiepreinsniveaus.

#### 6.2.3.4 Variation der Zinssätze

Der Zinssatz, der der Berechnung der Annuität der Investition zugrundeliegt, beträgt im Referenz-Szenario 4%. Im folgenden werden Abweichungen nach oben (5%, 6%) sowie nach unten (2%, 3%) untersucht.

Je niedriger der Zinssatz, desto niedriger die Annuität der Investition, desto eher werden einerseits Technologien mit zwar hohen Investitionskosten, aber niedrigeren laufenden Kosten selektiert, andererseits sollten tendenziell mehr Maßnahmen durchgeführt werden, da die Gesamtsumme aus Annuität der Investition und neuen laufenden Kosten eher kleiner als bestehende laufende Kosten werden können (siehe auch Kap. 5.1.2 zur Erläuterung des Entscheidungsalgorithmus). Bei höheren Zinssätzen gelten die umgekehrten Zusammenhänge.

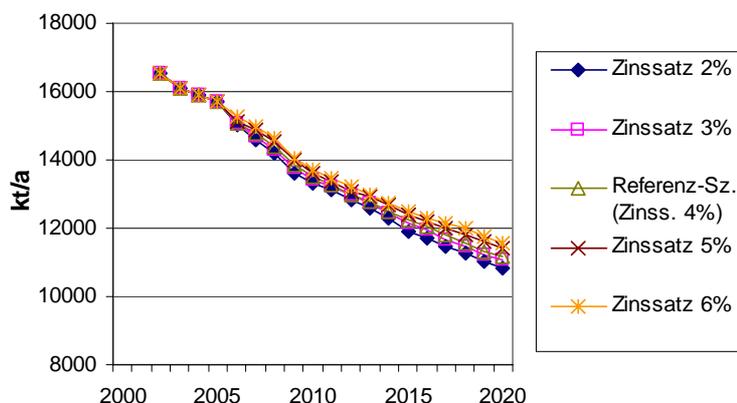


Abb. 6.19: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente, in kt/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand, 2002 – 2020, Vergleich verschiedener Zinsraten, minimiere monetäre Kosten

Wie Abb. 6.19 zeigt, übt die Variation der Zinssätze keinen besonders starken Einfluß auf die Höhe der Treibhausgasemissionen aus. Die Werte für 2020 weichen vom Referenzszenario zwischen –3% (Zinssatz 2%) und +3,4% (Zinssatz 6%) ab. Mit steigendem Zinssatz steigen die Treibhausgasemissionen an, wie sich ebenfalls aus Abb. 6.19 ablesen lässt.

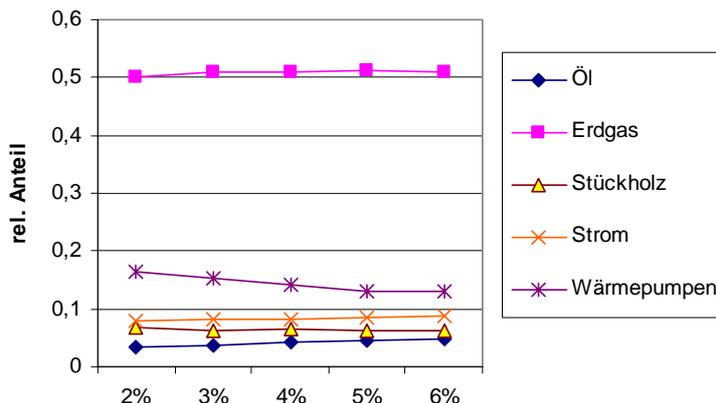


Abb. 6.20: Relative Anteile (an Wohneinheiten) verschiedener Energieträger für Raumwärme und Warmwasserbereitung im Jahr 2020, Vergleich verschiedener Zinssätze, minimiere monetäre Kosten

Bezüglich der Abhängigkeit der Verbreitung verschiedener Energieträger von der Höhe des Zinssatzes, läßt sich gemäß Abb. 6.20 feststellen, dass der Anteil von Erdöl und Strom im Jahr 2020 mit höherem Zinssatz zunimmt, während der von Wärmepumpen zurückgeht. Der Anteil von Erdgas steigt leicht an bis zu einem Zinssatz von 5%, derjenige von Stückholz läßt keine klare Tendenz erkennen.

### 6.2.3.5 Höhe der externen Kosten

Wie bereits in Kap. 5.3.2 näher ausgeführt wurde, ist die Bestimmung von externen Kosten mit großen Unsicherheiten behaftet. Dieser Umstand wird hier durch Analyse der Effekte einer Erhöhung der externen Kosten um den Faktor 2 sowie um den Faktor 3 berücksichtigt. Es wird also der Fall berücksichtigt, dass externe Kosten im Referenz-Szenario systematisch unterschätzt werden könnten.

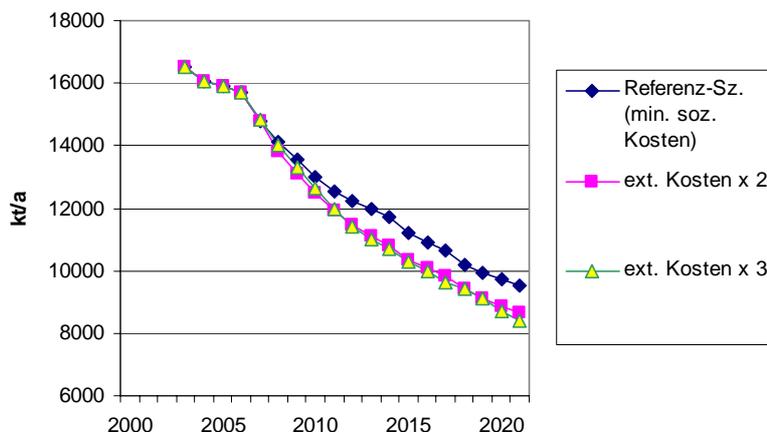


Abb. 6.21: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente, in kt/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand, 2002 – 2020, Vergleich verschiedener Höhe der externen Kosten, minimiere soziale Kosten

Die Anhebung der externen Kosten um den Faktor 2 hat einen deutlich reduzierenden Einfluß auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen (- 9,3% im Jahr 2020 verglichen mit dem Referenz-Szenario, minimiere soziale Kosten), eine weitere Steigerung vom Faktor 2 auf den Faktor 3 hat einen geringen zusätzlichen Effekt (- 11,5% im Jahr 2020 verglichen mit dem Referenz-Szenario, siehe Abb. 6.21).

Die Höhe der externen Kosten hat einen starken Einfluß auf die Verbreitung verschiedener Energieträger, wie Abb. 6.22 veranschaulicht. Während Erdgas und dezentraler Mix bei Anhebung der externen Kosten rückläufig sind, steigt die Verbreitung von Wärmepumpen, Fernwärme Wien und Holzpellets an.

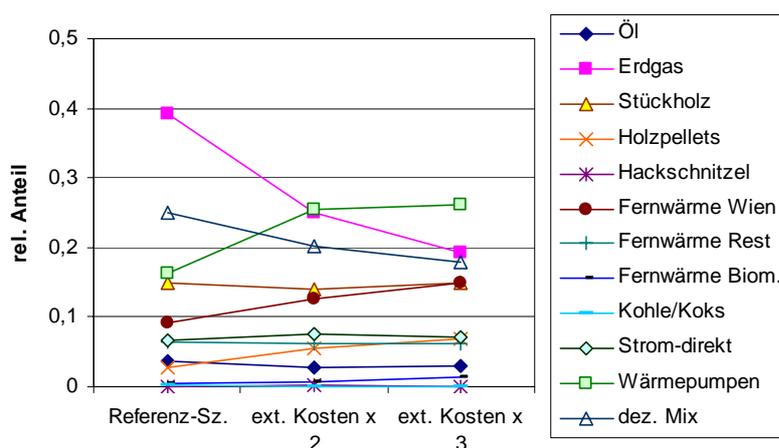


Abb. 6.22: Relative Anteile (an Wohneinheiten) verschiedener Energieträger für Raumwärme im Jahr 2020, Vergleich verschiedener Höhe der externen Kosten, minimiere soziale Kosten

## 7. Ergebnisse II - Berücksichtigung energiepolitischer Instrumente

Nachdem in Kapitel 6 die Modellergebnisse ohne Berücksichtigung energiepolitischer Eingriffe dargestellt wurden, sollen in diesem Kapitel schwerpunktmässig Wirkungen energiepolitischer Instrumente diskutiert werden. Zwei Gruppen von energiepolitischen Instrumenten werden betrachtet: Förderungen (Investitionszuschüsse) und CO<sub>2</sub>-Steuern. Bei den Fördermodellen wiederum werden drei Sub-Typen herausgegriffen: Förderung CO<sub>2</sub>-armer Heizsysteme, Förderung von Maßnahmen an der Gebäudehülle und kombinierte Förderungen (Heizsysteme + Gebäudehülle).

### 7.1. Fördermodelle

#### 7.1.1. Förderung CO<sub>2</sub>-armer Heizsysteme

Die Effekte von drei verschiedenen Förderszenarien werden in diesem Teil analysiert. Förderungen (= Investitionszuschüsse) werden hier für Heizsysteme mit relativ niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen gewährt in drei verschiedenen Varianten, bei denen die Zuschußhöhe variiert wird (niedrige, mittlere, hohe Förderung).

Aus Tabelle 7.1 ist die Höhe der jeweiligen Zuschüsse in den drei verschiedenen Förderszenarien ersichtlich (prozentueller Anteil der Investitionskosten, der als öffentlicher Zuschuß gewährt wird und nicht vom Konsumenten/Käufer bezahlt werden muss)<sup>82</sup>.

Tabelle 7.1: Spezifikation der Förder-Szenarien für Heizsysteme, prozentuelle Werte der öffentlichen Investitionszuschüsse

	<i>niedrige Förderung</i>	<i>mittlere Förderung</i>	<i>hohe Förderung</i>
Stückholzkessel	15%	26,3%	37,5%
Hackschnitzelkessel	20%	35%	50%
Pelletsessel	20%	35%	50%
Pellets-Einzelofen	10%	17,5%	25%
Pellets-Etagenofen	10%	17,5%	25%
Gas-Brennwertkessel	7,5%	13,1%	18,8%
Fernwärme (ohne Biomasse)	7,5%	13,1%	18,8%
Fernwärme Biomasse	15%	26,3%	37,5%
Wärmepumpe Luft/Wasser	5%	7,5%	10%
Wärmepumpe Hzg. sonst.	15%	26,3%	37,5%
Wärmepumpe Warmwasser	10%	17,5%	25%
Solar Warmwasser	20%	35%	50%
Solar Kombisystem	20%	35%	50%

<sup>82</sup> Die Förderhöhen im niedrigen Schema weisen eine ungefähre Ähnlichkeit mit dem Status Quo von Förderungen in dieser Kategorie in Österreich auf. Systeme mit höheren Investitionskosten und/oder geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen werden mit einem höheren Satz gefördert.

Mit dem hohen Förderschema werden Treibhausgaseinsparungen erreicht, die in etwa denen von “minimiere soziale Kosten, Referenz-Szenario” entsprechen (Abb. 7.1), mit dem niedrigen und mittleren Förderschema liegen die Treibhausgaseinsparungen zwischen “minimiere monetäre Kosten, Referenz-Szenario” und “miniere soziale Kosten (Reduktion im Jahr 2020 von 5,5% bzw. 8,9% gegenüber “minimiere monetäre Kosten”).

Im Fall des hohen Förderschemas wird ein insgesamt deutlich höheres Investitionsvolumen (38% mehr im Vergleich zum Fall ohne Förderung) ausgelöst, im mittleren und niedrigen Förderschema sind die zusätzlichen Investitionsvolumina weniger ausgeprägt (siehe Abb. 7.2).

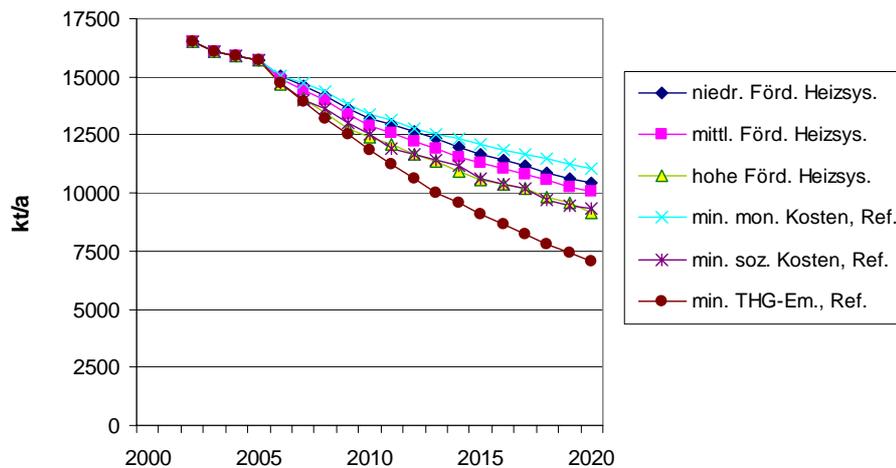


Abb. 7.1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente, in kt/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand, 2002 – 2020, Vergleich verschiedener Förderszenarien mit Referenz-Szenarien

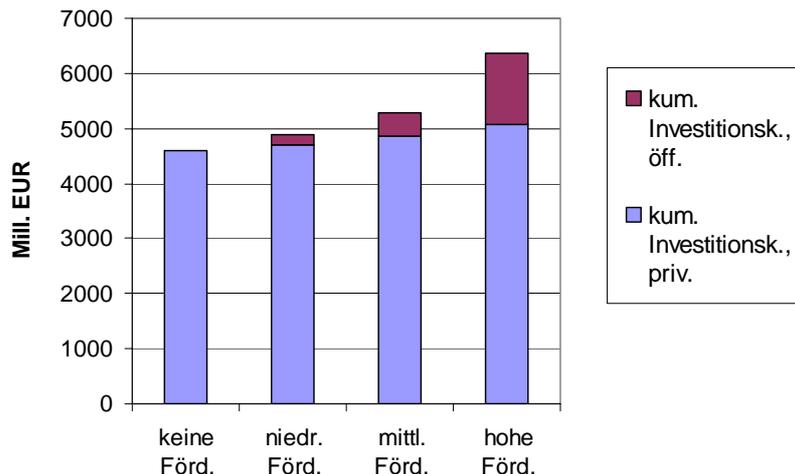


Abb. 7.2: Vergleich der Investitionskosten (öffentlich und privat), über die Periode 2006 – 2020 kumuliert

Über die Periode 2006 – 2020 kumulierte Investitionsvolumina (privat und öffentlich), die Menge an eingesparten Treibhausgasemissionen (verglichen mit dem Referenzfall ohne Förderung) und Effizienzen der Förderungen sind in Tabelle 7.2 aufgelistet.

Die Effizienz einer Förderung wird definiert (gemäß Kranzl et al. 2005) als das Verhältnis von eingesparten Treibhausgasemissionen zum Gesamtvolumen an eingesetztem öffentlichen Geld. Als Vergleichsbasis dient der Fall, dass keine Förderungen vergeben werden.

Tabelle 7.2: Kumulierte Investitionskosten (privat und öffentlich), kumulierte eingesparte Treibhausgasemissionen und Effizienzen der verschiedenen Förderschemata, Periode 2006-2020

	<i>kum. Invest. kosten, privat</i>	<i>kum. Invest. kosten, öffentl.</i>	<i>kumulierte THG-Em.</i>	<i>eingesparte THG-Em.</i>	<i>relative Red. an THG-Em.</i>	<i>Förder-volumen / eingesp. THG-Em.</i>	<i>Effizienz</i>
	Mrd. EUR	Mrd. EUR	Mt	Mt	%	EUR/t	kg/EUR
ohne Förderung	4,59	0,00	192,19	-	-	-	-
niedrige Förderung	4,70	0,18	187,69	4,50	2,34%	40,8	24,54
mittlere Förderung	4,86	0,42	183,03	9,16	4,77%	46,3	21,59
hohe Förderung	5,08	1,30	174,45	17,74	9,23%	73,3	13,64

Während die Effizienz mit steigender Höhe einer Förderung sinkt, wächst die Gesamtmenge an eingesparten Treibhausgasemissionen. Wie aus Tab. 7.2 zu entnehmen ist, bewegen sich die Werte für die Effizienz zwischen 13,6 kg/EUR (hohe Förderung) und 24,5 kg/EUR (niedrige Förderung), die eingesparten Treibhausgasemissionen über die Periode 2006-2020 reichen von 4,5 Mt bis 17,7 Mt. Im Fall der hohen Förderung werden also 3,9 mal mehr Treibhausgasemissionen eingespart, aber zu um etwa 80% höheren öffentlichen Zuschüssen pro eingesparter Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent (siehe auch Abb. 7.3).

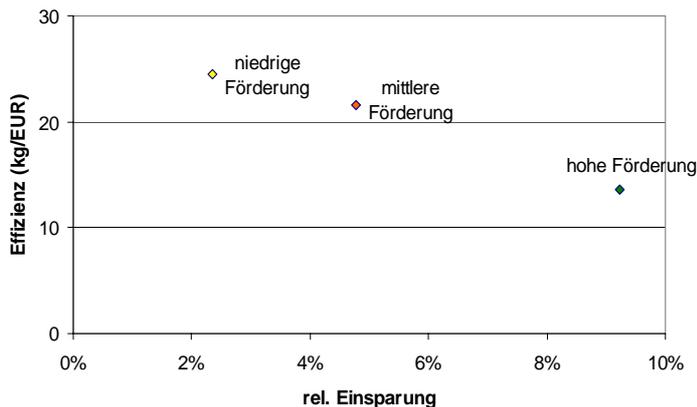


Abb. 7.3: Effizienz und relative Einsparung (im Vergleich zu “minimiere monetäre Kosten. Referenz-Szenario) der verschiedenen Förderschemata

Die Änderungen im Energieträgermix für Raumwärme im Jahr 2020 zeigt Abb. 7.4. Während hauptsächlich der Anteil von Erdgas in Relation zum Referenz-Szenario ohne Förderung zurückgeht, steigen die Anteile von Stückholz und Holzpellets<sup>83</sup> (erst in der mittleren und hohen Förder-Variante). Der Anteil von Wärmepumpen steigt bei niedriger und mittlerer Förderung, fällt aber bei hoher Förderung wieder.

