IPP-Report

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Joachim Herrmann

Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Potential von klein-Blockheizkraftwerken

Efficiency, Economics and Potential of mini Combined Heat and Power Units

IPP 16/8
Mai, 2006

Abkürzungen und Symbole

	Abkürzungen
Bat	Batterie
BHKW	Blockheizkraftwerk
EnEV	Energie-Einspar-Verordnung
G	Gasheizung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
N	Netzanschluss
SaE	Stromanteil am Gesamtenergiebedarf
WP	Wärmepumpe
	Symbole
A_N	Energiebezugsfläche
d	Dicke
E_{auf}	vom Prozess aufgenommene Energie
E_{N_S}	Energienachfrage nach Strom
E_{N_W}	Energienachfrage nach Wärme
G_S	Globalstrahlungsenergie
G'_S	Leistung der Globalstrahlung
G_t	Heizgradstunden
$\mathrm{K}_{Inst.Ges.}$	mittlere Installationskosten
K_{Var}	Variable Kosten, im Allgemeinen Energiebezugskosten
k_{Inst}	mittlere annuitätische Installationskosten
n_L	Luftwechselrate
P_I	Leistung interne Gewinne
P_L	Leistung Lüftungsverluste
P_S	Leistung solare Gewinne
P_T	Leistung Transmissionsverluste
Q	Wärmemenge
q	Wärmestromdichte
$R = 1/\alpha$	Wärmeübergangswiderstand
T	Temperatur
t_L	mittlere Lebensdauer der Prozesse
U-Wert	Wärmeüberbrückungszahl
V_L	Luftvolumen
ϵ	Emissionsgrad
η	Wirkungsgrad
λ	Wärmeleitkoeffizient
Φ	Wärmestrom, Wärmeleistung

Tabelle 0.1.: Abkürzungen und Symbole.

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation **7**

2. Einleitung **9**

3. Energienachfrage von Haushalten **11**
3.1. Stromnachfrage . . . 11
3.2. Wärmenachfrage . . . 16
3.2.1. Raumwärmenachfrage . . . 16
3.2.2. solare- und interne Gewinne . . . 23
3.2.3. Heizwärmebedarf . . . 26
3.2.4. Warmwassernachfrage . . . 27

4. Energieversorgung **29**
4.1. Stromversorgung . . . 29
4.1.1. Kraftwerkspark . . . 29
4.1.2. Stromverteilungsnetze . . . 31
4.2. Brennstoffe . . . 33
4.2.1. Erdgas . . . 33
4.3. Fernwärme . . . 35

5. Prozesse zur Energieumwandlung, zum Energieanschluss bzw. zur Speicherung **37**
5.1. Strom . . . 37
5.1.1. Anschluss an das öffentliche Stromnetz . . . 37
5.1.2. Photovoltaikanlage (PV) . . . 38
5.2. Wärme . . . 40
5.2.1. Gasheizung . . . 40
5.2.2. Pelletheizung . . . 42
5.2.3. Solarkollektor . . . 43
5.2.4. Wärmepumpe . . . 44
5.3. Speicher . . . 45
5.3.1. Strom . . . 46
5.3.2. Warmwasser . . . 47
5.4. Blockheizkraftwerke . . . 48
5.5. Hilfsprozesse . . . 49
5.6. Zusammenfassung . . . 50

6. Blockheizkraftwerke **51**
6.1. Modelle . . . 51
6.1.1. PowerPlus Technologies GmbH ecopower Mini-BHKW . . . 51
6.1.2. Solo Stirling GmbH Solo Stirling 161 . . . 52
6.1.3. Viessmann SOFA 3 . . . 52

6.2. Einsatzbereiche von Blockheizkraftwerken . . . 53
6.2.1. Variation der Energie- und Installationskosten . . . 59
6.3. Effektivität eines BHKW aufgrund des Jahresenergiebedarf . . . 62
6.4. Effektivität eines BHKW aufgrund des monatlichen Energiebedarfs . . . 66
6.5. Verteilung der Kosten auf Wärme und Strom . . . 67

7. Modellierung möglicher Szenarien 71
7.1. Modellierung der Nachfrage . . . 71
7.1.1. Monte Carlo Simulation der Stromnachfrage . . . 71
7.1.2. Monte Carlo Simulation der Warmwassernachfrage . . . 81
7.1.3. Heizwärmebedarf . . . 82
7.2. Modellierung von Gebäuden . . . 89
7.2.1. Einfamilienhaus . . . 90
7.2.2. Zweifamilienhaus . . . 91
7.2.3. Mehrfamilienhaus 3 . . . 92
7.2.4. Mehrfamilienhaus 6 . . . 93
7.2.5. Mehrfamilienhaus 12 . . . 94
7.2.6. Mehrfamilienhaus 26 . . . 95
7.2.7. Zusammenfassung . . . 96

8. Optimierung ausgesuchter Modelle 97
8.1. Blockheizkraftwerke in Einfamilienhäusern . . . 99
8.2. Einfluss der Gebäudegröße . . . 110
8.3. Einfluss des Dämmstandards der Gebäude . . . 117
8.4. Einfluss der Warmwassernachfrage . . . 121
8.5. Einfluss eines Leistungspreises für Netzstrom . . . 128
8.6. ergänzende Szenarien . . . 130

9. Diskussion 135

A. Anhang 149
A.1. Daten zu den Prozessen . . . 149
A.1.1. PV-Anlage . . . 149
A.1.2. Gasheizung . . . 149
A.1.3. Pelletheizungen . . . 150
A.1.4. Sonnenkollektoren . . . 151
A.1.5. Wärmepumpe . . . 151
A.1.6. Akkumulatoren . . . 151
A.1.7. Warmwasserspeicher . . . 152
A.2. Gebäudemodelle . . . 153
A.3. Strommodelle . . . 154
A.4. Typtage (Wetterrepräsentanten) . . . 155

1. Motivation

In Deutschland wird die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) auf Grundlage des Gesetzes für die Erhaltung, Modernisierung und Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz) vom 19. März 2002 staatlich gefördert. „Dieses Gesetz regelt die Abnahme und die Vergütung von Kraft-Wärme-Kopplungsstrom (KWK-Strom) aus Kraftwerken mit KWK-Anlagen auf Basis von Steinkohle, Braunkohle, Abfall, Biomasse, gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen ...“[1]

„(1) Bis zum Jahr 2005 soll im Vergleich zum Basisjahr 1998 durch die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung eine Minderung der jährlichen Kohlendioxid-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland in einer Größenordung von 10 Millionen Tonnen und bis zum Jahr 2010 von insgesamt bis zu 23 Millionen Tonnen, mindestens aber 20 Millionen Tonnen, erzielt werden.

(2) Zweck des Gesetzes ist es, zu dem in Absatz 1 genannten Ziel einen Beitrag zu leisten durch den befristeten Schutz und die Modernisierung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) sowie den Ausbau der Stromerzeugung in kleinen KWK-Anlagen und die Markteinführung der Brennstoffzelle im Interesse der Energieeinsparung, des Umweltschutzes und der Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung.“[2]

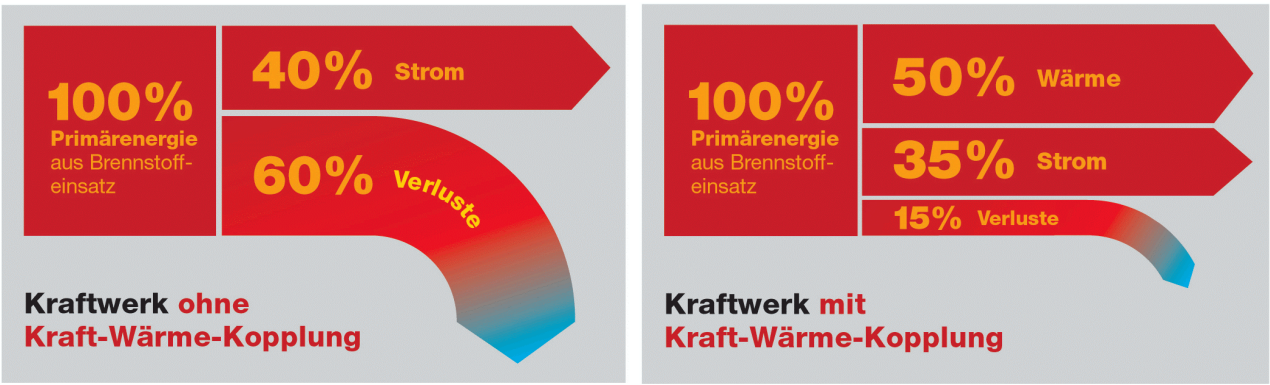


Abbildung 1.1.: *links:* schematischer Energiefluss in Kraftwerken zur Stromproduktion ohne die Nutzung der frei werdenden Wärme (ohne Kraft-Wärme-Kopplung); *rechts:* schematischer Energiefluss in Kraftwerken, in denen neben dem generierten Strom auch die erzeugte Wärme genutzt wird. *Quelle:* Stadtwerke Karlsruhe.

Die Grundidee die hinter dem KWK-Gesetz zur Energie-Einsparung und zur Verringerung der CO_2-Emissionen steckt ist in Abbildung 1.1 zu sehen.

[1] *Quelle:* KWK-Gesetz 2002 §2.
[2] *Quelle:* KWK-Gesetz 2002 §1 Absatz 1 und 2.