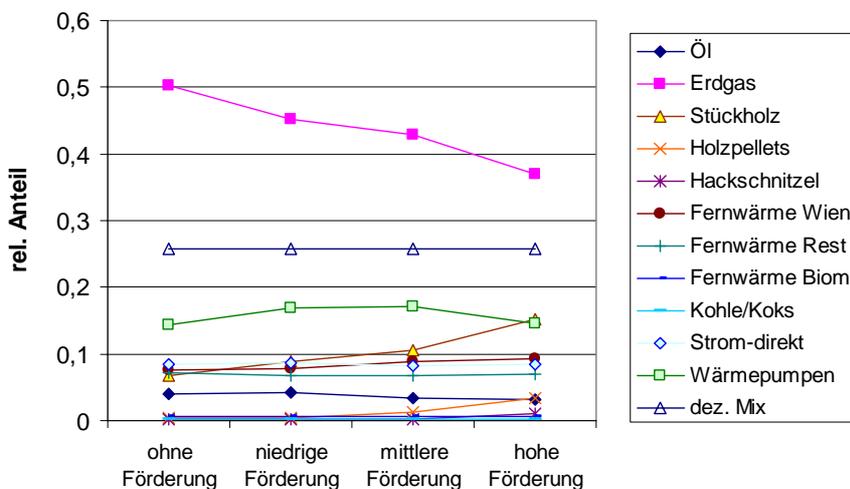


Abb. 7.4: Relative Anteile (an Wohneinheiten) verschiedener Energieträger für Raumwärme im Jahr 2020, Vergleich der verschiedenen Förderszenarien und des Referenz-Szenarios (ohne Förderung)

<sup>83</sup> Der Anstieg des Einsatzes von Holzpellets findet in Mehrfamilienhäusern statt (nicht aus Abb. 7.4 ersichtlich).

### 7.1.2. Förderung von Maßnahmen an der Gebäudehülle

Analog zu Kap. 7.1.1 werden auch hier drei Förderszenarien mit unterschiedlicher Förderhöhe festgelegt (Tab. 7.3). Die Förderungen werden für Dämmung und für Fenstertausch verwendet.

Table 7.3: Spezifikation der Förder-Szenarien für gebäudeseitige Maßnahmen, prozentuelle Werte der öffentlichen Investitionszuschüsse

		niedr. Förderung	mittl. Förderung	hohe Förderung
Dämmung Fassade, Decke, Keller	Dämmstoff			
	EPS, Stein-, Glaswolle	15%	30%	45%
	alle übrigen Dämmstoffe	25%	40%	60%
Fenster	PVC-Rahmen	15%	30%	45%
	Holzrahmen	25%	40%	60%

Bei Gewährung von Investitionszuschüssen für Maßnahmen an der Gebäudehülle werden einerseits etwas höhere Dämmdicken und eventuell andere Dämmstoffe oder Fenstertypen gewählt<sup>84</sup>, andererseits erhöht sich auch die Gesamtzahl an Verbesserungsmaßnahmen an der Gebäudehülle (vor der Berücksichtigung von Restriktionen bezüglich Austauschraten), Maßnahmen zur Wärmedämmung oder Fenstertausch werden also relativ zum Fall ohne Förderung öfter ausgewählt.

Tab. 7.4: Austauschraten (vor Reduktion) im Vergleich zum Referenz-Szenario und Korrekturfaktoren für maximale Austauschraten

	Erhöhung Austauschraten (vor Reduktion) im Vergleich zu Referenz-Szenario			Korrekturfaktor für maximale Austauschraten		
	niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch
Gesamtanzahl Dämm-Maßnahmen	7,4%	14%	23%	1,074	1,14	1,2
Dämmung Fassade	3,4%	7%	25%	1,033	1,06	1,2
Dämmung ob. Geschoßdecke	15,2%	36%	100%	1,15	1,3	1,65
Dämmung Kellerdecke	9,5%	43%	167%	1,09	1,4	1,75
Dämmung Fassade und Fenstertausch	3,8%	9%	62%	1,035	1,09	1,5
Verbesserung gesamte Gebäudehülle	8,0%	35%	150%	1,08	1,3	1,75
Generalsanierung	1,8%	204%	1014%	1,018	1,15	1,2
Fenstertausch	1,2%	1,8%	32%	1,011	1,017	1,3

<sup>84</sup> EPS, Stein- und Glaswolle sowie PVC-Fenster haben niedrigere Fördersätze.

Tab. 7.4 bietet eine Übersicht darüber, um wieviel für die verschiedenen Förder-Szenarien Austauschraten (vor Reduktion aufgrund von Restriktionen) höher sind im Vergleich zum Referenzfall und um welchen Faktor die maximalen Austauschraten in einem jeweils zweiten Simulationslauf korrigiert werden. Die Korrekturfaktoren spiegeln teilweise die relativen Erhöhungen in den Austauschraten wider, teilweise sind sie geringer angesetzt (insbesondere im Schema „hohe Förderung“).

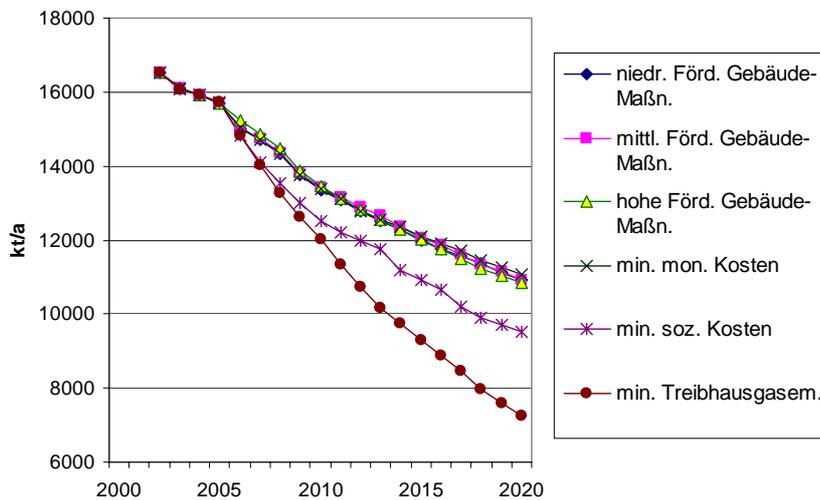


Abb. 7.5: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente, in kt/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand, 2002 – 2020, Verschiedene Szenarien mit Förderungen für gebäuseseitige Maßnahmen und Referenz-Szenarien

Unabhängig von der Höhe der Förderungen wirken sich diese nur sehr geringfügig auf die Höhe der Treibhausgasemissionen für Raumheizung und Warmwasserbereitung im Zeitverlauf aus (Abb. 7.5). Etwas höhere relative Reduktionen (im Vergleich zum Referenzfall ohne Förderungen) sind allerdings beim Energieverbrauch und bei der durchschnittlichen Heizlast zu verzeichnen (Tab. 7.5); der Energieträgermix wird also etwas CO<sub>2</sub>-intensiver.

Tab. 7.5: Relative Reduktionen (im Vergleich zum Referenzfall ohne Förderungen) von Treibhausgasemissionen, Endenergieverbrauch und durchschnittlicher Heizlast im Jahr 2020

	Relative Reduktion in 2020		
	THG-Emissionen	Energieverbrauch	durchschn. Heizlast
niedrige Förderung	1,19%	1,00%	1,02%
mittlere Förderung	1,21%	2,70%	3,70%
hohe Förderung	2,06%	4,64%	7,62%

Die Verschiebungen beim Energieträgermix im Jahr 2020 sind aus Abb. 7.6 ersichtlich. Während die Anteile von Erdgas und Wärmepumpen (im Vergleich zum Referenzfall ohne Förderungen) zurückgehen, steigt der Anteil der Strom-Direktheizungen (von 8,4% im Referenzfall ohne Förderungen auf 12,2% im Fall des hohen Förderschemas). Wie also

auch hier zu sehen ist, begünstigt die Reduktion bei der Heizlast die Wirtschaftlichkeit von Strom-Direktheizungen (siehe auch Tab. 6.4, Abschnitt 6.1.2).

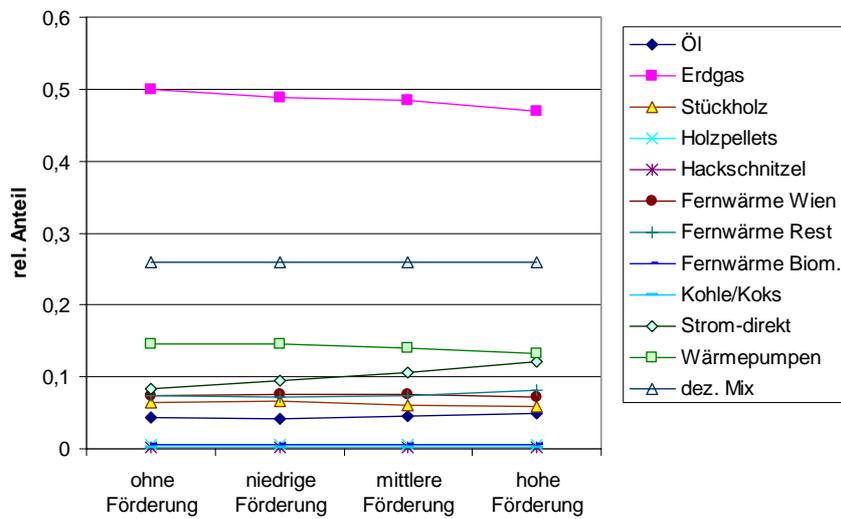


Abb. 7.6: Relative Anteile (an Wohneinheiten) verschiedener Energieträger für Raumwärmeversorgung im Jahr 2020, Vergleich der verschiedenen Förderszenarien und des Referenz-Szenarios (ohne Förderung)

Aufgrund der sehr geringen Treibhausgaseinsparungen im Vergleich zum Referenzfall bei ähnlich hohen öffentlichen Ausgaben im Vergleich zu den Ansätzen, welche CO<sub>2</sub>-arme Heizsysteme fördern, ergeben sich vergleichsweise sehr niedrige Fördereffizienzen.

### 7.1.3. Kombinierte Förderungen (Heizsysteme + Gebäudehülle)

Im folgenden werden die Effekte dargestellt, welche bei Kombination der in Kap. 7.1.1 und 7.1.2 dargestellten Fördermodelle resultieren. Bei kombinierten Förderungen werden also sowohl Heizsysteme mit geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch Verbesserungsmaßnahmen an der Gebäudehülle mit öffentlichen Investitionszuschüssen gefördert.

Analog zu den Vorkapiteln werden auch hier drei Varianten bezüglich Höhe der Förderungen betrachtet. Bei kombinierter Förderung in der niedrigen Variante werden die niedrigen Förderungen für Heizsysteme mit den niedrigen Förderungen für Maßnahmen an der Gebäudehülle kombiniert. Analog werden die Höhen der kombinierten Förderung in der mittleren und hohen Variante definiert (siehe Tab. 7.7).

Tab. 7.6: Spezifikation der Förder-Szenarien für kombinierte Fördermodelle

	<i>niedrige kombinierte Förderung</i>	<i>mittlere kombinierte Förderung</i>	<i>hohe kombinierte Förderung</i>
Heizsysteme	niedrige Sätze (siehe Tab. 7.1)	mittlere Sätze (siehe Tab. 7.1)	hohe Sätze (siehe Tab. 7.1)
Gebäudehülle	niedrige Sätze (siehe Tab. 7.3)	mittlere Sätze (siehe Tab. 7.3)	hohe Sätze (siehe Tab. 7.3)

Analog zur Vorgehensweise bei Bestimmung der Wirkungen von gebäudeseitigen Maßnahmen (Kap. 7.1.2) werden auch hier jeweils in einem zweiten Modell-Lauf die maximalen Austauschraten angepaßt (Tab. 7.7).

Tab. 7.7: Korrekturfaktoren für maximale Austauschraten bei kombinierten Fördermodellen

	<i>Korrekturfaktoren für maximale Austauschraten</i>		
	<i>niedrig</i>	<i>mittel</i>	<i>hoch</i>
Gesamtanzahl Dämm-Maßnahmen	1,06	1,12	1,20
Dämmung Fassade	1,01	1,04	1,22
Dämmung ob. Geschoßdecke	1,12	1,29	1,50
Dämmung Kellerdecke	1,05	1,33	1,75
Dämmung Fassade und Fenstertausch	1,02	1,06	1,40
Verbesserung gesamte Gebäudehülle	1,04	1,20	1,60
Generalsanierung	1	1,30	1,60
Fenstertausch	1	1,01	1,28

Der zeitliche Verlauf der Treibhausgasemissionen bei Anwendung der verschiedenen kombinierten Fördermodelle (Abb. 7.7) ist ähnlich dem Verlauf bei alleiniger Anwendung der Förderung für Heizsysteme (Abb. 7.1).

Im Fall der hohen kombinierten Förderung werden Treibhausgaseinsparungen erreicht, die in etwa denen von “minimiere soziale Kosten, Referenz-Szenario” entsprechen.

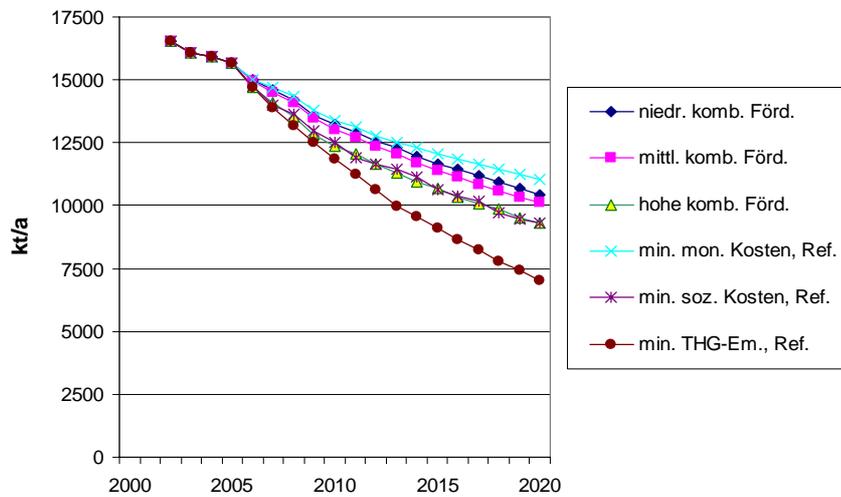


Abb. 7.7: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente, in kt/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand, 2002 – 2020, Verschiedene Szenarien mit kombinierten Förderungen und Referenz-Szenarien

Während die Treibhausgasemissionen mit ansteigender Förderhöhe also merklich sinken, sinken Energieverbrauch und die durchschnittliche Heizlast in geringerem Ausmaß. Die durchschnittliche Heizlast sinkt ähnlich wie bei den Fördermodellen, die nur gebäudeseitige Maßnahmen betreffen (siehe Tab. 7.8, Vergleich mit Tab. 7.5).

Tab. 7.8: Relative Reduktionen (im Vergleich zum Referenzfall ohne Förderungen) von Treibhausgasemissionen, Energieverbrauch und durchschnittlicher Heizlast im Jahr 2020 bei kombinierten Fördermodellen

	Relative Reduktion im Jahr 2020		
	THG-Emissionen	Energieverbrauch	durchschn. Heizlast
niedrige Förderung	5,42%	3,24%	0,48%
mittlere Förderung	8,34%	4,92%	2,70%
hohe Förderung	15,62%	5,99%	6,44%

Die Entwicklung des Mixes an für Raumheizung eingesetzten Energieträgern weist einerseits zu den Förderansätzen, welche ausschließlich Heizsysteme fördern, Ähnlichkeiten auf (Abb. 7.8, Vergleich mit Abb. 7.4), andererseits steigt aber auch analog zu Förderansätzen, welche ausschließlich gebäudeseitige Verbesserungen fördern, der Anteil an Strom-Direktheizungen. Die relativen Anteile von Erdgas sinken mit steigender Förderhöhe, während diejenigen von Stückholz und Holzpellets ansteigen.

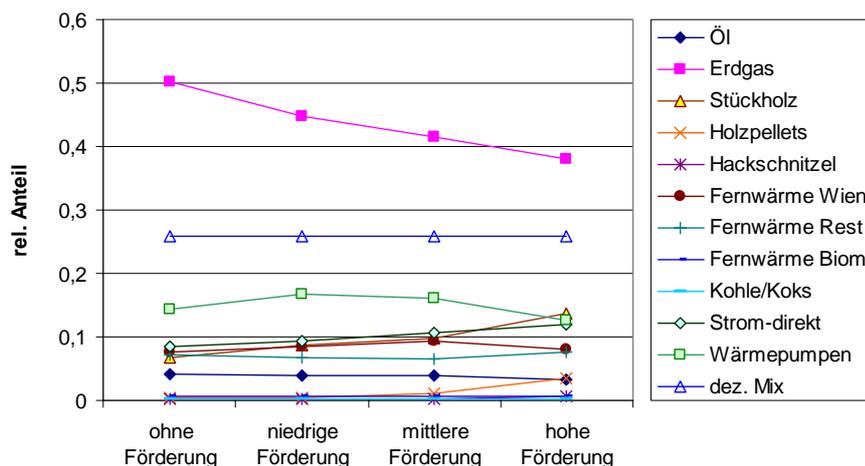


Abb. 7.8: Relative Anteile (an Wohneinheiten) verschiedener Energieträger für Raumwärmeversorgung im Jahr 2020, Vergleich der verschiedenen Förderszenarien und des Referenz-Szenarios (ohne Förderung)

Wie Tab. 7.9 zeigt, sind die kumulierten von der öffentlichen Hand gewährten Zuschüsse höher als bei den Fördervarianten, die entweder nur Heizsysteme oder gebäudeseitige Maßnahmen fördern. Da die eingesparten Treibhausgasemissionen in einem ähnlichen Bereich wie bei den Fördermodellen, welche nur Heizsysteme fördern, liegen, sind die Fördereffizienzen – aufgrund höherer Fördervolumina – entsprechend geringer. Ein Sinken der Effizienz mit steigender Förderhöhe ist auch hier gegeben.