In vielen thermischen Kraftwerken [3] geht ein beachtlicher Teil der zur Produktion von elektrischem Strom verbrauchten Energie in Form von Wärme ungenutzt verloren (siehe Abbildung 1.1 *links*). Dies beruht auf der Tatsache, dass in diesen Kraftwerken erzeugte Wärme von Wärmekraftmaschinen erst in mechanische und dann mittels Generatoren in elektrische Energie umgewandelt wird [4]. Für die Umwandlung von Wärme in mechanische Energie ergibt sich ein, durch den Carnot-Prozess limitierter, maximaler Wirkungsgrad. Bleibt die nicht umwandelbare Wärme ungenutzt, ergeben sich Wirkungsgrade der Energieausnutzung von ca. 40 % bis maximal 60 % für moderne GuD Kraftwerke [5]. Nutzt man demgegenüber diese, für die Stromerzeugung nicht zu verwendende „Abwärme“, zum Beispiel zur Deckung der Wärmenachfrage umliegender Gebäude (oder Städte), so kann dementsprechend der Bedarf an sonstigen Wärmequellen reduziert oder ganz vermieden werden. Diese Verwendung, sowohl des erzeugten Stromes, als auch der dabei anfallenden Wärme wird Kraft-Wärme-Kopplung genannt. Bei der Kraft-Wärme-Kopplung wird ein wesentlich größerer Teil der eingesetzten Energie zur Deckung von Nachfragen genutzt. Dadurch erhöht sich der Gesamtwirkungsgrad deutlich (siehe Abbildung 1.1 *rechts*), was den Gesamtausstoß an Kohlendioxid zur Deckung von Wärme- und Stromnachfragen verringert.

KWK-Anlagen, die ungefähr im Leistungsbereich von einigen kW (elektrisch) bis zu einigen MW (elektrisch) liegen werden als Blockheizkraftwerk (BHKW) bezeichnet, Anlagen mit einer elektrischen Leistung von ca. 1 kW bis ca. 25 kW als Klein- Blockheizkraftwerke.

Die in Abbildung 1.1 dargestellten Schemata für die Nutzung der Energie ohne bzw. mit Kraft-Wärme-Kopplung zeigen die Idee bzw. die Motivation, die hinter diesem Konzept steht sehr deutlich. Jedoch berücksichtigt sie nur eine sehr einfache Betrachtung des Problems. In diesem vereinfachten Modell wird dem Zusammenspiel zwischen Energienachfrage und -angebot nicht Rechnung getragen. Dabei kann der zeitliche Verlauf der Energienachfrage und des Energieangebots der Güter Wärme und Strom eine entscheidende Rolle für die Effektivität von Kraft-Wärme-Kopplung spielen. Weiter wird auf dieser Ebene eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Kraft-Wärme-Kopplung außer Acht gelassen.

Die Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung, besonders im Bereich von Anlagen mit kleinen elektrischen Leistungen und deren etwaigen Voraussetzungen genauer zu bestimmen, ist das Ziel dieser Arbeit. Aus dieser Motivation heraus ist das Thema der Diplomarbeit:

„Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Potential von Klein- Blockheizkraftwerken.“

[3] Verbrennungskraftwerke mit Kohle, Gas oder Öl als Brennstoff und Atomkraftwerke mit Kernfission von Uran als Wärmelieferant. Atomstrom ist jedoch aus Gründen der Sicherheit eher nicht KWK-fähig.

[4] hier stellen beispielsweise Photovoltaikanlagen eine Ausnahme dar. Diese erzeugen durch elektronische Anregung ein elektrisches Potential und generieren somit einen Stromfluss.

[5] Gas und Dampf Kraftwerke

2. Einleitung

Um Blockheizkraftwerke beurteilen zu können, wurde zunächst der Energiebedarf von Haushalten bzw. Wohngebäuden mit mehreren Haushalten und dessen zeitlicher Verlauf betrachtet. Es wurden spezifische Eigenschaften von Strom-, Raumwärme- und Warmwassernachfrage bestimmt und beschrieben. Es wurde nur der Sektor Haushalte untersucht. Dazu konnte unter anderem auf Datenmaterial zweier Stadtwerke zurückgegriffen werden. Des Weiteren wurde die Energieversorgung durch Kraftwerke und Verteilnetze beleuchtet.

Im folgenden Arbeitsschritt wurden Daten für Versorgungseinheiten, welche zur Deckung von Energienachfragen in Haushalten benutzt werden, zusammengetragen. Solche Einheiten sind beispielsweise eine Gasheizung, ein Anschluss an das Stromnetz oder eine Pelletheizung. Aus diesen Daten konnten den Prozessen Eigenschaften wie Installationskosten oder Wirkungsgrade zugeordnet werden. Besonderes Augenmerk wurde bei der Datensuche auf Blockheizkraftwerke mit kleiner elektrischer Leistung gelegt.

Daraufhin wurden Blockheizkraftwerke gesondert betrachtet. Zunächst wurden dazu drei verschiedene Systeme beschrieben, welche die Kraft-Wärme-Kopplung nutzen. Anschließend konnten anhand von theoretischen Überlegungen Blockheizkraftwerken bestimmte Eigenschaften zugeordnet werden. Ferner wurde betrachtet, in wie weit sich diese Eigenschaften positiv auf Kosten und Effizienz der Energieversorgung von Gebäuden auswirken können. Es wurde beleuchtet, wie die von einem Blockheizkraftwerk erzeugte Wärme und der erzeugte Strom einen Beitrag zum Jahresenergiebedarf von Haushalten leisten können. Da diese Abschätzung viele Einflüsse vernachlässigt, wurde das Potential von Blockheizkraftwerken zur Deckung von Haushaltsnachfragen der Güter Wärme und Strom auch auf einer kleineren Zeitskala untersucht. Als Grundlage hierfür wurden monatliche Energienachfragen ermittelt.

Um eine noch genauere Methode zu erhalten, einen möglichen Einsatz von Blockheizkraftwerken im Haushaltssektor zu bewerten, wurden verschiedene Haushalte und Gebäude modelliert und nach kostengünstigster Variante der Energieversorgung linear optimiert. Um dies zu erreichen war eine umfangreiche Analyse verschiedenster Daten von Nöten. Zur Modellierung der Strom- und Warmwassernachfrage wurde aus einer Vielzahl an statistischen Werten, wie z.B. Fernsehgewohnheiten, Anzahl elektrischer Geräte pro Haushalt oder Warmwasserverbrauch pro Person ein Programm erstellt, welches nach den Regeln einer Monte-Carlo-Simulation eine minutengenaue Nachfragekurve für Warmwasser- und Strombedarf eines Haushalts erstellt. Zur Ermittlung des Raumwärmebedarfs der Modelle wurden die thermischen Hüllen der Modellgebäude mit verschiedenen Dämmeigenschaften versehen. Weiter wurden Wetterdaten untersucht und aus Temperatur und Globalstrahlungsdaten das Wetter eines

Jahres anhand von fünf ausgesuchten Typtagen (Repräsentanten) modelliert. Aus diesem Modellwetter für ein Jahr und den thermischen Eigenschaften der Gebäude konnte der Raumwärmebedarf der Modelle berechnet werden. Zur Deckung der Nachfrage der Modelle wurden verschiedene Prozesse berücksichtigt.

Die erstellten Modellgebäude mit den generierten Energienachfragen nach Strom und Wärme wurden mit Hilfe von NEW-URBS [1] nach kostenminimaler Deckung der Nachfrage optimiert. In den Optimierungen der Modelle wurden verschiedene Aspekte mit besonderem Interesse verfolgt. Erster Punkt des Interesses war die Untersuchung, in wie weit Blockheizkraftwerke mit „herkömmlichen“ Prozessen zur Versorgung, wie beispielsweise einem Netzanschluss oder einer Gasheizung, harmonieren. Ebenfalls wurde betrachtet, welche Eigenschaften die Energieverbrauche von Haushalten aufweisen sollten, sodass eine Versorgung mittels BHKW vorteilhaft ist. Dazu wurden verschiedene Gebäudegrößen bis hin zu, durch Nahversorgungsnetze verknüpfte Gebäudegruppen bearbeitet. Ein weiterer Aspekt der Untersuchungen war, welchen Einfluss das Verhältnis von Raumwärme- zu Warmwasserbedarf hat. Dies ist mit der Tatsache begründet, dass zum Einen Gebäude mit immer höherem Dämmstandart gebaut werden [2], was zu einer Verringerung des spezifischen Raumwärmebedarfs führt, zum Anderen steigt der Warmwasserbedarf aufgrund von wachsenden Komfortansprüchen in der Bevölkerung an.

Als weitere Fragestellung wurde verfolgt, ob durch die Nutzung dezentraler Stromproduktion in Blockheizkraftwerken eine Verringerung der Spitzenstromlast der Stromnetze erreicht werden kann. Insbesondere, ob es möglich ist, die Auslastung der Netze zu steigern.

[1] Programm zur linearen Optimierung von Energiemodellen nach minimalen Gesamtkosten.

[2] Der Primärenergiebedarf, bzw. der Heizwärmebedarf ist seit dem 16. November 2001 durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) reglementiert.

3. Energienachfrage von Haushalten

Spricht man von einer Energienachfrage ist im Allgemeinen der Bedarf an Energie in einer bestimmten Zeitperiode $\frac{E}{\Delta t}$, wie der Strombedarf eines Haushalts pro Jahr oder der Warmwasserbedarf einer Person pro Tag gemeint. Der Energiebedarf eines Menschen für die Erhaltung der Lebensfunktionen beispielsweise liegt im Größenordnungsbereich von 25 - 30 kcal pro Tag und pro kg Körpergewicht [1]. Dies entspricht einer durchschnittlichen Leistung von ca. 100 W für die lebenswichtigen Körperfunktionen. Die gesamte Energienachfrage eines Menschen setzt sich aus diesem Grundenergieumsatz und dem zusätzlichen, durch die jeweilige Tätigkeit des betreffenden Menschen resultierenden Energieumsatz zusammen. Schläft die Person ist dieser zusätzliche Energieumsatz gleich Null, übt sie dagegen eine Tätigkeit mit großer körperlicher Anstrengung aus, wie beispielsweise Treppensteigen, Rudern oder Laufen, so macht dieser zusätzliche Energieumsatz einen großen Anteil am Gesamtumsatz des Menschen aus. Der zusätzliche Energiebedarf ist darüber hinaus von äußeren Umständen, wie der Temperatur, der getragenen Bekleidung und vielem mehr abhängig. Die Unzahl der Einflüsse machen eine genaue Validierung des Energiebedarfs eines Menschen unmöglich. Jedoch ist es sehr wohl möglich, gewissen Einflüssen qualitative Auswirkungen und Tendenzen zuzuordnen und diese mit Durchschnittswerten der Leistungsnachfrage zu belegen.