Tabelle 7.9: Kumulierte Investitionskosten (privat und öffentlich), kumulierte eingesparte Treibhausgasemissionen und Effizienzen der verschiedenen kombinierten Fördermodelle, Periode 2006-2020

	kum. Invest. kosten, privat	kum. Invest. kosten, öffentl.	kumulierte THG-Em.	eingesparte THG-Em.	relative Red. an THG-Em.	Förder-volumen / eingesp. THG-Em.	Effizienz
	Mrd. EUR	Mrd. EUR	Mt	Mt	%	EUR/t	kg/EUR
ohne Förderung	4,59	0,00	192,19	-	-	-	-
niedrige Förderung	4,45	0,47	187,57	4,62	2,40%	102,4	9,76
mittlere Förderung	4,22	1,03	184,35	7,84	4,08%	130,8	7,64
hohe Förderung	4,13	2,97	174,62	17,57	9,14%	169,1	5,92

## 7.2. Einführung von CO<sub>2</sub>-Steuern

Im folgenden wird die Wirkung unterschiedlicher Höhen von CO<sub>2</sub>-Steuern untersucht. Der Gehalt an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten des jeweiligen Energieträgers<sup>85</sup> (siehe Tab. A.12.2, Anhang 12) wird mit dem Steuersatz multipliziert und zum Preis des Energieträgers, der sich für das jeweilige Jahr ohne Steueraufschlag ergibt, addiert, wodurch sich der gesamte Preis des Energieträgers ergibt.

Sieben unterschiedliche Steuer-Niveaus (20 EUR/t CO<sub>2</sub>, 30 EUR/t, 40 EUR/t, 50 EUR/t, 75 EUR/t, 100 EUR/t, 150 EUR/t) werden betrachtet. Biomasse-Energieträger (Stückholz, Hackschnitzel, Holzpellets, Fernwärme aus Biomasse) sind von der CO<sub>2</sub>-Steuer ausgenommen. Die Steuersätze sind über den Zeitraum von 2007 bis 2020 als konstant angenommen.

Es ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Höhe des Steuersatzes und Reduktion der Treibhausgasemissionen zu erkennen. Je höher der Steuersatz, desto höher die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Zeitverlauf (Abb. 7.9, Tab. 7.11).

Bei einem Steuersatz von 20 EUR/t liegen die Treibhausgasemissionen etwa in der Mitte zwischen „minimiere monetäre Kosten“ und „minimiere soziale Kosten“, bei einem Satz von 50 EUR/t erfolgt ein zu „minimiere soziale Kosten“ sehr ähnlicher Verlauf. Bei Steuerhöhen von 75 bis 150 EUR/t liegen die Treibhausgasemissionen zwischen „minimiere soziale Kosten“ und „minimiere Treibhausgasemissionen“.

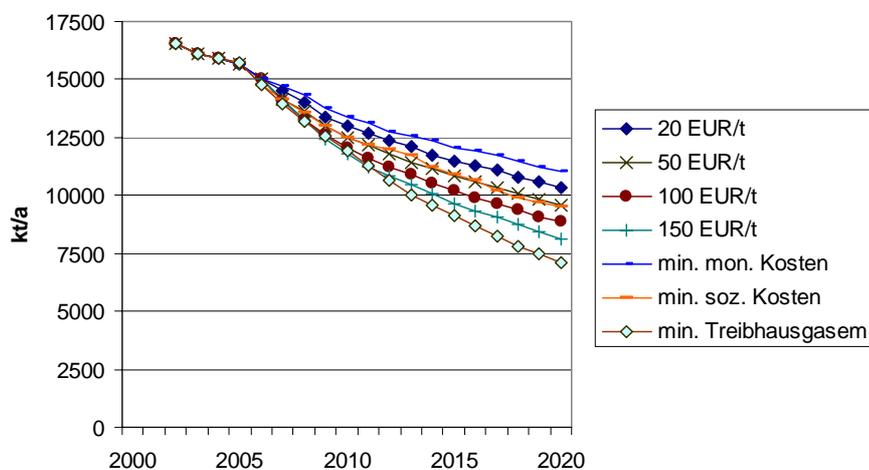


Abb. 7.9: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente, in kt/a) für Raumheizung und Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand, 2002 – 2020, Vergleich verschiedener Varianten von CO<sub>2</sub>-Steuern mit Referenz-Szenarien

Während bis zu einem Steuersatz von 100 EUR/t mit steigendem Steuersatz der Energieverbrauch sinkt, gilt dieser Zusammenhang für einen Steuersatz von 150 EUR/t nicht mehr. In diesem Fall ist der Energieverbrauch im Jahr 2020 etwa gleich hoch wie

<sup>85</sup> Diese Werte beinhalten nicht nur die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung, sondern auch „graue“ Anteile (siehe Kap. 5.3.3.1).

Steuersätzen von 50 oder 75 EUR/t (Tab. 7.11). Im Fall von 150 EUR/t werden also Heizsysteme mit höheren Jahresnutzungsgraden eingesetzt. Die durchschnittliche Heizlast weicht in allen Fällen nur geringfügig vom Referenzfall ab.

Tab. 7.10: Relative Reduktionen (im Vergleich zum Referenzfall ohne CO<sub>2</sub>-Steuer) von Treibhausgasemissionen, Energieverbrauch und durchschnittlicher Heizlast im Jahr 2020

	Relative Reduktion in 2020		
	THG-Emissionen	Energieverbrauch	durchschn. Heizlast
20 EUR/t	6,3%	4,4%	-0,23%
30 EUR/t	8,3%	4,9%	-0,40%
40 EUR/t	10,8%	6,1%	-0,27%
50 EUR/t	13,3%	8,0%	-0,29%
75 EUR/t	15,6%	8,9%	0,48%
100 EUR/t	19,9%	10,3%	1,02%
150 EUR/t	26,8%	7,8%	1,12%

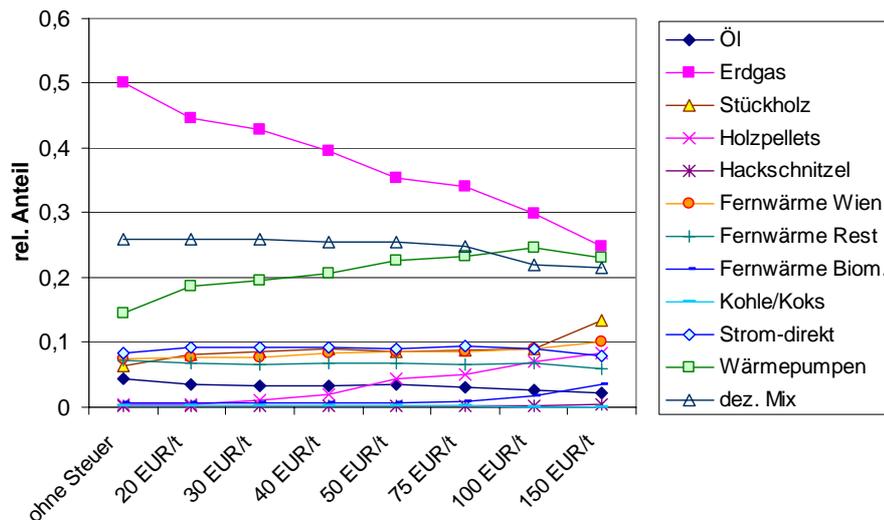


Abb. 7.10: Relative Anteile (an Wohneinheiten) verschiedener Energieträger für Raumwärmeversorgung im Jahr 2020, Vergleich verschiedener Varianten von CO<sub>2</sub>-Steuern mit Referenz-Szenario (ohne Steuer)

Mit steigendem Steuersatz sinkt der relative Anteil von Erdgas im Energiemix für die Raumwärmeversorgung, während insbesondere die Anteile für Wärmepumpen und Holzpellets ansteigen (Abb. 7.10). Bei einem Steuersatz von 150 EUR/t sinkt der Anteil von Wärmepumpen (im Vergleich zu 100 EUR/t), während der Anteil der Stückholzheizungen steigt. Leicht ansteigend sind auch die Anteile von Fernwärme Wien sowie von Fernwärme aus Biomasse (ab 100 EUR/t).

Aufgrund der zum Energiepreis aufgeschlagenen Steuer sind die über die Periode 2006 – 2020 kumulierten laufenden Kosten und auch die kumulierten Gesamtkosten deutlich höher als bei anderen Modell-Läufen<sup>86</sup> (Tab. 7.12). Bei den Mehrkosten pro eingesparten Treibhausgasemissionen ergibt sich ein differenziertes Bild. Während die zusätzlichen Investitionskosten in Relation zu eingesparten Treibhausgasemissionen bei Einführung von CO<sub>2</sub>-Steuern geringer sind als bei den anderen Modell-Läufen, sind die zusätzlichen Gesamtkosten deutlich höher. Die zusätzlichen Gesamtkosten schwanken je nach Höhe des Steuersatzes zwischen 288 EUR/t (Steuersatz 20 EUR/t) und 497 EUR/t (Steuersatz 150 EUR/t), während sie bei den anderen Modell-Läufen zwischen 28 EUR/t (minimiere soziale Kosten) und 187 EUR/t (minimiere Treibhausgasemissionen) liegen. Andererseits ist zu bedenken, dass die zusätzlichen für die Verbraucher entstehenden Kosten als Steuereinnahmen wieder an die Allgemeinheit zurückgegeben werden bzw. im Falle einer aufkommensneutralen Steuerreform Mehreinnahmen durch Steuer auf der einen Seite durch Senkung von Lohnnebenkosten beispielsweise kompensiert werden sollen. Die zusätzlichen Investitionskosten liegen für Läufe mit CO<sub>2</sub>-Steuer in einem relativ engen Bereich (zwischen 49 und 60 EUR/t), während sie ansonsten zwischen 89 EUR/t (minimiere soziale Kosten) und 244 EUR/t (minimiere Treibhausgasemissionen) liegen.

Tab. 7.12: Überblick über kumulierte Kosten und Treibhausgasemissionen sowie über Kosten für die Einsparung von Treibhausgasemissionen, Periode 2006 – 2020, Läufe mit verschiedenen Steuersätzen sowie weitere Modell-Läufe

	<b>Kumulierte Werte (2006 – 2020)</b>				<b>Mehrkosten pro eingesparte THG-Emissionen</b>	
	<i>Investitionskosten</i>	<i>laufende Kosten</i>	<i>Gesamtkosten</i>	<i>Treibhausg.-Emissionen</i>	<i>Investitionskosten</i>	<i>Gesamtkosten</i>
	Mrd. EUR	Mrd. EUR	Mrd. EUR	Mt	EUR/t	EUR/t
ohne Steuer (min. mon. K.)	4,60	46,57	51,17	191,48		
20 EUR/t	5,02	48,18	53,20	184,44	59,6	288,4
30 EUR/t	5,14	48,99	54,13	181,49	54,8	296,8
40 EUR/t	5,25	49,87	55,12	179,14	52,7	320,0
50 EUR/t	5,37	50,69	56,06	176,09	50,2	317,8
75 EUR/t	5,53	52,88	58,42	172,44	49,2	380,7
100 EUR/t	5,76	55,08	60,84	168,38	50,2	418,6
150 EUR/t	6,07	59,50	65,57	162,49	51,0	496,8
min. soz. K.	5,97	45,63	51,60	176,01	88,9	28,0
min. THG-Em.	13,17	44,56	57,74	156,38	244,4	187,2
Förd. Heizsys. hoch	6,21	45,65	51,86	178,37	122,8	52,4

<sup>86</sup> Bei „minimiere Treibhausgasemissionen“ erreichen allerdings die kumulierten Gesamtkosten einen ähnlichen Wert wie bei Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer von 75 EUR/t.



## 8. Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlußfolgerungen

- Unter den Bedingungen des Referenz-Szenarios sinken Treibhausgasemissionen für Raumheizung und Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand unter Anwendung des Kriteriums „minimiere monetäre Kosten“ um 33% im Jahr 2020 verglichen mit dem Basisjahr 2002. Ein geringerer Anteil davon kann auf Rückgang des Wohnungsbestands bzw. der zu beheizenden Fläche (6,21% weniger Wohnungen) zurückgeführt werden (nach 2002 errichtete Gebäude werden im Modell nicht berücksichtigt).
- Dieses Ausmaß an Emissionsreduktionen (33%) kann also als ökonomisch realisierbares Potenzial angesehen werden. Die Realisierung dieses Potenzials hängt allerdings auch davon ab, ob die im Modell etwas höher als im Status Quo angenommenen Renovierungs-/Austauschraten erreicht werden können. Allerdings wurde auch bei pessimistischeren Annahmen bezüglich maximaler Renovierungs-/Austauschraten und bei geringeren Energiepreisen eine Reduktion an Treibhausgasemissionen um 28% errechnet.
- Weitergehende Treibhausgasemissionsreduktionen im Vergleich zu „minimiere monetäre Kosten“ ergeben sich bei Anwendung der Kriterien „minimiere soziale Kosten“, „minimiere Treibhausgasemissionen“ und „minimiere Energieverbrauch“. Der Maßnahmenmix, der im Fall „minimiere soziale Kosten“ gewählt wird, stellt allerdings eine deutlich kostengünstigere Möglichkeit für die Einsparung von Treibhausgasemissionen dar. Die Kosten für jede zusätzliche eingesparte Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent (im Vergleich zu „minimiere monetäre Kosten“ als Referenz) sind im Fall „minimiere soziale Kosten“ um den Faktor 3,1 niedriger verglichen mit „minimiere Treibhausgasemissionen“ (Faktor 6,3 verglichen mit „minimiere Energieverbrauch“).
- Der Einsatz von Solartechnologien (solare Warmwasserbereitung, Solar-Kombisysteme) wächst nur in den Fällen „minimiere Treibhausgasemissionen“ und „minimiere Energieverbrauch“, was darauf hinweist, dass es sich hierbei um relativ teure Technologien zur Einsparung von Treibhausgasen und Energieverbrauch handelt.
- In jedem Modell-Lauf ist ein massiver Wechsel weg von Ölheizungen erkennbar. Dies deutet darauf hin, dass zur Zeit (2005/2006) vorherrschende Energiepreisrelationen mit moderat ansteigender Tendenz Anreiz genug für diesen Energieträgerwechsel bei nüchterner ökonomischer Kalkulation sein sollten. Der Anteil von Erdgas wächst allerdings deutlich im Fall „minimiere monetäre Kosten“ und etwas weniger ausgeprägt im Fall „minimiere soziale Kosten“. Die Verbreitung von Wärmepumpen und Fernwärme steigt in jedem Fall, Biomasseheizungen nur bei „minimiere soziale Kosten“ und „minimiere Treibhausgasemissionen“.

- Aus der Betrachtung der Ergebnisse für einzelne Modellgebäude geht hervor, dass bei Anwendung der Kriterien „minimiere monetäre Kosten“ und „minimiere soziale Kosten“ erzwungene Maßnahmen (Fenstertausch, Dämmung der Fassade, Wechsel des Heiz-/Warmwasserbereitungssystems nach Ablauf der jeweiligen Nutzungsdauer) überwiegen. Unter den nicht (aufgrund von Nutzungsdauerüberschreitung) erzwungenen Maßnahmen ist bei Anwendung dieser Optimierungskriterien die Maßnahme „Dämmung der obersten Geschoßdecke“ die häufigste, vorausgesetzt, dass der Ausgangszustand in thermischer Hinsicht entsprechend schlecht ist (Baujahr vor 1970). Unter Anwendung der Kriterien „minimiere Treibhausgasemissionen“ und „minimiere Energieverbrauch“ werden maximal mögliche Maßnahmen bezüglich Verbesserung der Gebäudehülle gewählt. In diesen beiden Fällen haben Restriktionen bezüglich maximaler Renovierungs-/Austausch- und Durchdringungsraten sowie bezüglich der Höhe von Ressourcenpotenzialen auf die Gesamtergebnisse großen Einfluß.
- Aus den durchgeführten Sensitivitätsanalysen lässt sich ableiten, dass Änderungen in der Höhe der maximalen Renovierungs-/Austauschraten signifikanten Einfluß auf die Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch haben, während andererseits Änderungen in den Energiepreisniveaus nur vergleichsweise geringen Einfluß haben. Letzteres gilt auch für die Variation in der Höhe von Zinssätzen. Sensitiv reagieren die Modellergebnisse auf eine Verdopplung der externen Kosten. Bei einer weiteren Steigerung der externen Kosten schwächt sich dieser Effekt allerdings ab.
- Versuche, auf die Erhöhung der Renovierungs-/Austauschraten durch (energiepolitische) Maßnahmen Einfluß zu nehmen und Hemmnisse in dieser Hinsicht abzubauen, sind daher von großer Bedeutung. Die Einführung eines flächendeckenden Energieausweises für Gebäude aufgrund der EU-Gebäuderichtlinie, welche wahrscheinlich zu einem höheren „Energiebewußtsein“ von KonsumentInnen, PlanerInnen und Bauträgern führt, kann zu einem Anstieg der Renovierungsraten führen. Dies gilt auch für andere Maßnahmen, die im wesentlichen die Informationsvermittlung verbessern, wie beispielsweise das bereits laufende klima:aktiv Programm. Anstrengungen in dieser Richtung sollten intensiviert werden.
- Die Modellresultate lassen erkennen, dass es möglich ist, durch Förderungen (Investitionszuschüsse) die Energieversorgung im Wohngebäudebereich in Richtung gesellschaftlich optimaler Pfade zu lenken. Dies gilt allerdings in erster Linie bei Förderung CO<sub>2</sub>-armer Heizsysteme sowie bei kombinierten Fördermodellen (Heizsysteme + Gebäudehülle) und bei entsprechender Förderhöhe. Hier werden erst jeweils im hohen Förderszenario Reduktionen an Treibhausgasemissionen in ähnlichem Ausmaß wie bei „minimiere soziale Kosten“ erreicht. Alleinige Förderungen für Maßnahmen an der Gebäudehülle (Dämmung und Fenstertausch) bewirken zwar eine Verbesserung der thermischen Qualität des Gebäudebestands, aber durch den höheren Einsatz von Strom-Direktheizungen wirken sich diese Verbesserungen kaum reduzierend auf die Treibhausgasemissionen aus. Die

verringerten Heizlasten bewirken, dass Strom-Direktheizungen (Nachtspeicheröfen) im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser in höherem Maße zur wirtschaftlichsten Variante werden. Daraus soll aber nicht abgeleitet werden, dass Förderungen von Maßnahmen an der Gebäudehülle sinnlos sind. Diese können Anreize bieten, um die Renovierungs-/Austauschraten zu erhöhen und sollten an Mindeststandards, die thermische Qualität der Gebäude betreffend, gebunden werden. Weiters sollten Förderinstrumente darauf Rücksicht nehmen, dass es nicht zu einem Anstieg von Strom-Direktheizungen in thermisch verbesserten Gebäuden kommt, sofern dies möglich ist. Ein alleiniges Setzen auf Wechsel zu Energieträgern mit weniger Treibhausgasemissionen ohne gleichzeitige Wärmeschutzmaßnahmen stößt auch früher oder später auf Grenzen der Ressourcenverfügbarkeit (auch in den Modellergebnissen bei „minimiere Treibhausgasemissionen“ erkennbar).