Ähnlich komplex, wie der Versuch den Energieverbrauch eines Menschen in der Zukunft zu bestimmen, ist dieses Unterfangen bei Haushalten. Auch hier ist die Nachfrage nach Energie bzw. Leistung von vielen Umständen abhängig. Diese Umstände sind z.B. die Anzahl der anwesenden Personen, die Qualität des abendlichen Fernsehprogramms, das Raumwärmeverlangen der Bewohner, die Anzahl und Ausrichtung der Fenster, die Bade- und Duschgewohnheiten usw. So ist es unmöglich eine allgemeingültige Aussage für die Energienachfrage von Haushalten aufzustellen. Aufgrund der großen Anzahl an Haushalten [2] lassen sich jedoch statistische Aussagen über Energienachfragen ermitteln.

3.1. Stromnachfrage

Die Stromnachfrage ist der Bedarf nach elektrischer Energie. Heute wird dieser Bedarf hauptsächlich durch große, dezentrale Kraftwerke gedeckt und über das Stromnetz der Netzbetreiber verteilt [3]. Statistische Werte [4] zum Strombedarf sind in den Tabellen 3.1 und 3.2 zu sehen.

Der zeitliche Verlauf der Stromnachfrage wird als Lastgang bezeichnet. Der Lastgang der elektrischen Energie eines Haushalts setzt sich zusammen aus den Lastgängen aller, im Haushalt befindlicher

[1] *vergleiche* S. Marsch 2002 Seite 946. Entspricht in etwa 1,4 W pro kg Körpergewicht.
[2] 39 Millionen bewohnte Wohneinheiten in Wohngebäuden in Deutschland. *Quelle* DESTATIS [a] (2005)
[3] eine genauere Beschreibung der Strombereitstellung ist in Kapitel 4 gegeben.
[4] *vergleiche* M. Barbosa (2004) Tabellen 2.2-18 und 2.2-19

Haushalte pro Gebäude	kWh je Haushalt	kWh je m^2
Einfamilien	4063	31,1
Zweifamilien	3624	32,8
Drei- bis Vierfam.	2721	32,1
Fünf- bis Zehnfam.	2188	31,2
Elf- und mehr Fam.	1908	29,3
Insgesamt	3132	31,3

Tabelle 3.1.: Stromverbrauch pro Jahr je Haushalt und spezifischer Stromverbrauch pro m^2 pro Jahr je Haushalt in Abhängigkeit der Anzahl an Haushalten pro Wohngebäude (nur Haushalte ohne Elektrospeicheröfen). *Quelle:* M. Barbosa (2004) Tabelle 2.2-18.

Personen pro Haushalt	kWh je Haushalt	kWh je m^2
1 Person	1768	25,0
2 Personen	3090	30,6
3 Personen	3923	34,5
4 Personen	4431	34,9
5 und mehr Personen	5328	36,0
Insgesamt	3132	31,3

Tabelle 3.2.: Durchschnittlicher Stromverbrauch pro Jahr je Haushalt und durchschnittlicher spezifischer Stromverbrauch pro m^2 und pro Jahr in Abhängigkeit der Anzahl an Personen eines Haushalts (nur Haushalte ohne Elektrospeicheröfen). *Quelle:* M. Barbosa (2004) Tabelle 2.2-19.

elektrischer Geräte die an das Netz angeschlossen sind. Lastgänge eines Haushalts zweier aufeinander folgender Tage können höchst unterschiedlich sein. In Abbildung 3.1 sind typische Lastgänge [5] für den Haushaltssektor zu sehen.

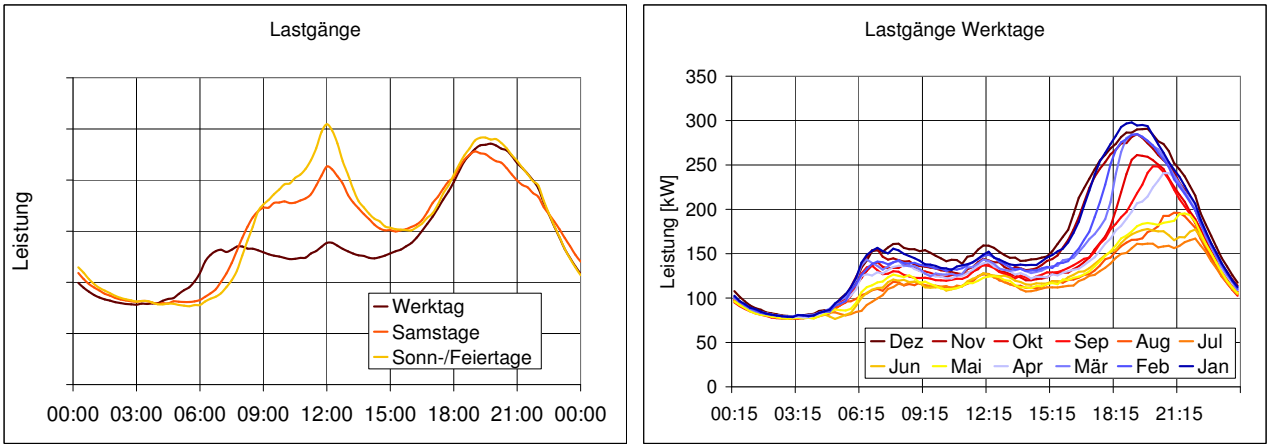


Abbildung 3.1.: *links:* durchschnittlicher Tageslastgang von Haushalten für Werk-, Sams- und Sonn- und Feiertage. *Quelle:* DREWAG; *rechts:* mittlerer Lastgang von Haushalten für Werktage in Abhängigkeit des Monats *Quelle:* DREWAG

Zur genaueren Bewertung von Lastgängen standen zusätzlich Daten [6] der Stadtwerke Augsburg von

[5] *Quelle:* DREWAG, Stadtwerke Dresden GmbH
[6] *Quelle:* Stadtwerke Augsburg

1997 und 1998 zur Verfügung. Die Daten enthalten die durchschnittlich von den Stadtwerken abgegebene elektrische Leistung in Abhängigkeit der Zeit. Die zeitliche Auflösung der Daten ist 15 Minuten. Die Stadtwerke Augsburg beliefern neben Privathaushalten auch Gewerbe- und Industriekunden mit Strom. Jedoch ist die Nachfragekurve nicht nach diesen Nachfragegruppen aufgesplittet, sondern beinhält die Summe der Nachfragen aller drei Sektoren.

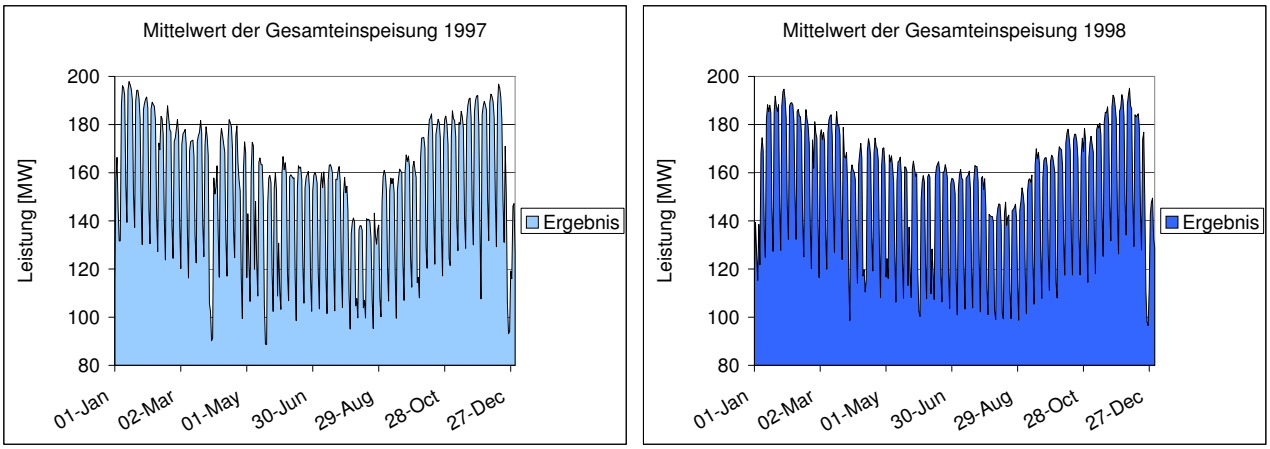


Abbildung 3.2.: Verlauf der von den Stadtwerken Augsburg 1997 (*links*) und 1998 (*rechts*) abgegebenen elektrischen Leistung. *Quelle:* Stadtwerke Augsburg

Bei genauerer Betrachtung der Nachfragekurven können gewisse Regelmäßigkeiten erkannt werden. Dazu wurden die Lastgänge von 1997 analysiert. Die minimale Stromnachfrage lag im Jahr 1997 bei 64 MW, die maximale bei 232 MW. Im Jahresdurchschnitt wurden eine Leistung von 152 MW abgegeben. In Abbildung 3.3 sind Tages- und Monatsmittel dargestellt.