- Ein „Trade-Off“ zwischen Effizienz (Verhältnis von eingesparten Treibhausgasemissionen zum Gesamtvolumen an von der öffentlichen Hand gewährten Geldmitteln) und Effektivität (Gesamtvolumen an eingesparten Treibhausgasemissionen) von Fördersystemen lässt sich bei den Fördermodellen, welche ausschließlich Heizsysteme fördern sowie bei den kombinierten Fördermodellen, zeigen. (Je niedriger das Preisniveau, desto höher liegen tendenziell die Effizienzen von Förderungen, das resultierende Niveau an Treibhausgasemissionen bleibt jedoch höher, da auch das Ausgangsniveau höher ist.).
- Bei Einführung von CO<sub>2</sub>-Steuern lässt sich klar zeigen, dass mit steigendem Steuersatz (pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent) die Treibhausgasemissionen für Raumheizung und Warmwasserbereitung sinken. Bei einem Steuersatz von 50 EUR/t folgen die Treibhausgasemissionen einem zu „minimiere soziale Kosten“ sehr ähnlichen Verlauf. Mit steigendem Steuersatz sinkt der relative Anteil von Erdgas im Energiemix für die Raumwärmeversorgung, während insbesondere die Anteile für Wärmepumpen und Biomasse-Energieträger ansteigen. Während die zusätzlichen Investitionskosten in Relation zu eingesparten Treibhausgasemissionen bei Einführung von CO<sub>2</sub>-Steuern geringer sind als bei den anderen Modell-Läufen, sind die zusätzlichen Gesamtkosten allerdings deutlich höher. Allerdings ist zu bedenken, dass die zusätzlichen für die Verbraucher entstehenden Kosten als Steuereinnahmen wieder an die Allgemeinheit zurückgegeben werden bzw. im Falle einer aufkommensneutralen Steuerreform Mehreinnahmen durch Steuer auf der einen Seite durch Senkung von Lohnnebenkosten beispielsweise kompensiert werden könnten, wodurch der kostentreibende Effekt von CO<sub>2</sub>-Steuern relativiert wird.



## Literatur

Adensam Heidi, Bruck Manfred, Geissler Susanne, Fellner Maria (2002): Externe Kosten, Band I (Externe Kosten im Hochbau), Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, Wien, p. 67, <http://www.iswb.at/ecobuilding/bmwa/externekosten.htm>

Adensam Heidi, Geissler Susanne, Haberl Helmut (1996): Kostenoptimale Klimaschutzstrategien im Raumwärmebereich, hrsg. vom Österreichischen Ökologie-Institut, Wien

Amann Christof (2006): Klimaschutz und Gebäudequalität, Beitrag zum Österreichischen Baukongreß 2006, 9.-10.3.2006

Bacher Wolfgang (2000): Vergleich der Heizkosten bei unterschiedlichen Heizungssystemen und in Abhängigkeit des Wärmebedarfs, Diplomarbeit, TU Wien

Bahn Olivier, Haurie Alain, Zachary Daniel S. (2004): Mathematical Modelling and Simulation Methods in Energy Systems, Les Cahiers Du GERAD, G-2004-41, <http://www.gerad.ca/fichiers/cahiers/G-2004-41.pdf>

Balandynowicz H. W., Reuter A., Voss A. (1995): Kosteneffektivitätsanalyse von CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungsoptionen: Eine Fallstudie für Österreich, hrsg. vom Verband der Elektrizitätswerke Österreichs, Wien.

Benke Georg (2002): Energiefluss Österreich 2000, Energieverwertungsagentur, Wien, [http://www.eva.ac.at/\(de\)/publ/pdf/efluss2k.pdf](http://www.eva.ac.at/(de)/publ/pdf/efluss2k.pdf)

Biberacher Markus (2004): Modelling and optimisation of future energy systems using spatial and temporal methods, Dissertation, Institut für Plasmaphysik, Universität Augsburg, <http://www.opus-bayern.de/uni-augsburg/volltexte/2005/116/pdf/dissertation.pdf>

Biermayr Peter (1999): Einflußparameter auf den Energieverbrauch der Haushalte - Eine empirisch - ökonomische Analyse, Dissertation, Institut für Energiewirtschaft, Wien

Biermayr Peter, Schriefl Ernst, Baumann Bernhard (2004): Maßnahmen zur Minimierung von Rebound-Effekten bei der Sanierung von Wohngebäuden (MARESI), Endbericht, Wien <http://www.hausderzukunft.at/results.html?id=2791>

BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasser) (2002): Strategie Österreichs zur Erreichung des Kyoto-Ziels, Wien, <http://www.abcsd.at/website/uploads/klimastrategie.pdf>

Böhning Jörg, Schmitz Heinz (2002): Altbaummodernisierung im Detail, 4. Auflage, Müller Verlag, Köln

Bruck Manfred, Fellner Maria (2002): Externe Kosten. Band III (Referenzgebäude und Wärmeerzeugungssysteme). Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (<http://www.iswb.at/ecobuilding/bmwa/externekosten.htm>), Wien

Corradini R., Hutter C., Köhler D. (1999): Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil I, Allgemeiner Teil, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München

Ebel Witta, Eicke-Hennig Werner, Feist Wolfgang (2000): Energieeinsparung bei Alt- und Neubauten, C. F. Müller Verlag

Eyerer Peter, Reinhardt Hans-Wolf (2000): Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden, Birkhäuser Verlag

Faninger Gerhard (1998): Bereich 4: Technologie, Sanierung der Wärmeversorgung, Teilbericht für „Ökologie der Althaussanierung“, SAVE project: Nr. SA/35/95/AU, Niederösterreichische Landesakademie, St. Pölten

Faninger Gerhard (2005): Der Wärmepumpenmarkt in Österreich 2004, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Fakultät für Interdisziplinäre Forschung und Fortbildung (IFF), Klagenfurt, [http://www.uni-klu.ac.at/iff/wbi/downloads/Faninger\\_Wrmepumpenmarkt2004.pdf](http://www.uni-klu.ac.at/iff/wbi/downloads/Faninger_Wrmepumpenmarkt2004.pdf)

Faninger Gerhard (2006a): Der Wärmepumpenmarkt in Österreich 2005, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Fakultät für Interdisziplinäre Forschung und Fortbildung (IFF), Klagenfurt, <http://www.uni-klu.ac.at/iff/wbi/downloads/WP-Markt-2005.pdf>

Faninger Gerhard (2006b): Der Solarmarkt in Österreich 2005, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Fakultät für Interdisziplinäre Forschung und Fortbildung (IFF), Klagenfurt, <http://www.uni-klu.ac.at/iff/wbi/downloads/Solarmarkt-2005.pdf>

Faninger Gerhard (2006c): Erneuerbare Energieträger in Österreich: Marktsituation 2005, Fakultät für Interdisziplinäre Forschung und Fortbildung (IFF), Klagenfurt, <http://www.uni-klu.ac.at/iff/wbi/downloads/ErneuerbareEnergie-2005.pdf>

Fink Christian, Purkarthofer Gottfried, Müller Alexander, Kögl Christian (1999). Thermische Solaranlagen für Mehrfamilienhäuser, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie, Gleisdorf

Frei Ulrich (2004): Die Entwicklung thermischer Kollektoren von 1980 bis 2010, in: Tagungsband Gleisdorf Solar 2004, hrsg. von der Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie, Gleisdorf

Frey Konrad, Haas Johannes, Könighofer Kurt (1994): Handbuch für Energieberater, Joanneum Resarch – Institut für Energieforschung, Graz, 2. Aktualisierung 1994

Fritsche Uwe R., Schmidt Klaus (2004): Handbuch zu GEMIS 4.2, Öko-Institut (Institut für angewandte Ökologie e.V.), Darmstadt, [www.gemis.de](http://www.gemis.de)

Frittm Björn (2004): Entwicklung eines Modells zur Optimierung von teilsolaren Heizsystemen, Diplomarbeit ausgeführt am Institut für Elektr. Anlagen und Energiewirtschaft, Wien

Goißer Andreas (2004): Kostenvergleich für Heizsysteme in Niederösterreich, Publikation der EVN

Gürzenich Dirk (2002): Methodische Aspekte zu kumulierten Energieaufwendungen und Emissionen bei Photovoltaikanlagen in der Europäischen Union, Dissertation, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Bochum

Haas Reinhard, Auer Hans, Biermayr Peter (1998): The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating., in: Energy and Buildings, Vol. 27, S. 195-205

Haas Reinhard (1999): Wirtschaftliche und ökologische Optimierung der Heizenergieversorgung, Vorlesungsskriptum, Institut für Energiewirtschaft, TU Wien

Haas Reinhard, Biermayr Peter (2000): The rebound effect for space heating in Austria. Empirical evidence from Austria., in: Energy Policy 28 (6-7), S. 403-410

Haas Reinhard, Kranzl Lukas (2000): Evaluierung der Vorarlberger Biomasseförderung, Projektbericht, Institut für Energiewirtschaft, TU Wien

Haas Reinhard, Kranzl Lukas (2002): Analyse der volkswirtschaftlichen Bedeutung der energetischen Nutzung von Biomasse für Heizzwecke und Entwicklung von effizienten Förderstrategien für Österreich, Endbericht, Wien

Haas Reinhard, Biermayr Peter (1997): Residential Energy Demand in Austria and Resulting Effective Energy Policy Strategies, ECEEE summer study proceedings, ID 70, S.1-11, 9.-14. Juni, Spindleruv Mlyn, Czech Republic, 1997

Haberl Helmut, Adensam Heidi, Geissler Susanne (1998): Optimal climate protection strategies for space heating. The case of Austria, Energy Policy, 26 (15), S. 1125-1135

Häfele Gottfried; Oed Wolfgang; Sabel Ludwig (2003): Hauserneuerung: Instandsetzen, Modernisieren, Umbauen, 8. Auflage, Ökobuch-Verlag, Staufen bei Freiburg

Hohmeyer Olav (1996): Externe Kosten möglicher Klimaveränderungen – Grenzen und Schwierigkeiten von Kostenschätzungen, in: VDI- Gesellschaft für Energietechnik: Externe Kosten von Energieversorgung und Verkehr. Tagung Stuttgart, 5./6. März 1996, S. 107-120, Düsseldorf

Holz Thomas (2005): Holzpellet-Heizungen: Planung, Installation, Betrieb 2., verb. Aufl., Ökobuch-Verlag

Hutter C., Köhler D. (1999): Ökobilanzierung mit Hilfe der KEA-Datenbank. Praxistests, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München

Kleemann Manfred, Heckler Rainer, Kolb Gerhard, Hille Maren (2000a): Die Entwicklung des Energiebedarfs zur Wärmebereitstellung von Gebäuden – Ergebnisse, Bericht des Bremer Energie Instituts, Universität Bremen, [http://www.bei.uni-bremen.de/download/waerm2\\_1.pdf](http://www.bei.uni-bremen.de/download/waerm2_1.pdf)

Kleemann Manfred, Heckler Rainer, Kolb Gerhard, Hille Maren (2000b): Die Entwicklung des Energiebedarfs zur Wärmebereitstellung von Gebäuden – Materialien, Bericht des Bremer Energie Instituts, Universität Bremen, [http://www.bei.uni-bremen.de/download/waerm2\\_2.pdf](http://www.bei.uni-bremen.de/download/waerm2_2.pdf)

Korger Georg (1994): Analyse der Gebäudequalität in Österreich in verschiedenen Bauperioden: Energieeinsparmöglichkeiten durch Gebäudesanierung, Diplomarbeit, Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Wien

Kosz Michael, Madreiter Thomas, Schonbäck Wilfried (1996): Wärmedämmung - Rentabilität, Beschäftigungseffekte, Klimaschutz : eine betriebs- und volkswirtschaftliche Analyse, Springer Verlag, Wien

Kranzl L., Stadler M., Resch G., Huber C., Haas R., Ragwitz M., Brakhage A., Pett J., Gürtler P., Gula A., Sliz B., Gula E., Figorski A., Bakos G., Tsioliaridou E., Joergensen K., Fernandes M. (2005): Tools for the efficient design of RES & RUE promotion schemes: Recommendations derived from the project Invert. Report of Work Phase 7 of the project INVERT - a research project within the Altener Program of the European Commission, DG TREN, Wien, [www.invert.at](http://www.invert.at)

Kranzl Lukas, Stadler Michael, Haas Reinhard, Huber Claus (2006): Modellierung und Entwicklung von Strategien zur effizienten Förderung nachhaltiger Energiesysteme am Beispiel des Wiener Raumwärmesektors, Beitrag zum 9. Symposium Energieinnovation, 15.-17.2.2006, Graz.

Kratena Kurt, Schleicher Stefan (2001): Energieszenarien bis 2020, Hrsg.: Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, Wien

Kunst Ewald (2001): Ökologische Bewertung ausgewählter Wärmebereitstellungssysteme, Master - Thesis, Zentrum für Bauen und Umwelt der Donau-Universität Krems

Ladener Heinz, Feldhaus Maria (1998): Vom Altbau zum Niedrigenergiehaus, 2. Auflage, Ökobuch-Verlag, Staufen bei Freiburg

Ladener Heinz, Späte Frank (2003): Solaranlagen: Handbuch der thermischen Solarenergienutzung, 8. Auflage, Ökobuch-Verlag, Staufen bei Freiburg

Lechner Herbert, Mayer Johann F., Pierrard Roger (1998): Vergleich von Energieträgern und Heizsystemen zur Raumwärmeversorgung, Hrsg.: Energieverwertungsagentur, Wien

Lechner Herbert, Nemesthoty Kasimir, Schweighofer Martin, Tretter Herbert, Veigl Andreas, (2004): Energieeffizienz und Erneuerbare 2010. Eine Untersuchung zur Umsetzung der Ziele des Regierungsprogramms zur Steigerung der Energieeffizienz und des Anteils erneuerbarer Energieträger, Hrsg.: Österreichische Energieagentur, Wien

May Markus (1996): Graue Energie und Umweltbelastungen von Heizsystemen, Verlag Jenni Energietechnik, Oberburg

Meister Franz (1999): Die Entwicklung der thermischen Qualität der österreichischen Gebäude und ihre Bedeutung für den Umweltschutz, Konferenz Althausanierung und energieeffizientes Bauen, Brunn

Meister Franz (2000): Life Cycle Umweltbilanz von österreichischen Heizsystemen, Vortrag für „Fachtagung und Kooperationsbörse Erneuerbare Energieträger“, 26. – 28.4.2000, St. Pölten

Mötzl Hildegund, Zelger Thomas (2000): Ökologie der Dämmstoffe, Springer Verlag, Wien

Nast Michael, Leprih Uwe, Ragwitz Mario, Bürger Veit, Klinski Stefan (2006): Eckpunkte für die Entwicklung und Einführung budgetunabhängiger Instrumente zur Marktdurchdringung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Endbericht

NÖ Landes-Landwirtschaftskammer (2005): Biomasse – Heizungserhebung 2004, hrsg. von der Niederösterreichischen Landes-Landwirtschaftskammer, Abteilung Betriebswirtschaft und Technik, St. Pölten

ÖSTAT (1993): Häuser- und Wohnungszählung 1991: Hauptergebnisse Österreich, herausgeg. vom Österr. Statistischen Zentralamt, Beiträge zur Österreichischen Statistik; 1.040/10, Wien

ÖSTAT (1998): Energieverbrauch der Haushalte im Jahre 1996/97; Ergebnisse des Mikrozensus Juni 1997, Beiträge zur österreichischen Statistik, Heft 1.279, Wien

Peuser F. A. (1999): Solare Trinkwassererwärmung mit Großanlagen: praktische Erfahrungen, hrsg. vom Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für Wissenschaftlich-Technische Information mbH, 1. Aufl., Köln, TÜV-Verlag

Recknagel Hermann, Sprenger Eberhard, Schramek Ernst-Rudolf (2002): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2000, Oldenbourg Verlag, 69. Auflage

Regionalenergie Steiermark (2006): Kostenübersicht. Vergleich der Investitions- bzw. laufenden Kosten pro Jahr, 31. Kalenderwoche 2006, <http://www.holzenergie.net/ResourceImage.aspx?raid=9844>

Schaefer C., Weber C., Voss-Uhlenbruck H., Schuler A., Oosterhuis F., Nieuwlaar E., Angioletti R., Kjellson E., Leth-Petersen S., Togeby M., Munksgaard J. (2000): Effective Policy instruments for energy efficiency in residential space heating – an international empirical analysis (EPISODE), Forschungsbericht, Stuttgart

Schauer Kurt, Strasser Helmut, Gärtner Hanspeter, Fragner Hubert (o.J.): Moderne Holzheizungen, Hrsg. „die umweltberatung“ – NÖ-Süd, Wr. Neustadt

Schauer Kurt (1999): Moderne Holzheizungen: Neue Technologien - neue Marktchancen, Hrsg. Landesenergieverein Steiermark, Graz

Schlette Kay (1999): Entwicklung eines praxisorientierten und rechnergestützten Modells zur Prognose des deutschen Energieverbrauchs, Dissertation, Universität Oldenburg, <http://docserver.bis.uni-oldenburg.de/publikationen/dissertation/schent99/schent99.html>