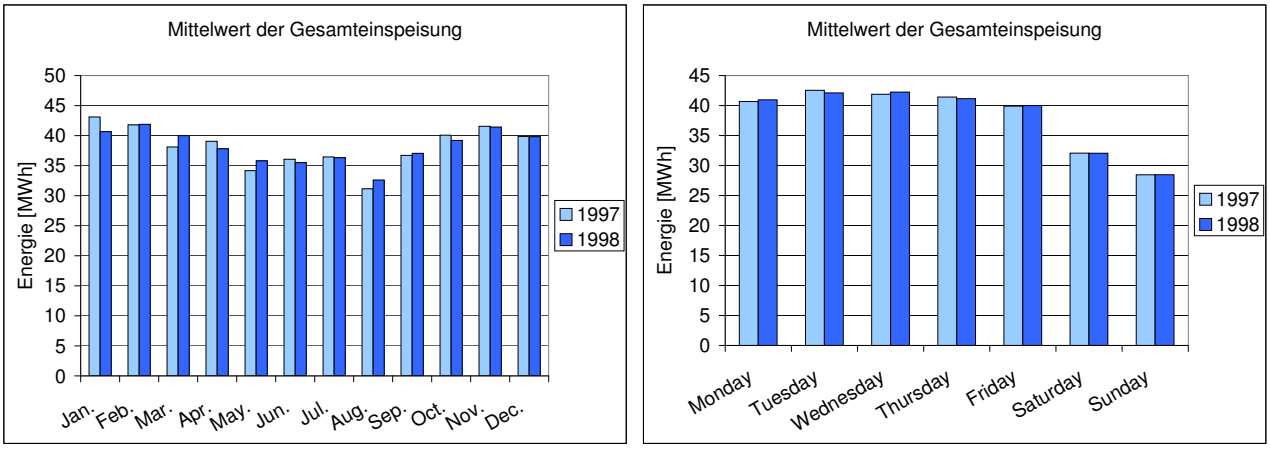


Abbildung 3.3.: *links:* durchschnittliche pro Tag aufgenommene Energie in Abhängigkeit des Monats; *rechts:* durchschnittliche pro Tag aufgenommene Energie in Abhängigkeit des Wochentages.

In Abbildung 3.3 ist zu sehen, dass die Stromnachfrage eher gering von der Jahreszeit abhängt. Im Winter ist der Strombedarf höher als im Sommer. Dies liegt zum Teil an der Nutzung von elektrischer Energie zur Wärmeerzeugung in Elektro-Wärmespeicheröfen. Zudem ist im Sommer die Vielfalt des Freizeitangebotes und der Anteil der Bevölkerung der sich im Urlaub befindet größer. Dadurch halten sich im Schnitt weniger Personen in den Wohngebäuden auf, was zu der Verringerung der Stromnach-

frage im Sommer führt. Überdies wird im Winter mehr und länger auf eine elektrische Beleuchtung zurückgegriffen. Die Abhängigkeit der Stromnachfrage vom Wochentag fällt hingegen deutlicher aus. Die Nachfrage an Werktagen ist wesentlich größer als an Samstagen und Sonntagen. Dieser Effekt ist auch an Feiertagen zu sehen, die im Energiebedarf Sonntagen sehr ähneln.

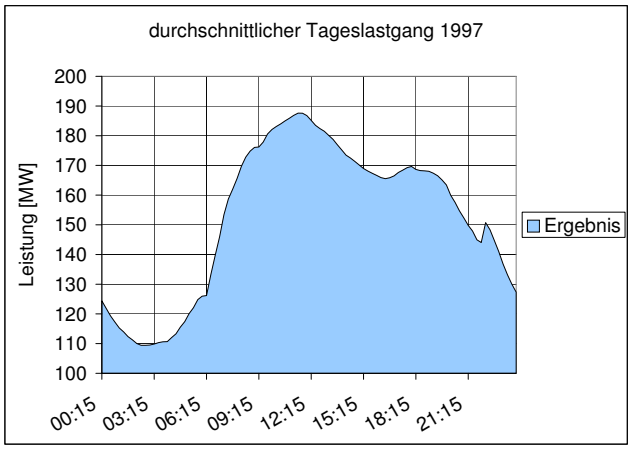


Abbildung 3.4.: Mittlerer zeitlicher Verlauf der Stromnachfrage der Stadt Augsburg über alle Tage des Jahres 1997 gemittelt.

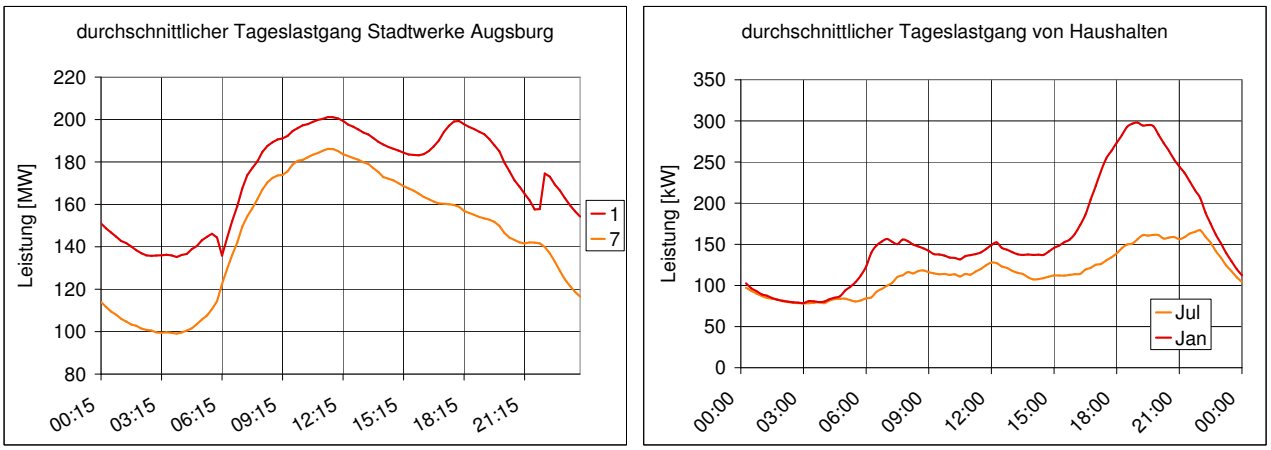


Abbildung 3.5.: *links:* mittlerer zeitlicher Verlauf des Lastgangs der Stadtwerke Augsburg für Januar und Juli 1997; *rechts:* mittlerer Tagesverlauf der Stromnachfrage von Haushalten für Januar und Juli *Quelle: DREWAG.*

Betrachtet man den mittleren Tagesverlauf (Abbildung 3.4) der resultierenden Stromnachfrage zeigen sich weitere Regelmäßigkeiten. So ist zu erkennen, dass ab ca. 4:00 Uhr die Stromnachfrage deutlich ansteigt und um 12:00 Uhr ihr Maximum erreicht. Der Verlauf an Nachmittagen ist stark vom jeweiligen Monat abhängig (siehe Abbildung 3.5 *links*). In den Wintermonaten ist um ca. 18:00 Uhr nochmals eine Nachfragespitze zu finden. Diese ist wohl auf den erhöhten Energieverbrauch für Beleuchtung und Unterhaltung in Privathaushalten zurück zu führen [7]. Um 22:00 Uhr ergibt sich im Winter ein weiterer starker Anstieg der Nachfrage, was wahrscheinlich auf die Nutzung von elektrisch betriebenen Nachtspeicheröfen hindeutet, welche ab 6:00 Uhr wieder abgeschaltet werden.

[7] Im Folgenden als „Unterhaltungspeak“ bezeichnet.

Um die Größenordnung des Anteils des Bedarfs der Industrie, des Gewerbes und der Haushalte abzuschätzen wurden die Daten weiter bearbeitet. Es wurde davon ausgegangen, dass die Lastspitze der Stromproduktion der Stadtwerke Augsburg an Winterabenden als haushaltsspezifisch anzusehen ist. Als Indiz für diese Annahme kann die Tatsache gesehen werden, dass sich in den Lastkurven der Haushalte ein ähnliches Verhalten zeigt (vergleiche Abbildungen 3.5). Aus diesem Grund wurden die Unterschiede zwischen der Januar- und Julinachfrage ($\Delta P = P_{\text{Januar}} - P_{\text{Juli}}$) der Haushalte (aus den Daten der DREWAG) ermittelt und mit denen für die beiden gleichen Monate der Gesamtnachfrage (Daten der Stadtwerke Augsburg) verglichen.

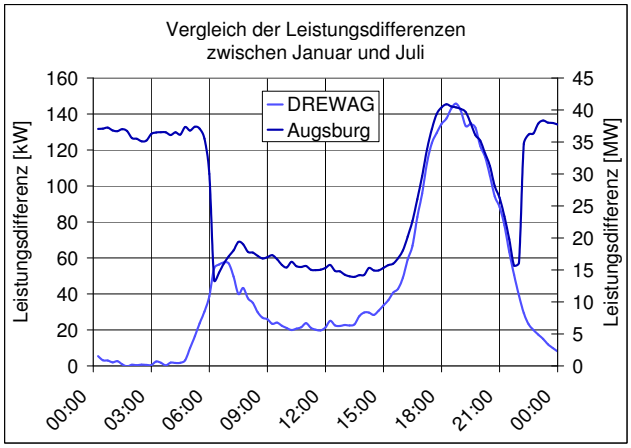


Abbildung 3.6.: Vergleich der Unterschiede in der Nachfrage zwischen Januar und Juli für die haushaltsspezifischen Daten der DREWAG (linke Skala) und der Nachfrage aller Sektoren (Haushalte, Gewerbe, Industrie) der Stadtwerke Augsburg (rechte Skala).

In Abbildung 3.6 ist zu sehen, dass die Form des „Unterhaltungspeaks“ sehr gut in beiden Betrachtungen übereinstimmt. Anhand dieser Übereinstimmung wurde eine Skalierung für die Größe des winterlichen Unterhaltungspeaks zwischen den Daten aus Augsburg und Dresden bestimmt (Skalierungsfaktor $\Delta P_{\text{Augsburg}} = 300\ \Delta P_{\text{Dresden}}$). Geht man davon aus, dass das Konsumverhalten nach elektrischer Energie in Dresden und in Augsburg gleich ist, kann mit dem gleichen Skalierungsfaktor der dresdner Stromverbrauch der Haushalte von den augsburger Daten abgezogen werden. Die Restnachfrage beinhaltet die Sektoren Gewerbe und Industrie und die Leistungsnachfrage der Nachtspeicheröfen. Die Abschätzung, der für diese Nachtspeicheröfen benötigten Lastkurve, gelang durch den Vergleich der sommerlichen und winterlichen Reststromnachfrage. Es konnte darauf geschlossen werden, dass in Augsburg ca. eine Kapazität von 35 MW an Nachtspeicheröfen installiert ist und diese in den Wintermonaten zwischen 22:00 Uhr und 6:00 Uhr betrieben werden.