Schuler Andreas, Weber Christoph, Fahl Ulrich (2000): Energy consumption for space-heating of West-German households: empirical evidence, scenario projections and policy implications, in: Energy Policy, 28, pp. 877-894

Schulze Darup Burkhard (2002): Energieeffiziente Wohngebäude. Einfamilienhäuser mit Zukunft, TÜV-Verlag

Schuster Gerhard, Szeider Gabriele, Wölfl Martin (2000): Wärmeschutzmaßnahmen an Wohngebäuden, Zentrum für Bauen und Umwelt, Donau-Universität Krems

Sedmidubsky Alice (2004): Daten zu erneuerbarer Energie in Österreich 2004, hrsg. von der Energieverwertungsagentur, Wien, [http://www.energyagency.at/publ/pdf/res\\_dat04.pdf](http://www.energyagency.at/publ/pdf/res_dat04.pdf)

Skopetz Harald (2001): Einflussfaktoren auf den Heizenergieverbrauch in Österreich, Diplomarbeit, ausgeführt am Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, TU Wien

Spreng Daniel (1994): Graue Energie, vdf Hochschulverlag, Zürich

Sörensen Christian (2000): Wärmedämmstoffe im Vergleich, 7. Auflage, Umweltinstitut München e.V.,

Statistik Austria (2003): Wohnungen 2002. Ergebnisse der Wohnungserhebung im Mikrozensus September 2002, Wien

Statistik Austria (2004): Gebäude- und Wohnungszählung 2001. Hauptergebnisse Österreich, Wien, [ftp://www.statistik.at/pub/neuerscheinungen/gwz\\_austria\\_web.pdf](ftp://www.statistik.at/pub/neuerscheinungen/gwz_austria_web.pdf)

Steffens Ralf (2002): Holzfeuerungsanlagen: Planung, Kosten, Fehlerquellen; Wirtschaftlichkeitsanalyse und Wärmepreisbestimmung, 1. Aufl., Berlin, VWF, Verlag für Wissenschaft

Streicher Wolfgang (2006): Sonnenenergienutzung. Solare Brauchwasserbereitung und Heizung, Vorlesungsskriptum, Institut für Wärmetechnik, TU Graz, [http://www.iwt.tugraz.at/downloads/skripten/Teil3\\_Brauchwasser\\_und\\_Heizung\\_06.pdf](http://www.iwt.tugraz.at/downloads/skripten/Teil3_Brauchwasser_und_Heizung_06.pdf)

van Beeck Nicole (1999): Classification of energy models, Research Memorandum No. 777, Tilburg University, Faculty of Economics and Business Administration, [http://paginas.fe.up.pt/~cdm/PDER/ener\\_model.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~cdm/PDER/ener_model.pdf)  
<http://greywww.kub.nl:2080/greyfiles/few/1999/doc/777.pdf>

Umweltbundesamt (2007): Austria's National Greenhouse Gas Inventory 1990-2005, Report, hrsg. vom Umweltbundesamt, Wien

UPI (= Umwelt und Prognose-Institut Heidelberg e.V.) (1991): Ökologische und soziale Kosten der Umweltbelastung in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1989, Heidelberg

Voss-Uhlenbruck Hubertus, Weber Christoph, Fahl Ulrich (1999): International comparison of policy instruments for energy efficiency in residential space heating, ECEEE Summer Study Proceedings, [http://www.eceee.org/library\\_links/proceedings/1999/pdf99/Panel4/4-03.pdf](http://www.eceee.org/library_links/proceedings/1999/pdf99/Panel4/4-03.pdf)



## Anhänge

## Anhang 1: Spezifikation der Gebäudeklassen

Tabelle A.1.1: Überblick über Spezifikationen (Schwerpunkt Geometriedaten) der Gebäudeklassen, Datenquellen: Statistik Austria (2003), Statistik Austria (2004), inkl. eigene Berechnungen und Annahmen

Gebäude- klasse	Bauperiode	Gebäudegröße	Wohnun- gen pro Gebäude	Brutto- geschoss- fläche	Länge Seite 1 (m)	Länge Seite 2 (m)	Anzahl Geschosse	Geschoß- höhe (m)	Anteil Fenster- fläche (%)
OH 1	-1919	Einfamilienh.	1	149,04	10,12	7,36	2	3	11,89%
OH 2	1919 - 1944	Einfamilienh.	1	135,24	9,64	7,01	2	3	11,89%
OH 3	1945 - 1960	Einfamilienh.	1	142,49	9,90	7,20	2	3	11,89%
OH 4	1961 - 1970	Einfamilienh.	1	154,78	10,32	7,50	2	3	11,89%
OH 5	1971 - 1980	Einfamilienh.	1	166,43	10,70	7,78	2	3	11,89%
OH 6	1981 - 1990	Einfamilienh.	1	169,06	10,78	7,84	2	3	11,89%
OH 7	1991 -	Einfamilienh.	1	175,51	10,98	7,99	2	3	11,89%
TH 1	-1919	Zweifamilienh.	2	264,75	15,44	8,58	2	2,9	12,21%
TH 2	1919 - 1944	Zweifamilienh.	2	264,61	15,43	8,57	2	2,9	12,21%
TH 3	1945 - 1960	Zweifamilienh.	2	254,97	15,15	8,42	2	2,9	12,21%
TH 4	1961 - 1970	Zweifamilienh.	2	262,01	15,36	8,53	2	2,9	12,21%
TH 5	1971 - 1980	Zweifamilienh.	2	282,76	15,95	8,86	2	2,9	12,21%
TH 6	1981 - 1990	Zweifamilienh.	2	289,17	16,13	8,96	2	2,9	12,21%
TH 7	1991 -	Zweifamilienh.	2	297,95	16,38	9,10	2	2,9	12,21%
AHs 1a	-1919	kleines Mfh.	5,56	604,41	19,04	10,58	3	3,2	15,79%
AHs 1b	-1919	kleines Mfh.	5,56	604,41	19,04	10,58	3	3,2	15,79%
AHs 2	1919 - 1944	kleines Mfh.	5,56	482,68	17,02	9,45	3	3	15,79%
AHs 3	1945 - 1960	kleines Mfh.	5,56	496,31	17,26	9,59	3	2,9	15,79%
AHs 4	1961 - 1970	kleines Mfh.	5,56	562,70	18,37	10,21	3	2,9	15,79%
AHs 5	1971 - 1980	kleines Mfh.	5,56	616,16	19,23	10,68	3	2,9	15,79%
AHs 6	1981 - 1990	kleines Mfh.	5,56	609,92	19,13	10,63	3	2,9	15,79%
AHs 7	1991 -	kleines Mfh.	5,56	604,18	19,04	10,58	3	2,9	15,79%
AHlg 1a	-1919	großes Mfh.	18,54	1564,79	30,64	12,77	4	3,2	18,35%
AHlg 1b	-1919	großes Mfh.	18,54	1564,79	30,64	12,77	4	3,2	18,35%
AHlg 2	1919 - 1944	großes Mfh.	18,54	1320,10	28,14	11,73	4	3	18,35%
AHlg 3	1945 - 1960	großes Mfh.	18,54	1453,97	29,54	12,31	4	2,9	18,35%
AHlg 4	1961 - 1970	großes Mfh.	18,54	1577,34	30,76	12,82	4	2,9	18,35%
AHlg 5	1971 - 1980	großes Mfh.	18,54	1806,51	32,92	13,72	4	2,9	18,35%
AHlg 6	1981 - 1990	großes Mfh.	18,54	1826,88	33,11	13,79	4	2,9	18,35%
AHlg 7	1991 -	großes Mfh.	18,54	1858,18	33,39	13,91	4	2,9	18,35%

**Anhang 2: Annahmen für Beispiel „Optimale Dämmstoffdicke“ (Kap. 5.1.5)**

Tabelle A.2.1: Annahmen, die dem Beispiel der Berechnung optimaler Dämmstoffdicken (Kap. 5.1.5) zugrundeliegen

<i>Bauteil</i>	<i>Fassade</i>	<i>Energieträger</i>	<i>Öl</i>
U-Wert vorher [W/m <sup>2</sup> K]	1,25		
F-Wert Fassade	1		
		<i>spezifische Werte Energieträger</i>	
<i>Dämmstoff</i>	<i>EPS</i>	Preis [€/kWh]	0,06
λ Dämmstoff [W/mK]	0,038	max. externe Kosten [€/kWh]	0,0235
		Treibhausgasemissionen [kg/kWh]	0,32
		graue Energie [kWh/kWh]	1,16
<i>fixer Aufwand für Dämmung</i>			
Kosten [€m <sup>2</sup> ]	57	<i>Heizsystem</i>	<i>zentral</i>
externe Kosten [€m <sup>2</sup> ]	0,5	Benutzungsfaktor	0,51
Treibhausgasemissionen [kg/m <sup>2</sup> ]	7,4	Jahresnutzungsgrad Heizsys.	0,71
Graue Energie [kWh <sup>2</sup> ]	29		
		Heizgradtage [Kd]	3666
<i>variabler Aufwand für Dämmung</i>			
Kosten [€m <sup>2</sup> .cm]	1,2	Annuitätenfaktor monetär	0,09
externe Kosten [€m <sup>2</sup> .cm]	0,073	Annuitätenfaktor technisch	0,029
Treibhausgasemissionen [kg/m <sup>2</sup> .cm]	0,77		
Graue Energie [kWh <sup>2</sup> .cm]	2,95		

**Anhang 3: Bedarf an elektrischer Hilfsenergie von Heizsystemen**

Tab. A.3.1: Bedarf an jährlicher elektrischer Hilfsenergie von Heizsystemen (für Betrieb des Wärmeerzeugers, für Brennstofftransport sowie für Wärmeverteilung), Datenquellen: eigene Annahmen, pers. Auskunft Reinhard Haas, pers. Auskunft Peter Biermayr

Typ Wärmeerzeuger / verwendeter Brennstoff	(Hilfs)-Stromverbrauch Heizsystem (kWh/a)			
	Einfamilien- häuser	Zweifamilien- häuser	kleine Mehr- familienh.	große Mehr- familienh.
Zentralheizungssysteme				
Stückholzkessel	200	240	-	-
Hackgutkessel	600	690	960	1440
Pelletsessel	450	518	810	1170
Gaskessel	150	180	330	750
Gas-Brennwertkessel	200	240	440	900
Ölkessel	240	288	528	1008
Öl-Brennwertkessel	290	348	638	1160
Kohlekessel	180	216	396	810
Fernwärme	100	120	220	500
Wärmepumpe Luft/Wasser	120	144	264	576
Wärmepumpe Sole/Wasser Oberflächenkollektoren	120	144	264	576
Wärmepumpe Sole/Wasser Tiefenbohrung	120	144	264	576
Wärmepumpe Wasser/Wasser	120	144	264	576

#### Anhang 4: Kennwerte für die Dimensionierung von Solar-Kombisystemen in Abhängigkeit von der Gebäudeheizlast

Tabelle A.4.1: Spezifische Kollektorfläche, spezifische Speichergröße und solare Deckungsgrade in Abhängigkeit der Gebäude-Heizlast, für Einfamilienhäuser, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: Streicher (2006), Frittum (2004), eigene Berechnungen

Einfamilienhaus				
Heizlast (kW)	spezifische Kollektorfläche ( $m^2/kW_{Heizlast}$ )	spezifische Speichergröße ( $m^3/kW_{Heizlast}$ )	solarer Gesamtdeckungsgrad	solarer Deckungsgrad Warmwasser
0 - 2	8	0,55	0,52	0,68
2 - 3	7	0,5	0,48	0,68
3 - 4	5	0,4	0,4	0,69
4 - 5	4	0,35	0,34	0,69
5 - 6	3	0,3	0,3	0,69
6 - 7	2,5	0,25	0,26	0,69
7 - 8	2	0,25	0,23	0,69
8 - 10	1,8	0,2	0,21	0,69
> 10	1,5	0,15	0,19	0,69

Tabelle A.4.2: Spezifische Kollektorfläche, spezifische Speichergröße und solare Deckungsgrade in Abhängigkeit der Gebäude-Heizlast, für Zweifamilienhäuser, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: Streicher (2006), Frittum (2004), eigene Berechnungen

Zweifamilienhaus				
Heizlast (kW)	spezifische Kollektorfläche ( $m^2/kW_{Heizlast}$ )	spezifische Speichergröße ( $m^3/kW_{Heizlast}$ )	solarer Gesamtdeckungsgrad	solarer Deckungsgrad Warmwasser
0 - 3	10	0,6	0,58	0,67
3 - 4	6	0,4	0,44	0,68
4 - 6	5	0,4	0,4	0,68
6 - 8	4	0,35	0,34	0,69
8 - 10	3	0,3	0,3	0,69
10 - 12	2,5	0,25	0,26	0,69
12 - 14	2	0,25	0,26	0,69
14 - 16	1,8	0,2	0,21	0,69
16 - 18	1,5	0,15	0,19	0,69
18 - 20	1,4	0,15	0,18	0,69
> 20	1,3	0,15	0,17	0,69

Tabelle A.4.3: Spezifische Kollektorfläche, spezifische Speichergröße und solare Deckungsgrade in Abhängigkeit der Gebäude-Heizlast, für kleine Mehrfamilienhäuser, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: Streicher (2006), Frittum (2004), eigene Berechnungen

Mehrfamilienhaus (3-10 Wohneinheiten)				
Heizlast (kW)	spezifische Kollektorfläche ( $m^2/kW_{Heizlast}$ )	spezifische Speichergröße ( $m^3/kW_{Heizlast}$ )	solarer Gesamtdeckungsgrad	solarer Deckungsgrad Warmwasser
0 - 5	8	0,55	0,52	0,63
5 - 8	7	0,5	0,48	0,63
8 - 10	5	0,4	0,4	0,64
10 - 13	4	0,35	0,34	0,65
13 - 15	3	0,3	0,3	0,65
15 - 18	2,5	0,25	0,26	0,65
18 - 21	2	0,25	0,23	0,65
21 - 24	1,8	0,2	0,21	0,65
24 - 27	1,5	0,15	0,19	0,64
27 - 30	1,3	0,15	0,18	0,64
> 30	1,2	0,12	0,17	0,64

Tabelle A.4.4: Spezifische Kollektorfläche, spezifische Speichergröße und solare Deckungsgrade in Abhängigkeit der Gebäude-Heizlast, für große Mehrfamilienhäuser, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: Streicher (2006), Frittum (2004), eigene Berechnungen

Mehrfamilienhaus (mehr als 10 Wohneinheiten)				
Heizlast (kW)	spezifische Kollektorfläche ( $m^2/kW_{Heizlast}$ )	spezifische Speichergröße ( $m^3/kW_{Heizlast}$ )	solarer Gesamtdeckungsgrad	solarer Deckungsgrad Warmwasser
0	10	0,8	0,58	0,65
10	7,5	0,6	0,51	0,65
20	4,5	0,5	0,38	0,65
30	3,5	0,35	0,32	0,65
40	2,5	0,3	0,26	0,65
50	2	0,25	0,23	0,65
60	1,8	0,2	0,21	0,65
70	1,5	0,18	0,19	0,65
80	1,3	0,15	0,18	0,65
90	1,2	0,13	0,17	0,65
100	1	0,12	0,15	0,65

**Anhang 5: Kosten für Wartung von Heizsystemen**

Tabelle A.5.1: Jährliche Kosten für Wartung von Heizsystemen (Kessel/Wärmeerzeuger, Kamin),  
Datenquellen: Regionalenergie Steiermark (2006), eigene Annahmen

Energieträger/ Heizsystem	Einfamilienhaus		Zweifamilienhaus		kleines Mehrfam.- haus		großes Mehrfam.- haus	
	Wartung Kessel	Wartung Kamin	Wartung Kessel	Wartung Kamin	Wartung Kessel	Wartung Kamin	Wartung Kessel	Wartung Kamin
Stückholz	145	86	145	86	188,5	120,4	261	154,8
Hackschnitzel	150	86	150	86	195	120,4	270	154,8
Holzpellets	145	86	145	86	188,5	120,4	261	154,8
Heizöl	145	58	145	58	188,5	81,2	261	104,4
Erdgas	110	40	110	40	143	56	198	72
Kohle/Koks	145	86	145	86	188,5	120,4	261	154,8
Wärmepumpe	80	0	80	0	104	0	144	0
Fernwärme	0	0	0	0	0	0	0	0
Strom-Direkth.	0	0	0	0	0	0	0	0

## Anhang 6: Hilfsgrößen zur Berechnung der Investitionskosten von Wärmeerzeugern

Tab A.6.1: Überdimensionierungsfaktoren und minimale Leistungen von Wärmeerzeugern, im Modell verwendete Werte, eigene Annahmen

	Überdim.- Faktor ( $p_{ref}$ ) $f_{ü}(p_{ref})$	min. Leistung Wärmeerzeuger	Anmerkungen zu Einsatzbereich im Modell
Holzvergaser- kessel	1,30	15	nur für Ein- und Zweifamilienhäuser
Hackschnitzel- kessel	1,42	20	
Pelletsessel (mit Raumaustr.)	1,42	12	
Pelletsofen Luft	1,15	6	nur für Ein- und Zweifamilienhäuser (max. Heizlast 7 kW pro Wohneinheit, ein Gerät pro Wohneinheit)
Pelletsofen Wasser	1,20	8	nur für Ein- und Zweifamilienhäuser (max. Heizlast 9 kW pro Wohneinheit, ein Gerät pro Wohneinheit)
Gaskessel	1,25	10	
Gas-Kombitherme	1,30	15	typ. Leistungen für Gas-Kombithermen 18 – 24 kW (nur für Ein- und Zweifamilienhäuser)
Gas- Brennwertkessel	1,25	10	
Ölkessel	1,30	10	
Öl- Brennwertkessel	1,30	10	
Kohlekessel	1,30	15	nur für Ein- und Zweifamilienhäuser
Wärmepumpe Luft-Wasser	1,15	6	max. Wärmeleistung 38 kW
Wärmepumpe Sole	1,15	6	
Wärmepumpe Sole Tiefenbohrung	1,15	6	
Wärmepumpe Wasser/Wasser	1,15	7	
Fernwärme	1,2	-	
Strom- Direktheizung	1,1	-	
Strom- Nachtspeicher	1,1	-	

### Anhang 7: Spezifikation der Näherungsformeln für die Berechnung der Investitionskosten von Heizsystemen

Die Bestimmung der Investitionskosten (siehe Kap. 5.3.1.2.1) für Stückholzkessel, Hackschnitzelkessel, Pelletskessel, Pelletsöfen und Kohlekessel erfolgt nach Ansatz 1 ( $K_{WE} = c + a \cdot P_{WE}$ ), für Gaskessel, Ölkessel und Wärmepumpen nach Ansatz 2 ( $K_{WE} = c + a \cdot P_{WE}^{(b+1)}$ ).

#### Ansatz 1 ( $K_{WE} = c + a \cdot P_{WE}$ )

Tab. A.7.1: Parameter der Näherungsformeln für die Berechnung der Investitionskosten von Heizsystemen nach Ansatz 1, Quellen: siehe Datenquelle

Wärmeerzeuger	Parameter c (EUR)	Parameter a (EUR/kW)	Datenquelle
Hackschnitzelkessel (ohne Lambdasonde)	12715	75	Haas/Kranzl (2000), adaptiert
Hackschnitzelkessel (mit Lambdasonde)	14552	75	Haas/Kranzl (2000), adaptiert
Pelletskessel	9575	106	Haas/Kranzl (2000)
Pelletsofen (mit Wassertasche)	3000	130	Herstellerprospekte, eigene Annahmen
Pelletsofen (Luftgerät)	3400	135	Herstellerprospekte, eigene Annahmen

Für Stückholzkessel erfolgt ein gemäß Haas/Kranzl (2000) etwas veränderter Ansatz:

$$K_{WE, Shk} = 6541 + 105 \cdot P_{WE} - \frac{713}{f_{ii}} - \frac{16,8 \cdot P_{WE}}{f_{ii}} \quad (\text{A.7.1})$$

$K_{WE, Shk}$  Investitionskosten für Stückholzkessel (nur Wärmeerzeuger) [EUR]

$P_{WE}$  maximale Wärmeleistung eines Wärmeerzeugers [kW]

$f_{ii}$  Überdimensionierungsfaktor [-]

Die Investitionskosten für Kohlekessel werden ebenfalls nach obiger Formel berechnet, allerdings noch mit einem Korrekturfaktor (0,85) multipliziert.

**Ansatz 2** ( $K_{WE} = c + a \cdot P_{WE}^{(b+1)}$ )

Tab. A.7.2: Parameter der Näherungsformeln für die Berechnung der Investitionskosten von Heizsystemen nach Ansatz 2, Quellen: siehe Datenquelle

Wärmeerzeuger	Par. c (EUR)	Par. a (EUR)	Par. b	Datenquelle
Gaskessel	0	1308	-0,8	Bacher (2000), adaptiert
Gas-Kombitherme	94	523	-0,8	Bacher (2000), adaptiert
Gas-Brennwertkessel	0	1892	-0,81	Bacher (2000), adaptiert
Ölkessel	0	1744	-0,81	Bacher (2000), adaptiert
Öl-Brennwertkessel	0	2180	-0,81	Bacher (2000), adaptiert
Wärmepumpe Sole	0	4731	-0,734	eigene Analysen, Prospekt Fa. Vaillant
Wärmepumpe Grundw.	0	5451	-0,773	eigene Analysen, Prospekt Fa. Vaillant
E-Konvektor (pro einzelner Konvektor)	0	182	-0,801	Bacher (2000), adaptiert
E-Nachtspeicherofen (pro Ofen)	0	467	-0,406	Bacher (2000), adaptiert

Für Luft-Wasser-Wärmepumpen wird ein etwas veränderter Ansatz verwendet:

$$K_{WE, L - W - Wp} = 8880 \cdot \left( \frac{P_{WE}}{7,5} \right)^{(1 - 0,78)} \quad (\text{A.7.2})$$

$K_{WE,Shk}$  Investitionskosten für Luft-Wasser-Wärmepumpe (nur Wärmeerzeuger) [EUR]

$P_{WE}$  maximale Wärmeleistung eines Wärmeerzeugers (thermische Leistung der Wärmepumpe) [kW]

**Anhang 8: Kosten für Installation / Montage von Wärmeerzeugern**

Tab. A.8.1: Kosten für Installation / Montage von Wärmeerzeugern (in EUR), Datenquellen: Frey et al. (1994), eigene Annahmen, MFH=Mehrfamilienhaus

	<i>Einfam.- haus</i>	<i>Zweifam.- haus</i>	<i>kleines MFH</i>	<i>großes MFH</i>
Pellets-Einzelofen (Luftgerät)	250			
Pellets-Etagenofen (mit Wassertasche)	750			
Gaskessel	1200	1320	1800	2640
Gas-Kombitherme	1200			
Gas-Brennwertgerät	1350	1485	2025	2970
Ölkessel	1400	1540	2100	3080
Öl-Brennwertkessel	1500	1650	2250	3300
Wärmepumpen	1400	1540	2100	3080

## Anhang 9: Ansätze zur Berechnung der Kosten verschiedener Komponenten von Heizsystemen (außer Wärmeerzeuger)

### A.9.1 Wärmeverteilung

Die Berechnungsformel zur Berechnung der Kosten für die Wärmeverteilung zerfällt in einen variablen, von der Anzahl der Heizkörper abhängigen Teil, und einen konstanten Anteil (konkrete Zahlenwerte aus Bacher 2000). In der Formel ist über den Kostenreduktionsfaktor  $f_{Kr}$  berücksichtigt, dass bei größeren Gebäudevolumina die relativen Kosten sinken können (siehe Tabelle A.9.1).

$$K_{wv} = (181,7 \cdot n_{HK} + 508,7) \cdot f_{Kr} \quad (\text{A.9.1})$$

$$n_{HK} = 0,06 \cdot A_{BG} \quad (\text{A.9.2})$$

$K_{wv}$  Anschaffungskosten Wärmeverteilung [EUR]

$n_{HK}$  Anzahl der Heizkörper pro Gebäude [-]

$f_{Kr}$  Kostenreduktionsfaktor, je nach Gebäudetyp (Gebäude mit 1 WE (Wohneinheiten) / 2 WE / 3-10 WE / >10 WE) [-]

$A_{BG}$  Bruttogeschoßfläche [m<sup>2</sup>]

Tab. A.9.1: Kostenreduktionsfaktor  $f_{Kr}$  nach Gebäudetyp, im Modell verwendete Werte, eigene Annahmen

	Gebäude mit 1 Wohneinh. (WE)	Gebäude mit 2 WE	Gebäude mit 3-10 WE	Gebäude mit > 10 WE
$f_{Kr}$	1	0,98	0,92	0,88

### A.9.2 Wärmeabgabe

Durch Multiplikation der Summe aus Anschaffungskosten und Installationskosten<sup>87</sup> pro Heizkörper mit der Anzahl der Heizkörper werden die Kosten der Wärmeabgabe ermittelt. Analog zur Berechnung der Kosten der Wärmeverteilung wird auch hier ein Kostenreduktionsfaktor berücksichtigt.

Die Anschaffungskosten für einen Heizkörper werden durch einen linearen Näherungszusammenhang in Abhängigkeit der Wärmeabgabeleistung des Heizkörpers bestimmt (nach Bacher 2000).

$$K_{WA} = (K_{HK} + K_{I, HK}) \cdot n_{HK} \cdot f_{Kr} \quad (\text{A.9.3})$$

$$K_{HK} = 26,4 \cdot P_{HK} + 68,2 \quad (\text{A.9.4})$$

<sup>87</sup> Die Installationskosten pro Heizkörper sind mit 80 EUR angenommen.

$$P_{HK} = \frac{P_{WE}}{n_{HK}} \quad (\text{A.9.5})$$

$$n_{HK} = 0,06 \cdot A_{BG} \quad (\text{A.9.6})$$

$K_{WA}$  Gesamtkosten Wärmeabgabe [EUR]

$K_{HK}$  Anschaffungskosten eines Heizkörpers [EUR]

$P_{HK}$  Wärmeabgabeleistung pro Heizkörper [kW]

$K_{I,HK}$  Kosten für Installation eines Heizkörpers [EUR]

Erläuterung der übrigen Variablen siehe oben (A.9.1, A.9.2)

### A.9.3 Lagerung des Energieträgers und andere bauliche Maßnahmen

#### A.9.3.1 Lagerraum (für Scheitholz, Holzpellets, Hackschnitzel, Kohle)

Die Größe des Lagerraums wird vom benötigten Brennstoffvolumen pro Heizperiode ( $V_B$ ) bestimmt und damit vom Heizenergiebedarf und der Energiedichte des Brennstoffs (hier relevant Heizwert pro Schüttvolumen, siehe Tabelle A.9.2). Hackschnitzel weisen die geringste Energiedichte auf und haben entsprechend großen Bedarf an Lagerraum. Holzpellets haben einen beinahe viermal so hohen Heizwert pro Schüttvolumen im Vergleich zu Hackschnitzel. Falls der Lagerraum häufiger als einmal pro Heizperiode befüllt wird, kann dieser entsprechend kleiner dimensioniert werden. Gemäß Formel A.9.8 ist einmalige Befüllung pro Heizperiode angenommen.

$$K_{Lr} = K_{s,A,Lr} \cdot A_{Lr} + c \quad (\text{A.9.7})$$

$$A_{Lr} = V_B / h_g \quad (\text{A.9.8})$$

$K_{Lr}$  Errichtungskosten für einen Lagerraum [EUR]

$K_{s,A,Lr}$  spezifische Errichtungskosten pro Fläche für einen Lagerraum [EUR/m<sup>2</sup>]

$A_{Lr}$  Fläche des Lagerraums [m<sup>2</sup>]

$V_B$  benötigtes Brennstoffvolumen pro Heizperiode [m<sup>3</sup>]

$h_g$  genutzte Raumhöhe für Brennstofflagerung [m]

$c$  konstanter (flächenunabhängiger) Anteil von  $K_{Lr}$  [EUR]

Tab. A.9.2: Parameter für Berechnung der Errichtungskosten eines Lagerraums, für Modell verwendete Werte, Datenquellen: Frey et al. (1994), eigene Annahmen

	$K_{s,A,Lr}^*$ (EUR/m <sup>2</sup> )	$c$ (EUR)	$h_g$ (m)	Heizwert $H_u$ (kWh/kg)	$H_u$ pro Schüttvolumen (kWh/Srm)
Stückholz	500 (650)	700	2		2000
Hackschnitzel	500 (650)	700	1,9		850
Holzpellets	700 (650)	800	1,8	4,9	3250
Kohle/Koks	650 (650)	600	1,8	7-8	6975

\* Werte in Klammer für Mehrfamilienhäuser, Werte ohne Klammer für Ein- und Zweifamilienhäuser

### A.9.3.2 Öltank

Die Formel zur Berechnung der Kosten eines Öltanks enthält einen volumsabhängigen und einen volumsunabhängigen Teil (Installation inkl. Verrohrung und Armaturen). Je nach Gebäudegröße wurden etwas unterschiedliche Werte angenommen: Kostendegression bei volumsabhängigen Kosten, steigende Werte bei volumsunabhängigen Kosten. Die Werte sind an Bacher (2000) und Frey et al. (1994) orientiert. Zu diesen Kosten für den Öltank an sich werden noch Kosten für Platzbereitstellung (Berechnung analog zu oben, A.9.3.1) addiert.

$$K_{\dot{O}t} = K_{I, \dot{O}t} + K_{s, v, \dot{O}t} \cdot V_B \cdot f_{\ddot{u}, \dot{O}t} + c_{Pl} + K_{s, A, Pl} \cdot V_B \cdot f_{\ddot{u}, \dot{O}t} \quad (A.9.9)$$

$K_{\dot{O}t}$  Kosten für einen Öltank (inkl. Kosten für Platzbereitstellung) [EUR]

$K_{I, \dot{O}t}$  Kosten für die Installation eines Öltanks (inkl. Verrohrung und Armaturen) [EUR]

$K_{s, v, \dot{O}t}$  spezifische Kosten pro Volumen für einen Öltank [EUR/m<sup>3</sup>]

$V_B$  benötigtes Brennstoffvolumen pro Heizperiode [m<sup>3</sup>]

$f_{\ddot{u}, \dot{O}t}$  Überdimensionierungsfaktor für einen Öltank [-]

$c_{Pl}$  konstanter (flächenunabhängiger) Teil der Platzbereitstellungskosten für Öltank [EUR]

$K_{s, A, Pl}$  spezifische Errichtungskosten pro Fläche für Platzbereitstellung eines Öltanks [EUR/m<sup>2</sup>]

Tab. A.9.3: Parameter für Berechnung der Kosten eines Öltanks, für Modell verwendete Werte, Datenquellen: Frey et al. (1994), Bacher (2000), eigene Annahmen

	Gebäude mit 1 Wohneinheit (WE)	Gebäude mit 2 WE	Gebäude mit 3- 10 WE	Gebäude mit > 10 WE
$K_{s, v, \dot{O}t}$ (EUR/m <sup>3</sup> )	380	360	340	320
$K_{I, \dot{O}t}$ (EUR)	435	500	700	900
$f_{\ddot{u}, \dot{O}t}$	1,2	1,15	1,1	1,05
$c_{Pl}$ (EUR)	600	600	600	600
$K_{s, A, Pl}$ (EUR/m <sup>2</sup> )	650	650	650	650

*A.9.4 Andere bauliche Maßnahmen (für Wärmepumpenheizsysteme)*

Die Kosten für bauliche Maßnahmen bei Wärmepumpenheizsystemen umfassen in erster Linie Erdarbeiten (Grabungen, Bohrungen) und das Verlegen von Leitungen. Die Berechnungsformeln (basierend auf „Handbuch für Energieberater“, Frey et al. (1994)) beinhalten einen konstanten und einen variablen (leistungsabhängigen) Teil. Bauliche Maßnahmen bei Wärmepumpenheizsysteme stellen einen bedeutenden Kostenfaktor dar.

$$K_{BM,WP} = c_{BM,WP} + K_{s,P,BM,WP} \cdot P_{WE} \tag{A.9.10}$$

- $K_{BM,WP}$       Kosten für bauliche Maßnahmen bei Wärmepumpen-Heizsystemen [EUR]
- $c_{BM,WP}$       konstanter (leistungsunabhängiger Anteil) der Kosten für bauliche Maßnahmen bei Wärmepumpen-Heizsystemen [EUR]
- $K_{s,P,BM,WP}$     spezifische Kosten (pro Wärmeleistung) für bauliche Maßnahmen bei Wärmepumpen-Heizsystemen [EUR/kW]
- $P_{WE}$         Wärmeleistung [kW]

*Tab. A.9.4: Parameter für Berechnung der Kosten von baulichev Maßnahmen bei Wärmepumpen-Heizsystemen, für Modell verwendete Werte, Datenquellen: Frey et al. (1994), eigene Annahmen*

	<i>Wärmepumpe Sole/Wasser Oberfläche</i>	<i>Wärmepumpe Sole/Wasser Tiefenbohrung</i>	<i>Wärmepumpe Wasser/Wasser (Grundwasser)</i>
$c_{BM,WP}$ (EUR)	5019	5636	6517
$K_{s,P,BM,WP}$ (EUR/kW)	296	440	176

*A.9.5 Anschluß*

Für die Nutzung von Erdgas und Fernwärme fallen Anschlußkosten an.

*Erdgas*

Die Anschlußkosten werden in Abhängigkeit des Gebäudetyps (unterschiedliche Anzahl an Wohneinheiten) modelliert. Für Einfamilienhäuser konnte der Wert an der Literatur (Bacher 2000, Goißer 2004) bzw. anhand von Versorgerinformationen aus dem Internet orientiert werden, für größere Gebäude ist eine nichtlineare Steigerung angenommen.