Mit Hilfe dieser Daten kann der Lastgang von Industrie und Gewerbe, die durch die Stadtwerke Augsburg versorgt werden, abgeschätzt werden.

In Abbildung 3.7 ist der so ermittelte zeitliche Verlauf der Stromnachfrage für den Sektor Haushalt und der Summe aus den Sektoren Industrie und Gewerbe der durch die Stadtwerke Augsburg versorgten Stromabnehmer dargestellt. Darüber hinaus ist für den Winterfall der abgeschätzte Strombedarf der Nachtspeicheröfen, der den Haushalten zuzuordnen ist, aufgetragen. Berechnet man aus diesen Daten den Anteil der Haushalte am Strombedarf, ergibt sich, für den durchschnittlichen Sommertag ein

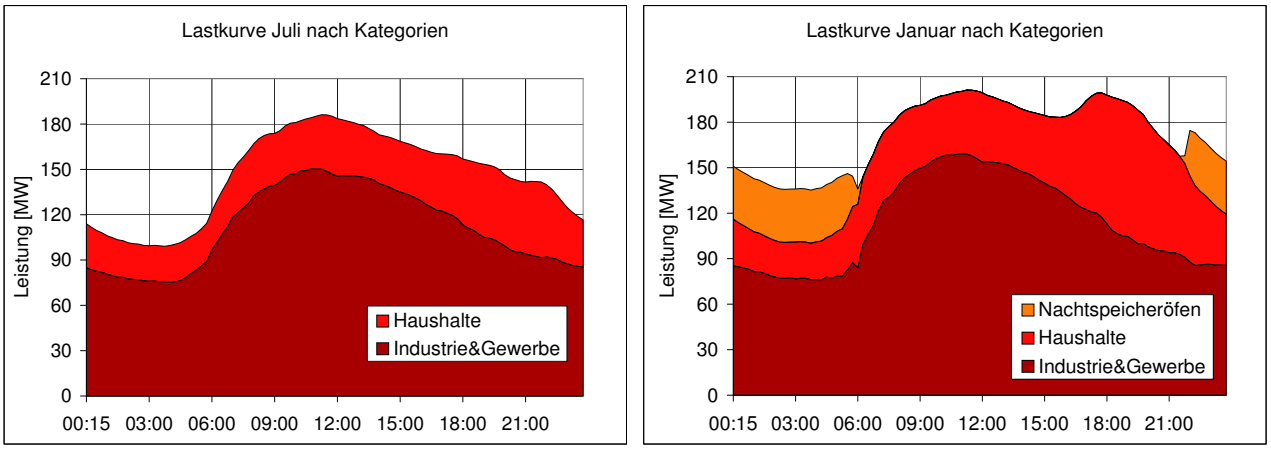


Abbildung 3.7.: Vergleich der Nachfrage nach den Kategorien Industrie & Gewerbe, Nachtspeicheröfen und Haushalte von Januar und Juli der Stadt Augsburg.

Anteil von ca. 22 %, für den durchschnittlichen Wintertag von ca. 37 %, wobei hier die Energie für die Nachtspeicheröfen den Haushalten angerechnet wurden.

3.2. Wärmenachfrage

Die Wärmenachfrage von Gebäuden, viel mehr der Bewohner der Gebäude, setzt sich aus zwei Bereichen zusammen. Diese sind zum Einen der Raumwärmebedarf der aus dem Wärmebedarf der Bewohner entsteht und zum Anderen der Bedarf nach warmem Wasser. Beide sind von vielen Faktoren abhängig. Statistische Werte [8] zum Wärmeenergiebedarf sind in der Tabelle 3.3 zu sehen. Es wurde repräsentativ für alle Brennstoffe Erdgas und Heizöl als Energieträger betrachtet.

Anzahl Haushalte pro Gebäude	kWh Gas je Haushalt	kWh Gas je m^2	kWh Öl je Haushalt	kWh Öl je m^2
Einfamilien	21265	164,3	25244	186,7
Zweifamilien	20785	188,0	26798	222,3
Drei- bis Vierfam.	13588	157,7	22656	223,2
Fünf- bis Zehnfam.	9152	126,5	17018	188,9
Elf- und mehr Fam.	7806	117,9	12058	164,8
Gesamt	17595	161,8	25009	196,6

Tabelle 3.3.: Gas- und Ölverbrauch pro Jahr je Haushalt und spezifischer Gas- und Ölverbrauch pro m^2 pro Jahr je Haushalt in Abhängigkeit der Anzahl an Haushalten pro Wohngebäude. *Quelle:* M. Barbosa (2004) Tabelle 2.2-20 und Tabelle 2.2-22.

3.2.1. Raumwärmenachfrage

Gebäude sollen uns vor Umwelteinflüssen wie Kälte, Hitze, Regen, Wind, Sonne und vielen anderen Faktoren schützen. Der für diese Arbeit relevante Schutzmechanismus eines Gebäudes ist vor allem

[8] *vergleiche* M. Barbosa Tabellen 2.2-20 und 2.2-22

der vor Kälte. Das Maß des Schutzes hängt dabei von der Beschaffenheit der thermischen Hülle ab.

Im Allgemeinen liegt die gewünschte Innentemperatur im Bereich um 20 °C [9]. Ist die Umgebungstemperatur des Gebäudes niedriger, geht unweigerlich Energie über verschiedene Mechanismen verloren. Diese sind Wärmeleitung in Festkörpern, Konvektion und Transmission an Oberflächen.

Wärmeleitung erfolgt innerhalb von Materie, ist aber nicht mit deren makroskopischen Bewegung verbunden, sondern nur mit der Energieübertragung durch Stöße der Atome bzw. der Moleküle untereinander.

Nach dem Gleichverteilungssatz sind Moleküle mit hoher, pro Freiheitsgrad gespeicherter Energie bestrebt, diese an andere Moleküle mit niedriger Energie abzugeben. Auf Grund dieses Energieausgleichs erzeugt ein Temperaturgefälle in einem Volumen einen Wärmetransport vom wärmeren zum kälteren Bereich. Dieser Wärmestrom kann durch das Fouriersche Gesetz beschrieben werden, welches besagt, dass der Wärmestromdichtevektor $\vec{q}_{\mathrm{th}}$ längs des stärksten Temperaturabfalls verläuft [10],

$$\vec{q}_{\mathrm{th}} = -\lambda \,\mathrm{grad}\, T. \tag{3.1}$$

λ ist dabei der materialabhängige Wärmeleitkoeffizient. Für den Fall, dass nur in eine Dimension ein Temperaturgefälle herrscht vereinfacht sich Gleichung (3.1) zu

$$q = -\lambda \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}, \tag{3.2}$$

wobei q die Wärmestromdichte längs des Temperaturgefälles angibt.

Betrachtet man nun ein Volumenelement mit der Dicke d und der Temperaturdifferenz der beiden gegenüberliegenden Oberflächen von $\Delta\, T$ so ergibt sich aus Gleichung (3.2)

$$q = -\frac{\lambda}{d} \Delta T. \tag{3.3}$$

$\frac{\lambda}{d}$ kann als Wärmeüberbrückungszahl U definiert werden. Diese ist vom Material (Wärmeleitkoeffizient λ) und der Dicke abhängig.

Der Wärmestrom Φ gibt an welche Wärmeleistung durch einen Körper der Dicke d und der Fläche A strömt.

$$\Phi = U\, A\, \Delta T. \tag{3.4}$$

Um auf die Wärmemenge zu schließen, die in einem Zeitintervall von der wärmeren zur kälteren Seite des Volumens fließt kann Gleichung (3.4) über die Zeit integriert werden.

$$Q = \int_{t_0}^{t} U\, A\, \Delta T \,\mathrm{d}t'. \tag{3.5}$$

Wie in Gleichung (3.4) zu sehen ist, ist der Wärmestrom durch ein Volumen linear von der Temperaturdifferenz abhängig.

[9] Im Weiteren wird die Innentemperatur von Wohnräumen immer als 20 °C angenommen.
[10] *vergleiche* H. Stöcker (2000)

Wärmestrahlung ist ein weiterer Transportmechanismus für Wärme. Hierbei geben Körper einen Teil der, in ihnen gespeicherten, thermischen Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung mit der Leistung P über ihre Oberfläche ab. Diese Leistung ist von der Temperatur des Körpers abhängig und folgt (für einen schwarzen Strahler) dem Plank'schen Strahlungsgesetz.

$$P(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} A \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \tag{3.6}$$

mit $c =$ Vakuumlichtgeschwindigkeit; $A =$ abstrahlende Fläche; $h =$ Plank-Konstante ;$k_B =$ Bolzmann-Konstante; $\lambda =$ Wellenlänge. Dabei ist ein schwarzer Strahler eine Fläche, dessen Emissionsgrad ϵ für alle Wellenlängen λ gleich eins ist.

Für die von der Oberfläche abgestrahlte Wärmeleistung gilt nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$P = \sigma A T^4 \tag{3.7}$$

σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante: $\sigma = 5,6705110^{-8} \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K^4}}$ [11].