Tabelle A.9.5: Kosten für einen Erdgasanschluß in Abhängigkeit des Gebäudetyps, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: Bacher (2000), Goißer (2004), www.tigas.at, eigene Annahmen

	Gebäude mit 1 Wohneinheit (WE)	Gebäude mit 2 WE	Gebäude mit 3-10 WE	Gebäude mit > 10 WE
Anschlußkosten Erdgas	2000	2500	4000	6000

### Fernwärme

Die Anschlußkosten für Fernwärme sind von der Anschlußleistung abhängig, wobei ein nicht-linearer Zusammenhang für größere Anschlußleistungen über einen Kostendegressionsfaktor berücksichtigt wird.

$$K_{A, Fw} = K_{S, P} \cdot P_A \cdot f_{degr} \quad (A.9.11)$$

$$f_{degr} = \frac{1}{\left(\frac{P_A}{P_{ref}}\right)^k} \quad (A.9.12)$$

$K_{A,FW}$  Anschlußkosten Fernwärme [EUR]

$K_{S,P}$  spezifische Fernwärme-Anschlußkosten pro Anschlußleistung

$P_A$  Anschlußleistung [kW]

$f_{degr}$  Faktor für Kostendegression [-]

$P_{ref}$  Referenzwärmeleistung (15 kW)

$k$  Korrekturfaktor (0,2 im Modell)

### A.9.6 Kamin

$$K_K = K_{s, K} \cdot h_K \quad (A.9.13)$$

$K_K$  Kosten für Kamin [EUR]

$K_{s,K}$  spezifische Kosten des Kamins [EUR/m]

$h_K$  Höhe des Kamins [m]

Tab. A.9.6: Spezifische Kaminkosten in Abhängigkeit des eingesetzten Energieträgers, im Modell verwendete Werte, Datenquelle: Regionalenergie Steiermark (2006), eigene Annahmen

	Biomasse/Kohle	Erdgas	Öl
$K_{s,K}$	180	120	100

## Anhang 10: Ansätze zur Berechnung der Kosten verschiedener Komponenten von Einzelsystemen zur Warmwasserbereitung

- *Dezentrale Elektro-Warmwasserspeicher (pro Wohneinheit)*

Die Kosten für einen einzelnen Elektro-Warmwasserspeicher wird in Abhängigkeit der Kosten eines Referenzspeichers (Referenzvolumen = 120 l) nicht-linear modelliert. Zu den Anschaffungskosten werden noch Installationskosten addiert. Die Kosten für den einzelnen Speicher werden mit der Anzahl der Wohneinheiten multipliziert, da in jeder Wohneinheit ein Speicher installiert wird.

$$K_{WW, Sp, E - dez} = (K_{WW, Sp, ref} \cdot \left(\frac{V_{WW, Sp}}{V_{WW, Sp, ref}}\right)^{0,7} + K_{I, WW, E - dez}) \cdot n_W \quad (A.10.1)$$

$$V_{WW, Sp} = \frac{NE_{WW, d, Geb} \cdot 3600}{\eta_{WE} \cdot c_{p, H_2O} \cdot \Delta T_{WW} \cdot n_W} \quad (A.10.2)$$

$K_{WW, Sp, E-dez}$	Kosten für Ausstattung eines Gebäudes mit dezentralen Elektro-Warmwasserspeicher (pro Wohneinheit) [EUR]
$K_{WW, Sp, ref}$	Kosten für einen Referenz-Elektro-Warmwasserspeicher <sup>88</sup> [EUR]
$V_{WW, Sp}$	Volumen des Warmwasserspeichers [l]
$V_{WW, Sp, ref}$	Volumen des Referenz-Elektro-Warmwasserspeichers (120 l)
$K_{I, WW, E-dez}$	Installationskosten für einen Elektro-Warmwasserspeicher <sup>89</sup> [EUR]
$n_W$	Anzahl an Wohneinheiten pro Gebäude
$NE_{WW, d, Geb}$	Nutzenergiebedarf für Warmwasser pro Tag pro Gebäude [kWh]
$\eta_{WE}$	Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers [-]
$c_{p, H_2O}$	spezifische Dichte von Wasser (4,19 kJ/kg.K)
$\Delta T_{WW}$	Temperaturdifferenz zwischen warmen und kaltem Wasser (38 °K im Modell)

- *Zentraler Elektro-Warmwasserspeicher (für das gesamte Gebäude)*

Im Fall eines zentralen Elektro-Warmwasserspeichers wird angenommen, dass das Gesamtspeichervolumen auf mehrere Speicher aufgeteilt wird, falls das benötigte Speichervolumen mehr als 1000 l beträgt (ein oder mehrere 1000 l Speicher und ein kleinerer Speicher für das Restvolumen). Die Berechnung der Kosten für den kleineren Speicher erfolgt im Prinzip analog zur Berechnung für einen dezentralen E-

<sup>88</sup> Die Kosten für den 120 l fassenden Referenzspeicher betragen im Modell 847 EUR (Datenquelle: Herstellerprospekte)

<sup>89</sup> Installationskosten für einen Elektro-Warmwasserspeicher sind mit 250 EUR angenommen.

Warmwasserspeicher, wobei je nach Speichergröße der Kostenexponent zwischen 0,547 und 0,7 variiert<sup>90</sup>.

$$K_{WW, Sp, E - zentr} = n_{WW, Sp, 1000l} \cdot K_{WW, Sp, 1000l} + K_{WW, Sp, kl} + K_{I, WW, E - zentr} \quad (\text{A.10.3})$$

$$K_{WW, Sp, kl} = K_{WW, Sp, ref} \cdot \left( \frac{V_{WW, Sp, kl}}{V_{WW, Sp, ref}} \right)^{ke} \quad (\text{A.10.4})$$

$$V_{WW, Sp} = \frac{NE_{WW, d, Geb} \cdot 3600}{\eta_{WE} \cdot c_{p, H_2O} \cdot \Delta T_{WW}} \quad (\text{A.10.5})$$

$K_{WW, Sp, E - zentr}$	Kosten für zentralen Elektro-Warmwasserspeicher (pro Gebäude) [EUR]
$n_{WW, Sp, 1000l}$	Anzahl von 1000-Liter-Speichern
$K_{WW, Sp, 1000l}$	Kosten für einen 1000-Liter-Speicher [EUR]
$K_{WW, Sp, kl}$	Kosten für den kleineren Speicher für das Restvolumen [EUR]
$K_{I, WW, E - zentr}$	Installationskosten für zentralen Elektro-Warmwasserspeicher <sup>91</sup> [EUR]
$K_{WW, Sp, ref}$	Kosten für den Referenz-Elektro-Warmwasserspeicher (siehe oben) [EUR]
$V_{WW, Sp, kl}$	Volumen des kleineren Warmwasserspeichers [l]
$V_{WW, Sp, ref}$	Volumen des Referenz-Elektro-Warmwasserspeichers (120 l)
$ke$	Kosten-Exponent [-]

Erläuterung der Variablen aus A.10.5 siehe oben (A.10.2)

- *Dezentrale Elektro-Durchlauferhitzer*

$$K_{E - Dlh} = K_{E - Dlh, ref} \cdot n_W \quad (\text{A.10.6})$$

$K_{E - Dlh}$  Kosten für Ausstattung eines Gebäudes mit dezentralen Elektro- Durchlauferhitzer (pro Wohneinheit) [EUR]

$K_{E - Dlh, ref}$  Kosten für Referenz-Elektro-Durchlauferhitzer<sup>92</sup> [EUR]

$n_W$  Anzahl an Wohneinheiten pro Gebäude

<sup>90</sup> Falls das Volumen des kleineren Speicher kleiner als 250 l ist, ist der Exponent  $ke$  mit 0,7; ansonsten mit 0,547 festgelegt.

<sup>91</sup> Installationskosten für zentralen Elektro-Warmwasserspeicher sind mit 500 EUR angenommen.

<sup>92</sup> Die Kosten für den Referenz-Elektro-Durchlauferhitzer sind mit 600 EUR (Datenquelle: Herstellerprospekte) angenommen.

- *Warmwasser-Wärmepumpe*

Warmwasser-Wärmepumpen sind für Ein- und Zweifamilienhäuser vorgesehen, die Kosten pro Warmwasser-Wärmepumpe sind mit 2450 EUR festgelegt (Datenquelle: Herstellerprospekte).

- *Solaranlage zur Warmwasserbereitung (elektrische Zusatzheizung)*

Siehe Anhang 11 (Kostenkomponenten für Solaranlagen).

- *Wärmeverteilung bei Einzelsystemen zur Warmwasserbereitung*

$$K_{WW, E, Vtlg} = 450 \cdot n_W^{93} \quad (A.10.7)$$

$K_{WW, E, Vtlg}$       Kosten für Wärmeverteilung bei Einzelsystemen zur Warmwasserbereitung [EUR]

$n_W$               Anzahl an Wohneinheiten pro Gebäude

---

<sup>93</sup> Datenquellen: Bacher (2000), Frey et al. (1994), adaptiert

## Anhang 11: Kostenkomponenten für Solaranlagen

Tabelle A.11.1 zeigt die im Modell verwendeten Werte verschiedener Kostenkomponenten in Abhängigkeit der Gebäudegröße / des Gebäudetyps für Warmwasser-Solaranlagen, Tabelle A.11.2 für Solar-Kombisysteme.

*Tabelle A.11.1: Kostenkomponenten für Solaranlagen zur Warmwasserbereitung in Abhängigkeit der Gebäudegröße, im Modell verwendete Werte, Datenquelle: siehe unten*

Kostenkomponente	Bemerkung	Einheit	Gebäude mit 1 WE	Gebäude mit 2 WE	Gebäude mit 3-10 WE	Gebäude mit > 10 WE
		EUR/m <sup>2</sup>	330	320	275	240
spezifische Kosten Speicher 1	Trinkwasserspeicher (1/2-fam.-Haus), Pufferspeicher (Mehrfam.-Haus)	EUR/l	3,5	3	1,82	1,32
spezifische Kosten Speicher 2	Bereitschafts-(Trinkwasser-)speicher (MFH)	EUR/l	0	0	2,9	2,5
Regelung + Zubehör		EUR	560	840	1232	2128
Leitungen		EUR	250	450	1125	3500
Montage		EUR	950	1425	2185	3610
Planung		EUR	0	0	1450	4000

*Tabelle A.11.2: Kostenkomponenten für Solar-Kombisysteme in Abhängigkeit der Gebäudegröße, im Modell verwendete Werte Datenquelle: siehe unten*

Kostenkomponente	Einheit	Gebäude mit 1 WE	Gebäude mit 2 WE	Gebäude mit 3-10 WE	Gebäude mit > 10 WE
spezifische Kollektorkosten	EUR/m <sup>2</sup>	275	245	220	210
spezifische Kosten Pufferspeicher	EUR/l	1,56	1,32	1,17	1,05
spezifische Kosten Warmwasserspeicher	EUR/l	2,4	1,9	1,2	1,1
Regelung + Zubehör	EUR	1000	1400	2000	3500
Leitungen	EUR	300	540	1320	3000
Montage	EUR	1500	2250	3300	7000
Planung	EUR	300	500	1500	2500

Die in obigen Tabellen angeführten Werte der Kostenkomponenten von Solaranlagen basieren auf eigenen Annahmen, welche sich an folgenden Quellen orientieren:

- „Solaranlagen“, Ladener/Späte (2003)
- „Entwicklung eines Modells zur Optimierung von teilsolaren Heizsystemen“, Frittm (2004)
- „Thermische Solaranlagen für Mehrfamilienhäuser“, Fink et al. (1999)
- „Solare Trinkwassererwärmung mit Großanlagen“, Peuser (1999)
- [www.konsument.at](http://www.konsument.at), Vergleich von 14 Kostenvoranschläge für 3 Tiroler Ein- und Mehrfamilienhäuser
- [www.austriasolar.at](http://www.austriasolar.at), durchschnittliche Kosten für Anlagen für Einfamilienhäuser

## Anhang 12: Annahmen zur Dimensionierung von Solaranlagen

### Solaranlagen zur Warmwasserbereitung

Die wesentlichen Parameter zur Dimensionierung einer Solaranlage sind die Größe der Kollektorfläche und die Größe des Speichers bzw. der Speicher (bei Mehrspeichersystemen). Sowohl für die Dimensionierung der Kollektorfläche als auch des Speichervolumens (bzw. der Speichervolumina) wird jeweils ein spezifischer Wert pro Person mit der Anzahl der Personen pro Gebäude multipliziert. Die Verbesserung des spezifischen solaren Ertrags pro Bruttokollektorfläche ( $Et_{Koll, spez, Verb}$ ) wird berücksichtigt.

$$A_{Koll} = \frac{A_{Koll, P} \cdot n_P}{Et_{Koll, spez, Verb}(t)}$$

$$V_{Sp1} = V_{Sp1, P} \cdot n_P$$

$$V_{Sp2} = V_{Sp2, P} \cdot n_P$$

$A_{Koll}$	Bruttokollektorfläche; [m <sup>2</sup> ]
$A_{Koll, P}$	spezifische Bruttokollektorfläche pro Person; [m <sup>2</sup> ]
$n_P$	Anzahl Personen pro Gebäude
$Et_{Koll, spez, Verb}$	Verbesserung des spezifischen solaren Ertrags pro Bruttokollektorfläche
$V_{Sp1}$	Volumen Speicher 1 [l]
$V_{Sp1, P}$	spezifisches Volumen pro Person Speicher 1 [l]
$V_{Sp2}$	Volumen Speicher 2 [l]
$V_{Sp2, P}$	spezifisches Volumen pro Person Speicher 2 [l]
$t$	aktuelles Jahr

Gebäude mit ein oder zwei Wohneinheiten gemäß Modellierung mit einem Solar-Warmwasserspeicher ( $Sp1$ ) ausgestattet, Gebäude mit mehr als zwei Wohneinheiten weisen neben dem Hauptspeicher ( $Sp1$ ) einen kleineren Bereitschaftsspeicher ( $Sp2$ ) auf.

Tabelle A.12.1: Verschiedene Parameter für die Dimensionierung von Solaranlagen, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: Ladener/Späte (2003), Fritum (2004), Fink et al. (1999), eigene Annahmen

	Gebäude mit 1 Wohneinheit (WE)	Gebäude mit 2 WE	Gebäude mit 3-10 WE	Gebäude mit > 10 WE
$A_{Koll, P}$	1,6	1,6	1,8	1,7
$V_{Sp1, P}$	110	110	110	100
$V_{Sp2, P}$	-	-	25	25

### Solar-Kombisysteme

Solar-Kombisysteme sind generell als mit zwei Speichern (Pufferspeicher, Warmwasserspeicher) ausgestattet modelliert. Während sich die Dimensionierung von Kollektorfläche und Volumen des Pufferspeichers an der Heizlast orientieren, orientiert sich die Dimensionierung des Warmwasserspeichers an der Anzahl der Personen pro Gebäude. Spezifische Werte für Kollektorfläche und Pufferspeicher in Abhängigkeit des Gebäudetyps sind den Tabellen in Anhang 4 zu entnehmen, das spezifische Volumen für Warmwasserspeicher  $V_{Sp,WW,P}$  ist mit 145 Liter/Person festgelegt.

$$A_{Koll} = \frac{A_{Koll,HL} \cdot HL}{Et_{Koll, spez, Verb}(t)}$$

$$V_{Sp, Pu} = V_{Sp, Pu, HL} \cdot HL$$

$$V_{Sp, WW} = V_{Sp, WW, P} \cdot n_P$$

$A_{Koll,HL}$  spezifische Bruttokollektorfläche pro Heizlast; [m<sup>2</sup>/kW]

$HL$  Gebäudeheizlast [kW]

$Et_{Koll, spez, Verb}$  Verbesserung des spezifischen solaren Ertrags pro Bruttokollektorfläche

$V_{Sp, Pu}$  Volumen des Pufferspeichers; [m<sup>3</sup>]

$V_{Sp, Pu, HL}$  spezifisches Volumen pro Heizlast Pufferspeicher; [m<sup>3</sup>/kW]

$V_{Sp, WW}$  Volumen des Warmwasserspeichers; [m<sup>3</sup>]

$V_{Sp, WW, P}$  spezifisches Volumen pro Person Warmwasserspeicher; [m<sup>3</sup>]

$n_P$  Personenanzahl pro Gebäude

### Anhang 13: Kosten von Dämmstoffen und Dämmsystemen

Tabellen A.13.1, A.13.2 und A.13.3 zeigen die Kosten von Dämmstoffen in Abhängigkeit des Bauteils und des Dämmsystems. Dämmstoffe, die für Wärmedämmverbundsysteme geeignet bzw. als Dämmplatten ausgeführt sind, haben eine höhere spezifische Dichte als Dämmstoffe, die in Holzkonstruktionen angewendet werden. Für die billigere Variante der Dämmung der obersten Geschoßdecke werden die Werte als gewichtetes Mittel (40% begehbar, 60% nicht begehbar) berechnet.

*Tabelle A.13.1: Kosten verschiedener Dämmstoffe für Fassadendämmung in Abhängigkeit von Dämmsystem / Dämmstoffdichte, im Modell verwendete Werte, Datenquellen: siehe Ende dieses Anhangs*

Dämmstoff	Fassade – Wärmedämmverbundsystem			Fassade - Dämmung in Holzkonstruktion		
	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	Wärmeleit- fähigkeit $\lambda$ (W/mK)	Kosten (EUR/m <sup>3</sup> )	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	Wärmeleit- fähigkeit $\lambda$ (W/mK)	Kosten (EUR/m <sup>3</sup> )
EPS	20	0,038	95			
Steinwolle	149	0,039	290	30	0,04	90
Glaswolle	153	0,035	290	17	0,04	90
Zellulose				52,5	0,0425	85
Kork (Platten)	115	0,045	220			
Kork (Schrot)						
Flachs				30	0,04	173
Hanf	100	0,0415	247	30	0,0415	101
Schafwolle				15	0,04	138,6
Holzfasерplatten				50	0,039	145
Perlite						

Tabelle A.13.2: Kosten verschiedener Dämmstoffe für Dämmung der obersten Geschößdecke in Abhängigkeit von Dämmsystem / Dämmstoffdichte, im Modell verwendete Werte

	<i>Oberste Geschößdecke – billige Konstruktion (Dämmplatten, Mix: 40% begehbar, 60% nicht begehbar)</i>			<i>Decke – Dämmung in Holzkonstruktion oder Distanzbodensystem</i>		
<i>Dämmstoff</i>	<i>Dichte (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK)</i>	<i>Kosten (EUR/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Dichte (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK)</i>	<i>Kosten (EUR/m<sup>3</sup>)</i>
EPS	21	0,04	90	15	0,04	65
Steinwolle	77,6	0,039	235	28	0,04	100
Glaswolle	71,4	0,038	235	17	0,04	100
Zellulose				42,5	0,0425	66
Kork (Platten)	115	0,045	220			
Kork (Schrot)				100	0,047	160
Flachs				30	0,04	173
Hanf	58	0,0415	159,4	30	0,0415	101
Schafwolle				15	0,04	117
Holzfaserplatten	90	0,04	187,4	50	0,039	145
Perlite				90	0,05	130

Tabelle A.13.3: Kosten verschiedener Dämmstoffe für Dämmung der untersten Geschößdecke in Abhängigkeit von Dämmsystem / Dämmstoffdichte, im Modell verwendete Werte

	<i>Unterste Geschößdecke – billige Konstruktion (Dämmplatten, kellerseitig)</i>			<i>Unterste Geschößdecke – Dämmung in Holzkonstruktion (kellerseitig)</i>		
<i>Dämmstoff</i>						
EPS	15	0,04	65			
Steinwolle	100	0,04	340	28	0,04	100
Glaswolle	67	0,036	340	17	0,04	100
Zellulose				42,5	0,0425	66
Kork (Platten)	115	0,045	220			
Kork (Schrot)				100	0,047	160
Flachs				30	0,04	173
Hanf	100	0,0415	247	30	0,0415	101
Schafwolle				15	0,04	138,6
Holzfaserplatten	150	0,041	251	50	0,039	145
Perlite						

Tabelle A.13.4: Fixe und andere variable Kosten verschiedener Dämmsysteme, im Modell verwendete Werte

	<i>Fassade</i>	<i>Fassade</i>	<i>Ob. Geschoßd.</i>	<i>Ob. Geschoßd.</i>	<i>Ob. Geschoßd.</i>	<i>Unt. Geschoßd.</i>	<i>Unt. Geschoßd.</i>
	<i>Wärmedämmverbundsys.</i>	<i>Holzkonstruktion</i>	<i>Dämmplatten</i>	<i>Holzkonstruktion</i>	<i>Distanzbodensys.</i>	<i>Dämmplatten</i>	<i>Holzkonstruktion</i>
<i>fixe Kosten (EUR/m<sup>2</sup>)</i>	57	85,5	12,5	30	35	15	35
<i>andere variable Kosten (EUR/m<sup>3</sup>)</i>	25	20	10	20	20	15	15
<i>Anteil der Holzkonstruktion</i>	0	0,12	0	0,11	0	0	0,11

Für die Ermittlung von Dämmstoffkosten wurden schwerpunktmässig aktuelle Werte aus Herstellerprospekten herangezogen, sonstige Kosten von Dämmsystemen (Montage, andere Materialien) sind an Werten aus der Literatur orientiert (siehe Auflistung).