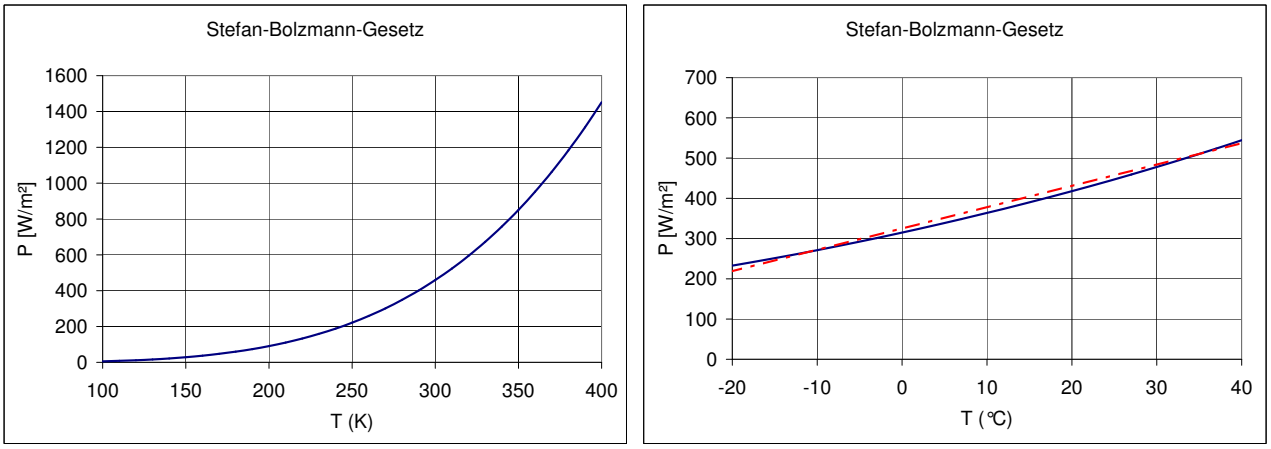


Abbildung 3.8.: *links:* Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers nach Stefan-Bolzmann in Abhängigkeit der Temperatur; *rechts:* Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers nach Stefan-Bolzmann in Abhängigkeit der Temperatur im Temperaturbereich zwischen -20 °C und 40 °C und lineare Näherung für diesen Bereich.

Wie in Abbildung 3.8 zu sehen, kann die Transmission im für diese Arbeit relevanten Temperaturbereich linear genähert werden. Für die Steigung der linearen Näherung bei 300 K erhält man aus Differentiation der Gleichung (3.7):

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}T}_{T_0=300\mathrm{K}} = -4\, A\, \sigma\, T_0^3 \approx 6,1 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}\, A \tag{3.8}$$

und somit für die Strahlungsleistung im Bereich von 300 K

$$P \approx P_{0\ (T_0=300\mathrm{K})} + 6,1 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}\, A\, (T - T_0) \tag{3.9}$$

Berücksichtigt man, dass die Umgebung des Körpers ebenso Strahlung emittiert, wird von der Fläche A nicht nur Energie abgestrahlt, sondern auch absorbiert. Für die insgesamt abgegebene Strahlungsleistung $P_{\mathrm{ab\,ges}}$ gilt:

$$P_{\mathrm{ab\,ges}} = P_{\mathrm{ab}} - P_{\mathrm{auf}} \tag{3.10}$$

[11] *Quelle* A. Hammer (2000)

setzt man die Näherung von Gl.(3.9) in Gl.(3.10) erhält man:

$$P_{\text{ab ges}} \approx 6,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} (T_{\text{ab}} - T_{\text{auf}}) = 6,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \Delta T \tag{3.11}$$

Somit ist auch dieser Effekt (näherungsweise) im für diese Arbeit relevanten Temperaturbereich linear von der Temperaturdifferenz abhängig.

Konvektion wird der Wärmetransport mittels Medium aufgrund eines Temperaturgefälles bezeichnet. Dazu muss dieses Medium selbst beweglich sein. Als Träger für die Wärme dient ein Gas oder eine Flüssigkeit. Dabei wird von einer Oberfläche Wärme an das sie umgebende Medium abgegeben. Dies geht durch Wärmeleitung bei direktem Kontakt von einem Träger (-molekül) mit der Oberfläche von statten. Der Wärmeverlust durch Konvektion eines Körpers kann als Oberflächeneffekt angesehen werden, da er sich nur sehr oberflächennah vollzieht. Die Konvektion ist in erster Linie vom Trägermedium abhängig, weniger von der Oberfläche und nicht vom Material des Körpers. Durch die Erwärmung des Trägermediums an der Oberfläche ändert sich dort dessen Dichte. Als treibende Kraft für die Konvektion zeichnet sich nun die Gravitation verantwortlich. Das Medium mit der zur Umgebung veränderten Dichte wird von der Oberfläche verdrängt und somit die Wärme abgeführt.

Dieser Effekt ist im für diese Arbeit relevanten Temperaturbereich als direkt proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Trägermedium anzusehen.

$$\Phi = \frac{1}{\alpha'} A \, \Delta T. \tag{3.12}$$

Dabei ist α' eine vom Trägermedium und von der Oberfläche abhängige Konstante.

Beim Übergang von Wärme eines Luftvolumens, durch eine Trennwand in ein anderes Luftvolumen, wie es bei Gebäuden der Fall ist, spielen alle drei oben genannten Mechanismen eine Rolle. Zur Quantifizierung der thermischen Eigenschaften einer Wand der Dicke d wurde der U-Wert ($U = \frac{\lambda}{d}$) eingeführt. Dieser gibt die Wärmeleistung an, die pro Quadratmeter und pro Grad Temperaturunterschied der beiden Luftvolumen die Trennwand durchfließt. Der Kehrwert des U-Wert ist der Wärmewiderstand R. Besteht die Trennwand aus mehreren hintereinander liegenden Schichten, kann der gesamte Wärmewiderstand R_{ges} als Summe der Einzelwiderstände R_i berechnet werden.

$$R_{\text{ges}} = \sum_i R_i \tag{3.13}$$

Der Übergangswiderstand von Luft in eine Wand (R_{innen}) und umgekehrt (R_{aussen}) ist für verschiedene Fälle durch Normen definiert [12]. Diese Werte beinhalten sowohl den konvektiven, als auch den transitiven Anteil des Wärmetransports und können als erste bzw. letzte Schicht einer Wand gesehen werden. Für den Übergang Innenwand - Luft ist R_{innen} gleich $0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$ und für den Übergang Außenwand - Luft ist R_{aussen} gleich $0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$.

[12] DIN 4108-4 und DIN EN ISO 6946. *Quelle:* K. Schneider (2002) Tafel 10.27a.

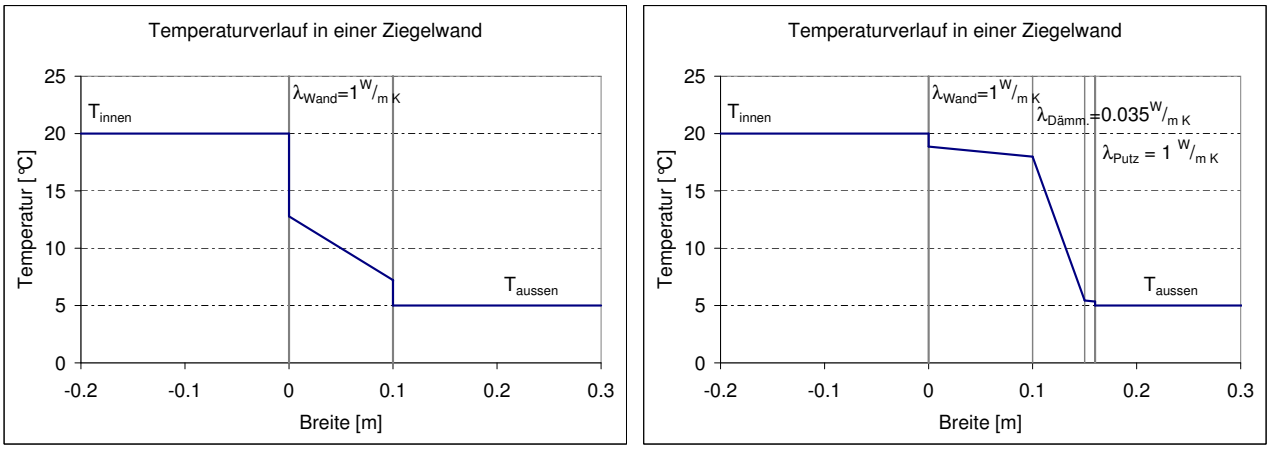


Abbildung 3.9.: *links:* Temperaturverlauf in einer Wand z.B. Ziegelmauer mit einer Dicke von 10 cm und der Wärmeleitfähigkeit von 1 $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K\,m}}$; *rechts:* Temperaturverlauf in einer Wand aus mehreren Schichten, z.B. Ziegelmauer mit einer Dicke von 10 cm und der Wärmeleitfähigkeit von 1 $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K\,m}}$, Dämmung mit Dicke 5 cm und Putz mit 1 cm Dicke.

Die Leistung die in Form von Wärme durch eine Wand mit der Fläche A strömt beträgt:

$$P = A\,\frac{\Delta T}{R_{ges}} = A\,\Delta T\,U_{ges} \tag{3.14}$$

Bei den Beispielen aus Abbildung 3.9 geht für eine Innentemperatur von 20 °C und eine Außentemperatur von 5 °C im linken Fall eine spezifische Leistung von 56 $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$ im rechten eine Leistung von 9 $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$ verloren.

Zur Berechnung des Wärmedurchgangs durch eine Fläche, die aus unterschiedlichen, nebeneinander liegenden Teilen besteht, wie beispielsweise ein Fenster in einer Wand, addieren sich die Einzelwiderstände reziprok.

$$\frac{1}{R_{\mathrm{ges}}} = \sum_i \frac{1}{R_i} \tag{3.15}$$

Für die gesamte Wärmeleistung die durch die Hülle eines Volumens abgegeben wird gilt

$$P_{\mathrm{ges}} = \sum_i \frac{A_i}{R_i}\,\Delta T \;=\; \sum_i A_i\,U_i\,\Delta T \tag{3.16}$$

somit folgt für die Wärme in der Zeitperiode von t_0 bis t

$$Q_T = \sum_i A_i\,U_i \int_{t_0}^{t} \Delta T \mathrm{d}t'. \tag{3.17}$$

Die Energie die auf diese Weise dem Volumen verloren geht wird im Allgemeinen als „Transmissionsverlust“ bezeichnet, obwohl er sich aus Transmission und Konvektion an der Oberfläche zusammensetzt.

Neben diesen Transmissionsverlusten spielen auch die Lüftungsverluste eine maßgebliche Rolle. Diese sind die Energie, die mit dem Austausch von Luft zwischen Innerraum und Außenraum verloren geht. Die Lüftungswärmeverluste stehen im direkten Zusammenhang mit dem Luftvolumen, welches ausgetauscht wird und berechnen sich folgendermaßen.

$$Q_L = V_{\mathrm{Luftwechsel}}\,c_{\mathrm{spez.\,Luft}}\Delta T \tag{3.18}$$

bzw.

$$Q_L = V_L \, n_L \, c_{\text{spez. Luft}} \int_{t_0}^{t} \Delta T \mathrm{d}t' \tag{3.19}$$

mit V_L gleich dem Umschlossenen Luftvolumen, n_L gleich der Luftwechselrate, also dem Anteil der Luft die pro Stunde mit der Außenluft ausgetauscht wird und $c_{\text{spez. Luft}}$ der spezifischen Wärmekapazität der Luft von $0,33 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}}$.

Aufgrund der Abhängigkeit, sowohl der Lüftungsverluste Q_L als auch der Transmissionsverluste Q_T vom Temperaturunterschied zwischen Innenraum und Umgebung, ist eine Betrachtung von Wetterdaten unerlässlich. Dazu wurden mehrere Wetterdatensätze [13] [14] betrachtet. Diese Daten enthalten zum Teil in Stundenmittelwerten und zum Teil in Tagesmittelwerten, Temperatur in °C und Globalstrahlung in kW/m^2 bzw. in kWh/m^{2}d.

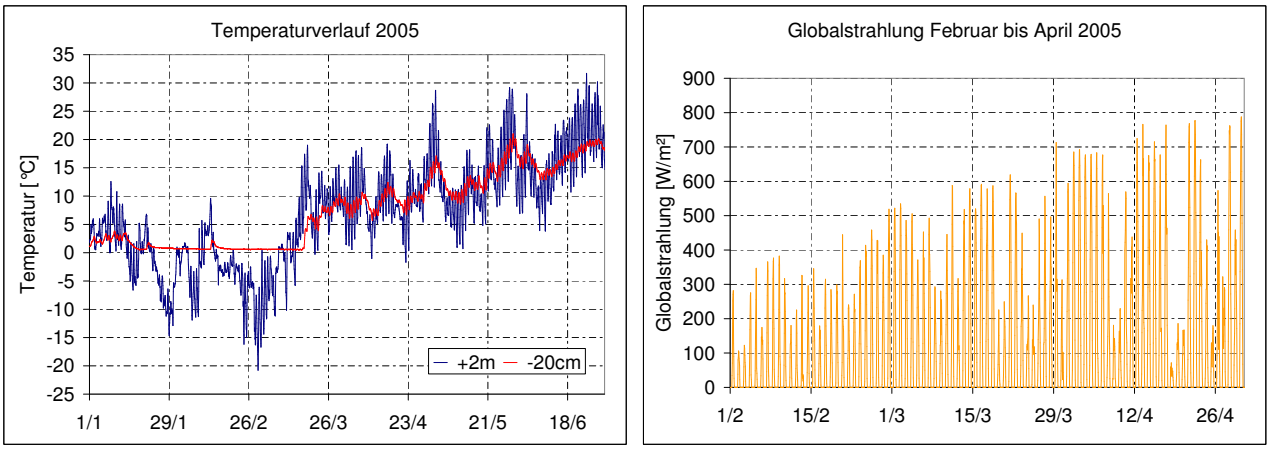


Abbildung 3.10.: *links:* Temperaturverlauf des ersten Halbjahres 2005 in Gersthofen in 2 m Höhe und in 20 cm Bodentiefe; *rechts:* Verlauf der Globalstrahlung vom 1. Februar bis 31. April 2005 in Gersthofen.

Die Jahresdurchschnittstemperatur der letzten 14 Jahre lag nach dem Datensatz aus Krumbach bei 8,7 °C. Die Verteilung auf die Jahre und die Monate sind in Abbildung 3.11 zu sehen. Wie bei der Beschreibung der Wärmetransportmechanismen gezeigt wurde, ist der Wärmefluss, den ein Körper, also in unserem Fall ein Gebäude, an die Umgebung abgibt, direkt proportional zur Temperaturdifferenz ΔT.

$$P \propto \Delta T \;\Leftrightarrow\; Q \propto G_t \;\; \text{mit } G_t \equiv \int_{t_0}^{t} \Delta T(t') \mathrm{d}t' \tag{3.20}$$

G_t wird als Heizgradstunden bezeichnet und kann mit Hilfe von Umgebungstemperaturdaten und der Innenraumtemperatur für beliebige Zeitintervalle berechnet werden. Anhand der verwendeten Wetterdaten [15] wurden die Heizgradstunden für Schwaben berechnet. Für die Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass Gebäude nur beheizt werden, wenn die Tagesdurchschnittstemperatur unter 12 °C liegt. Weiter wurde die Heizperiode auf September bis einschließlich Mai beschränkt, sodass Juni, Juli und August keine Beiträge zu den Jahresheizgradstunden liefern.

[13] *Quelle:* Wetterstation des Bayrischen Staatministeriums für Landwirtschaft und Forsten Gersthofen
[14] *Quelle:* Wetterstation des Bayrischen Staatministeriums für Landwirtschaft und Forsten Krumbach
[15] *Quelle* Krumbach

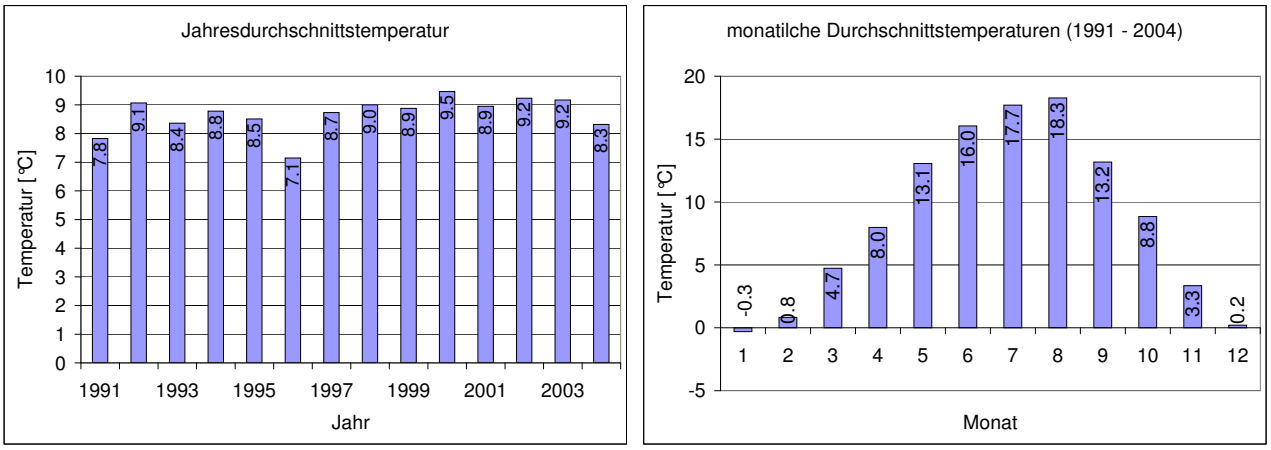


Abbildung 3.11.: *links:* Durchschnittliche Temperatur der letzten Jahre; *rechts:* Durchschnittliche Temperatur jedes Monats aus Temperaturdaten vom 1.1.1991 bis 31.12.2004.

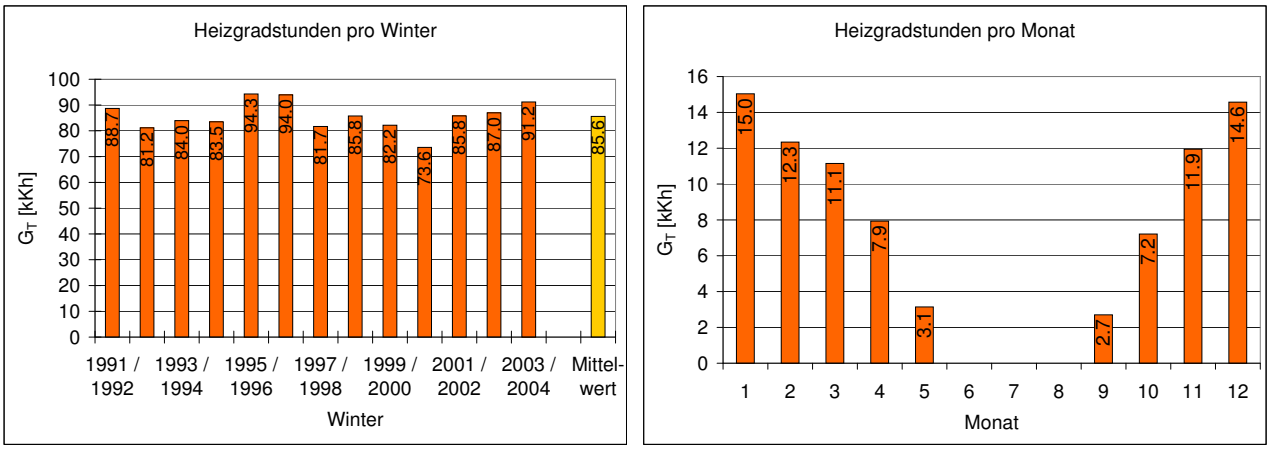


Abbildung 3.12.: *links:* Durchschnittliche Heizgradstunden pro Heizperiode der letzten Jahre; *rechts:* Durchschnittliche Heizgradstunden jedes Monats aus Temperaturdaten vom 1.1.1991 bis 31.12.2004.

Der Mittelwert für die Jahresheizgradstunden pro Heizperiode aus diesen Daten der letzten Jahre liegt bei 85,6 kKh (siehe Abbildung 3.12 *links*). Die durchschnittlichen monatlichen Heizgradstunden sind in Abbildung 3.12 *rechts* zu sehen. Die Standartabweichung beträgt pro Monat ca. 1,5 kKh. Im Vergleich dazu werden die Heizgradstunden für Deutschland durch die DIN 4108-6 D mit 74,0 kKh angegeben. Dabei wird in dieser Norm von einer Innentemperatur von 18,2 °C und einer Heizgrenze von 10 °C ausgegangen. Nach Feist (2004) unterschätzen die in DIN 4108-6 zugrunde gelegten die realen Heizgradstunden, wobei in dem Programm zur Berechnung des Heizwärmebedarfs von Passivhäusern [16] für die Region Bayern von 87,6 kKh ausgegangen wird.