Verwendete Quellen für die Ermittlung der Kosten von Dämmstoffen:

- Herstellerprospekte
- „Wärmedämmstoffe im Vergleich“, Sörensen (2000)
- „Hauserneuerung“, Häfele et al. (2003)
- „Vom Altbau zum Niedrigenergiehaus“, Ladener / Feldhaus (1998)

Verwendete Quellen für die Ermittlung der sonstigen Kosten von Dämmsystemen (ohne Dämmstoffe):

- „Wärmeschutzmaßnahmen an Wohngebäuden“, Schuster et al. (2000)
- „Wirtschaftliche und ökologische Optimierung der Heizenergieversorgung“, Haas (1999)
- „Energieeffiziente Wohngebäude“, Schulze Darup (2002)
- „Handbuch für Energieberater“, Frey et al. (1994)
- „Hauserneuerung“, Häfele et al. (2003)
- „Energieeinsparung bei Alt- und Neubauten“, Ebel et al. (2000)
- „Altbaumodernisierung im Detail“, Böhning / Schmitz (2002)
- Projekt „INVERT“, [www.invert.at](http://www.invert.at)
- Herstellerprospekte
- persönliche Auskunft von Herstellern (Messe „Bauen und Energie“)

## Anhang 14: Graue Energie und graue Treibhausgasemissionen für Energieträger und Dämmstoffe

Tabelle A.14.1: Graue Energie bzw. Kumulierter Energieaufwand verschiedener Energieträger

	<i>Kumulierter Energieaufwand (kWh/kWh Endenergie)</i>	<i>Datenquelle</i>
Heizöl EL	1,11	Corradini et al. (1999), S.46, Vergleich Wert GEMIS 4.2 Öst.: 1,096 (Zug-el\Öl-extraleicht-A)
Erdgas	1,25	GEMIS 4.2 Öst. (Erdgas-für-HH-A), Vergleich Wert bei Corradini et al. (1999): 1,126
Kohle/Koks	1,07	GEMIS 4.2 Öst. (Kohle-Mix-A), Schwankungsbreite bei Werten, Corradini et al. (1999): 1,03 (Braunkohle), 1,07 (Steinkohle), GEMIS 4.2 Öst.: 1,06 (Fabrik\StK-Brikett-D), 1,16 (Fabrik\StK-Brikett-PL)
Stückholz	1,044	GEMIS 4.2 Öst. (Xtra-Rest-Holz-Stücke-A)
Waldhackgut	1,09	GEMIS 4.2 Öst., Trocknung\Holz-HS-A: 1,126, Trocknung\Holz-HS-A-Plantage: 1,061
Holzpellets	1,12	GEMIS 4.2 Öst. (LkW-Nah\Holz-Pellet-A-Mistelbach)
Fernwärme Wien	1,055	GEMIS 4.2 Öst., verschiedene Werte
Fernwärme sonst (außerh. v. Wien)	1,25	eigene Annahme
Fernwärme Biomasse	1,45	GEMIS 4.2 Öst. (Netz\Nahwärme-Mix-HS-Waldholz-HW 5 MW)
el. Strom (Österreich Mix)	1,9	GEMIS 4.2 Öst. (Netz-el-hoch-A-El-Park-A + Importe-2001)
el. Strom (Österreich Winter)	2,2	GEMIS 4.2 Öst., Netz-el-hoch-A-El-Park-A-Winter-2001: 2,047 (ohne Importe), Netz-el-lokal-A-kal: 2,2
el. Strom (UCPTE Mix)	2,9	GEMIS 4.2 Öst. (Netz-el-hoch-A-Importe-2001)

Tabelle A.14.2: CO<sub>2</sub>-Äquivalente verschiedener Energieträger (Verbrennung inkl. Vorprozesse)

	CO <sub>2</sub> -Äquivalent (kg/kWh Endenergie)	Datenquelle
Heizöl EL	0,32	Adensam et al. (2002), Externe Kosten I, Seite XIII
Erdgas	0,263	Adensam et al. (2002), Externe Kosten I, Seite XIII
Kohle/Koks	0,45	
Stückholz	0,033	Haas/Kranzl (2002), Anhang III, S. 199
Waldhackgut	0,037	Haas/Kranzl (2002), Anhang III, S. 199
Holzpellets	0,025	Haas/Kranzl (2002), Anhang III, S. 199, Werte schwanken zwischen 0,018 kg/kWh (Pellets aus Sägenebenprodukten) und 0,08 kg/kWh (Pellets aus Kurzumtriebshackgut), Wert für Pelletsmix also umso höher, je geringer der Anteil Produktion aus Sägenebenprodukten
Fernwärme Wien	0,16	Adensam et al. (2002), Externe Kosten I, Seite XIII
Fernwärme sonst (außerh. v. Wien)	0,22	abgeleitet von „Fernwärme Wien“, Korrekturfaktor 1,4
Fernwärme Biomasse	0,045	abgeleitet von Waldhackgut, Korrekturfaktor 1,2
el. Strom (Österreich Mix)	0,273	Adensam et al. (2002), Externe Kosten I, Seite XIII
el. Strom (Österreich Winter)	0,4	eigene Annahme
el. Strom (UCPTE Mix)	0,514	Adensam et al. (2002), Externe Kosten I, Seite XIII

Tab. A.14.3: Graue Energie für verschiedene Dämmstoffe, Vergleich verschiedener Quellen und Berechnungsarten, Datenquellen: Ökologie der Dämmstoffe(Mötzl/Zelger 2000), GEMIS 4.2 Österreich

	Ökologie der Dämmst. Mittelwert	Ökologie der Dämmst. Mittelwert	GEMIS 4.2 Österr.	GEMIS 4.2 Österr.	verwendeter Wert
<u>Dämmstoff</u>	PEI (ohne Energieinh. Dämmstoff), kWh/kg	PEI (mit Energieinh. Dämmstoff), kWh/kg	KEV (kWh/kg)	KEA (kWh/kg)	kWh/kg
EPS	14,8	27,3	8,5	27,8	14,8
Steinwolle	5,7	-	2,7	2,7	4,2
Glaswolle	10,6	-	7,8	8,5	9,2
Zellulose	1,3	-	0,5	-	1,3
Kork	3,1	8,4	-	-	3,1
Flachs	10	14,6	-	-	10
Hanf	4,5	9,4	-	-	4,5
Schafwolle	3,9	9,2	-	-	3,9
Holzfaserdämm- patte	6,3	12,2	2,8	2,9	4,6
Exp. Perlit	2,9	-	-	-	2,9

Tab. A.14.4: CO<sub>2</sub>-Äquivalente für die Herstellung verschiedener Dämmstoffe, Vergleich verschiedener Quellen und Berechnungsarten, Datenquellen: Externe Kosten I (Adensam et a. 2002), GEMIS 4.2 Österreich, Ökologie der Dämmstoffe(Mötzl/Zelger 2000)

<u>Dämmstoff</u>	Ext. Kosten I (mit CO <sub>2</sub> -Gutschrift)	GEMIS 4.2 Öst. (ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift)	Ökologie der Dämmst. (mit CO <sub>2</sub> -Gutschrift)	Ökologie der Dämmst. (ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift)	verwendeter Wert (ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift)	verw. Wert (pro Vol.)
	CO <sub>2</sub> -Äquivalente (kg/kg)					(kg/m <sup>3</sup> )
EPS	4	4,8	2,9	2,9	3,8	76,8
Steinwolle	-	0,92	1,4	1,4	1,16	35 – 174,5
Glaswolle	1,7	1,55	1,9	1,9	1,73	34,7 - 260
Zellulose	0,5	-	0,23	0,23	0,37	14,6 - 20,1
Kork	-1,3	-	-1,4	0,28	0,28	32,2
Flachs	0,22	-	0,3	1,35	1,35	40,4
Hanf	-1,1	-	-0,55	0,27	0,27	8
Schafwolle	-0,7	-	0,1	0,57	0,57	8,6
Holzfaserdämm- patte	-	0,25	-0,4	0,78	0,52	26 – 77,7
Exp. Perlit	0,54	-	0,52	0,52	0,53	48

## Anhang 15: Externe Kosten, graue Energie und graue Treibhausgasemissionen für Fenster und Fensterteile

Tabelle A.15.1: Kennwerte (externe Kosten, CO<sub>2</sub>-Äquivalente, Kumulierter Energieverbrauch) verschiedener Fenstertypen, im Modell verwendete Werte, Datenquelle: eigene Berechnungen basierend auf Daten von GEMIS 4.2 Österreich, für Holzfenster ( $U_F=1,3$ ) Werte direkt von GEMIS 4.2 übernommen (Bauelement-Fenster-Holz-gedämmt-A)

Fenstertyp	U-Wert Glas (W/m <sup>2</sup> K)	min. ext. Kosten (EUR/m <sup>2</sup> )	max. ext. Kosten (EUR/m <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> -Äqu. (kg/m <sup>2</sup> )	KEV (kWh/m <sup>2</sup> )
PVC-Fenster, $U_F=1,3$	1,1	4,41	7,96	93,3	294
PVC-Fenster, $U_F=1,1$	0,9	5	8,94	105,7	333
PVC-Fenster, $U_F=0,8$	0,4 – 0,7	5,9	10,4	124,2	391,4
Holzrahmen-Fenster, $U_F=1,3$	1,1	3,16	5,8	70,5	233,3
Holzrahmen – Fenster, $U_F=1,1$	0,9	3,65	6,53	80,15	265
Holzrahmen – Fenster, $U_F=0,8$	0,4 – 0,7	4,3	7,8	94,6	312,5

Tabelle A.15.2: Verwendete Werte für Fensterbilanzierungen

Fensterteil	min. ext. Kosten (EUR/kg)	max. ext. Kosten (EUR/kg)	CO <sub>2</sub> -Äqu. (kg/kg)	KEV (kWh/kg)	Datenquelle
Wärmeschutzglas $U=1,1$	0,06	0,1	1,16	3,53	GEMIS 4.2 Öst. „Steine-Erden\Glas-flachcoat“
Wärmeschutzglas $U=0,4 – 0,7$	0,085	0,14	1,6	4,9	eig. Berechnung, Korrekturfaktor 1,39 zu Glas $U=1,1$
Fensterrahmen PVC gedämmt	0,126	0,24	2,87	9,2	GEMIS 4.2 Öst., „Fabrik\Fensterrahmen-PVC“, Korrekturfaktor 1,1
Fensterrahmen PVC super-gedämmt	0,16	0,3	3,73	12	eig. Berechnung, Korrekturfaktor 1,3 im Vgl. zu „Fensterrahmen PVC gedämmt“
Fensterrahmen Holz gedämmt	0,12	0,24	3,2	11,4	Eigene Berechnung, basierend auf Daten v. GEMIS 4.2 Öst.
Fensterrahmen Holz super-gedämmt	0,15	0,31	4,15	14,8	eig. Berechnung, Korrekturfaktor 1,3 im Vgl. zu „Fensterrahmen Holzgedämmt“

*Tabelle A.15.3: Berechnungsannahmen bzgl. Massen Glas und Rahmen nach Fenstertyp, Quelle der Massenangaben: GEMIS 4.2 Österreich*

Fenstertyp	Masse Glas (kg)	Masse Rahmen (kg)
PVC-Fenster	30	20,4
Holzfenster	30	11,2

**Anhang 16: Externe Kosten, graue Energie und graue Treibhausgasemissionen für verschiedene Werkstoffe**

*Tabelle A.15.1: Spezifische Werte (externe Kosten, CO<sub>2</sub>-Äquivalent, kumulierter Energieverbrauch) pro Werkstoff, Angaben in Klammer in Spalte "KEV GEMIS 4.2" beziehen sich auf Bezeichnungen in GEMIS 4.2*

Werkstoff	min. ext. Kosten (EUR/kg)	max. ext. Kosten (EUR/kg)	CO <sub>2</sub> -Äquivalent (kg/kg)	KEV (verwendet) (kWh/kg)	KEV GEMIS 4.2 (kWh/kg)	KEV FFE (kWh/kg)
Stahl hochlegiert	0,86	1,08	6	7,3	5,5 (Stahl-D-Mix)	4,5 (Stahl - Mix Deutschland)
Stahl niedriglegiert	0,07	0,15	2,21	4,8		
Stahl unlegiert	0,06	0,12	1,8	4		
Stahlblech (verzinkt)	0,11	0,22	3,16	7,9	9,8 (Stahl-D-Blech-verzinkt)	
Aluminium (50% Recyclinganteil)	0,26	0,52	7,18	52,1	61,2 (Alum. - mix-D)	43,1 (Alum.-mix)
Kupfer	0,43	0,62	5,5	12,2	13,8 (Kupfer-D-mix)	10,7 (Kupfer-Mix)
Glaswolle	0,06	0,12	1,7	9,2		
Polyurethan	0,46	0,96	13,7	14,4	16 (PUR-Hartschaum)	26,1 (PU-Hartschaum)
Polypropylen	0,18	0,3	3,35	8,6	8,6	
Polyethylen HD	0,11	0,2	2,51	4,3	4,3 (HDPE-A)	
Kantschnittholz	-0,03	-0,08	-1,42	0,6	0,6 (Schnittholz-mix-Trok-Fichte-A)	
Keramik	0,012	0,026	0,37	2,3	2,3 (Refraktär-Keramik-A)	
Beton					0,22 (Beton-A)	
Beton PC 100	0,002	0,004	0,05	0,37		
Beton PC 300	0,004	0,009	0,13	0,8		
Flachglas unbeschichtet	0,03	0,07	1,02	3,3	3,3 (Glas-flach-A)	

## LEBENS LAUF

### Persönliche Angaben:

*Name:* Ernst Schriefl  
*akad. Titel:* Dipl. Ing.  
*Anschrift:* Benedikt-Schellinger-G. 21/40  
1150 Wien  
*Geburtsdatum* 2.4.1969  
*Familienstand:* ledig  
*Staatsbürgerschaft:* Österreich

### Schulbildung:

1975 – 1979 Volksschule in Müllendorf  
1979 – 1987 Bundesgymnasium und –realgymnasium in Eisenstadt

### Universitäre Bildung:

1987 – 1994 Studium der Informatik an der TU Wien; Abschluß mit Dipl. Ing.  
1994 – 2000 Aufbaustudium Technischer Umweltschutz,  
währenddessen Erwerb von Kenntnissen in  
energiewirtschaftsrelevanten Bereichen u.a. durch die  
Mitwirkung an Projektarbeiten  
Abschluß mit „Diplomierter Umwelttechniker“, Diplomarbeit  
ausgeführt am Institut für Energiewirtschaft, Titel: „Einflüsse  
von Lebensstil, sozio-kulturellem Hintergrund und  
psychologischen Faktoren auf das Energieverbrauchsverhalten  
privater Haushalte“

### Zivildienst:

1997/98 abgeleistet im Werkstätten- und Kulturhaus (WUK), 1090 Wien

### Beruflicher Werdegang:

1999 – 2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiewirtschaft,  
TU Wien (bzw. seit 2001 Institut für elektrische Anlagen und  
Energiewirtschaft, Arbeitsgruppe Energiewirtschaft)  
2002 – 2004 Projektmitarbeiter am „Wiener Zentrum für Energie, Umwelt  
und Klima“  
seit 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für elektrische  
Anlagen und Energiewirtschaft, Arbeitsgruppe  
Energiewirtschaft

### **Bisherige und aktuelle inhaltliche Arbeitsschwerpunkte:**

- Erstellung von Simulationsmodellen zur Einschätzung der Entwicklung von mittel- und langfristigen Treibhausgasemissionen, Energieverbrauch und Technologiewahl für Wohngebäude in Österreich
- Wirksamkeit energiepolitischer Instrumente auf Technologieinnovation und –diffusion
- Energetische Reboundeffekte bei der Sanierung von Wohngebäuden
- Hemmnisse und fördernde Faktoren bei der Markteinführung von innovativen Technologien in Wohngebäuden
- Analyse des Nutzerverhaltens in innovativen Wohn- und Bürogebäuden
- Analyse des Nutzer- und Investitionsverhaltens in privaten Haushalten, die Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energieträger einsetzen

### **Mitarbeit an Forschungsprojekten:**

- „Optimal Supply of Residential Buildings with Energy Services from Society’s point-of-view. An application to Austria“ (FWF, P155598-N07, 2004-2006)
- „Maßnahmen zur Minimierung von Rebound-Effekten bei der Sanierung von Wohngebäuden (MARESI)“ (BMVIT „Haus der Zukunft“, 2003/2004)
- „Die Auswirkung energiepolitischer Instrumente auf Technologieinnovation und –diffusion in Österreich“ (ÖNB, 2002/2003)
- „Hemmnisse und fördernde Faktoren bei der Markteinführung innovativer Wohnbauten – eine Informationsoffensive für Planer und Technologieproduzenten“ (BMVIT „Haus der Zukunft“, 2001/2002)
- „Analyse des NutzerInnenverhaltens und der Erfahrungen von BewohnerInnen bestehender Wohn- und Bürobauten mit Pilot- und Demonstrationscharakter“ (BMVIT „Haus der Zukunft“, 2000/2001)
- „Analyse fördernder und hemmender Faktoren bei der Markteinführung von innovativen Wohnbauten“ (BMVIT „Haus der Zukunft“, 2000/2001)
- „Erneuerbare Energieträger und Energieverbrauchsverhalten“ (bm:vv, 1998-2000)