Kennt man die wärmedämmenden Eigenschaften der thermischen Hülle ($\sum_i A_i U_i$ mit $i \in$ {Wand 1 , Wand 2, ... Fenster 1, Fenster 2, ... ,Dach, Bodenplatte, ...}) können die Transmissionswärmeverluste Q_T anhand der Heizgradstunden G_t berechnet werden. Selbes gilt für die Lüftungswärmeverluste Q_L. Somit kann der Raumwärmebedarf eines Gebäudes durch die thermische Hülle, dessen eingeschlossenem Luftvolumen V_L und der Luftwechselrate n_L bestimmt werden.

[16] Feist (2004) PHPP 2004 Tabellenblatt „Klimadaten“

3.2.2. solare- und interne Gewinne

Neben den Verlusten an Wärme fallen in einem Gebäude auch Wärmegewinne an. Ein großer Teil dieser, resultiert aus der, durch die Fenster einfallenden Sonnenstrahlung (Globalstrahlung). Diese Sonnenstrahlung erwärmt die Materie im Innern der thermischen Hülle und trägt somit einen Teil zum Wärmehaushalt bei.

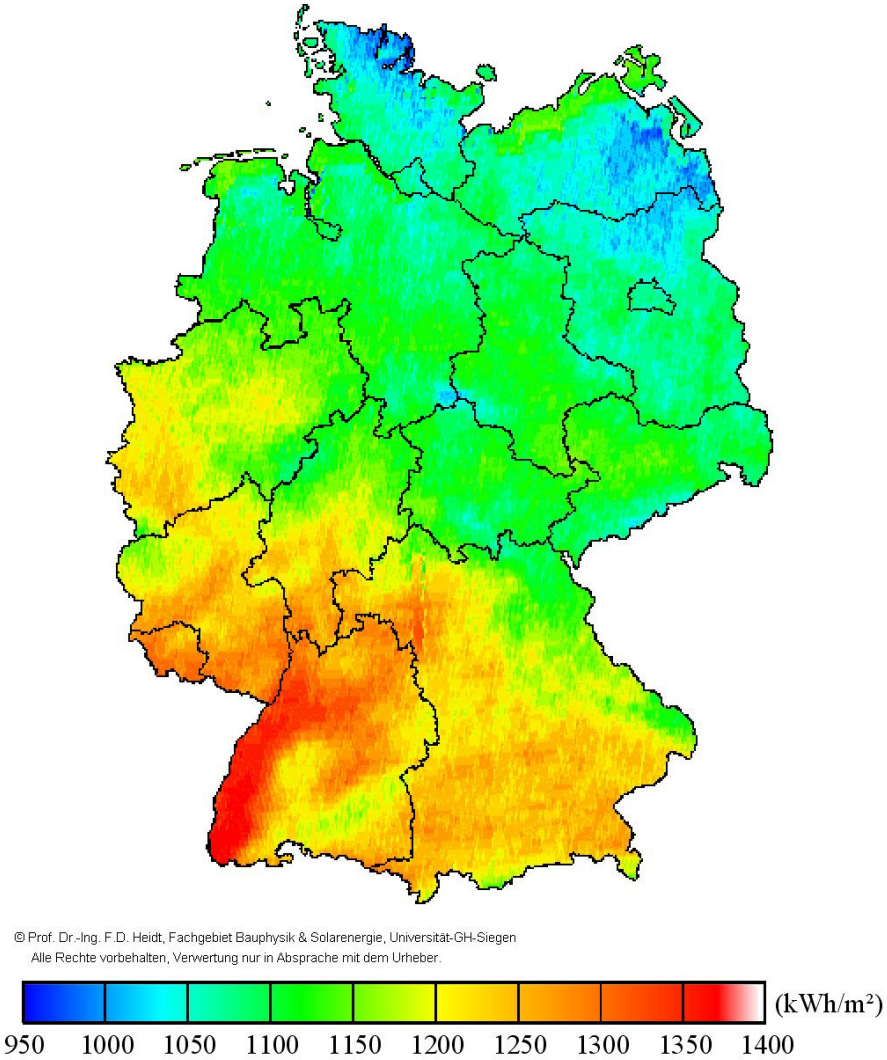


Abbildung 3.13.: Durchschnitt der Globalstrahlung in kWh/m^2 des Jahres 2003 *Quelle:* Heidt.

Als Globalstrahlung wird die Energie die pro Fläche und pro Zeiteinheit auf die Erdoberfläche trifft bezeichnet. Die Globalstrahlung setzt sich aus direkter Sonnenstrahlung und indirekter Strahlung, die durch Reflektion des Sonnenlichts an Flächen entsteht, zusammen. Die Maximale Leistung der Sonne

in unseren Breitengraden [17] beträgt ca. 850 W/m^2, die Gesamtenergie der Globalstrahlung pro Jahr in Schwaben liegt nach Abbildung 3.13 bei ca. 1100 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$. Aus den Wetterdaten aus Krumbach seit 1991 ergibt sich eine durchschnittlich eingestrahlte Sonnenenergie pro Jahr von 1005 kWh/m^2 (siehe Abbildung 3.14).

Die Leistung und Energie ist stark von der Lage der Kollektorfläche bzw. der Fenster zur Sonneneinstrahlung und von der Länge des Lichtweges durch die Atmosphäre abhängig [18]. Dementsprechend spielt neben anderem die Orientierung der Kollektorfläche, die Tageszeit und die Bewölkung eine wichtige Rolle.

Die auf ein Fenster treffende Sonnenstrahlung kann dieses nur zum Teil passieren. Einfluss auf diesen Anteil haben mehrere Effekte. Zum einen hängt der Transmissionsgrad sowohl von der Wellenlänge λ der einfallenden Strahlung als auch vom Einfallswinkel zwischen Scheibe und Strahlung ab. Im Allgemeinen ist Glas für Licht [19] durchsichtig. Dies bedeutet, dass das Licht ungehindert durch das Material treten kann. An den Flächen zwischen Glas und Luft wird jedoch ein Teil der eintreffenden Strahlung reflektiert. Dieser reflektierte Anteil [20] liegt für eine Luft-Glas-Grenzfläche für senkrechte Einstrahlung bei ca. 5% und steigt für hohe Einstrahlwinkel stark an. Des Weiteren trägt der Verschmutzungsgrad eines Fensters zu einer erniedrigten Transmission bei. Zur Berechnung der, durch ein Fenster fallenden Energiemenge, müsste dementsprechend der zeitliche Verlauf sowohl der Intensität $I(t)$, als auch des Einfallswinkels $\Theta(t)$ genau bekannt sein. Im Allgemeinen liegen für die Betrachtung des Energiehaushalts von Gebäuden keine so detaillierten Daten vor. Alle diese Effekte, welche die Transitivität des Fensters herab setzen werden im g-Wert vereinfacht zusammengefasst.

Häufig ist die Globalstrahlung in senkrechten Einfall auf die Erde und nach den vier Himmelsrichtungen auf gesplittet. Die Daten die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wurden, enthalten keine Richtungsauflösung (siehe Abbildung 3.13).

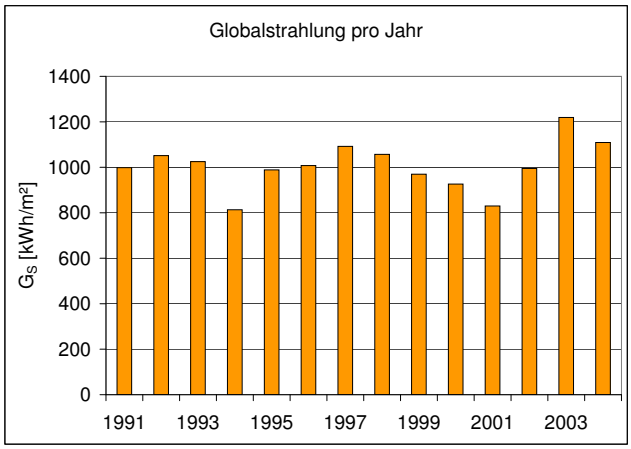


Abbildung 3.14.: Durchschnitt der Globalstrahlung in kWh/m^2 vom 1.1.1991 bis 31.12.2004 *Quelle:* Wetterstation Krumbach (2005).

[17] auf der Erdoberfläche
[18] aufgrund der teilweisen Absorption von Licht in der Erdatmosphäre durch Anregung
[19] Wellenlänge des sichtbaren Lichts: $380nm \leq \lambda \leq 780nm$
[20] nach der Fresnelschen Formel berechenbar

Ferner wurde untersucht, in wie weit die mittlere Tagestemperatur und die Globalstrahlung pro Tag korreliert sind. Abbildung 3.15 zeigt die Beziehung zwischen Tagesdurchschnittstemperatur und Gesamtglobalstrahlung pro Tag. Für jeden Monat wurde eine lineare Regression durchgeführt. Diese gibt eine Tendenz wieder, wie die Globalstrahlung und dementsprechend die tägliche Sonnenenergie und die Temperatur verknüpft sind. Betrachtet man die Regressionsgeraden fällt auf, dass diese für die Sommermonate eine deutlich positive Steigung aufweisen, die Regressionsgeraden der Wintermonate dagegen sind nahezu von der Globalstrahlung unabhängig. Für die Monate mit deutlich positiver Steigung (April, Mai, Juni, Juli August, September) lässt sich die Tendenz feststellen, dass mit steigender Sonneneinstrahlung die Tagesdurchschnittstemperatur höher ist. Für die sehr flachen Steigungen der Monate Oktober, November Dezember, Januar, Februar und März ist nur eine geringe Relation zwischen Temperatur und Sonneneinstrahlung zu erkennen. Die drei Wintermonate Dezember, Januar und Februar weisen darüber hinaus eine (sehr geringe) negative Steigung auf. Dies kann als Indiz dafür gesehen werden, dass klare Tage und somit auch Nächte besonders kalt sind.

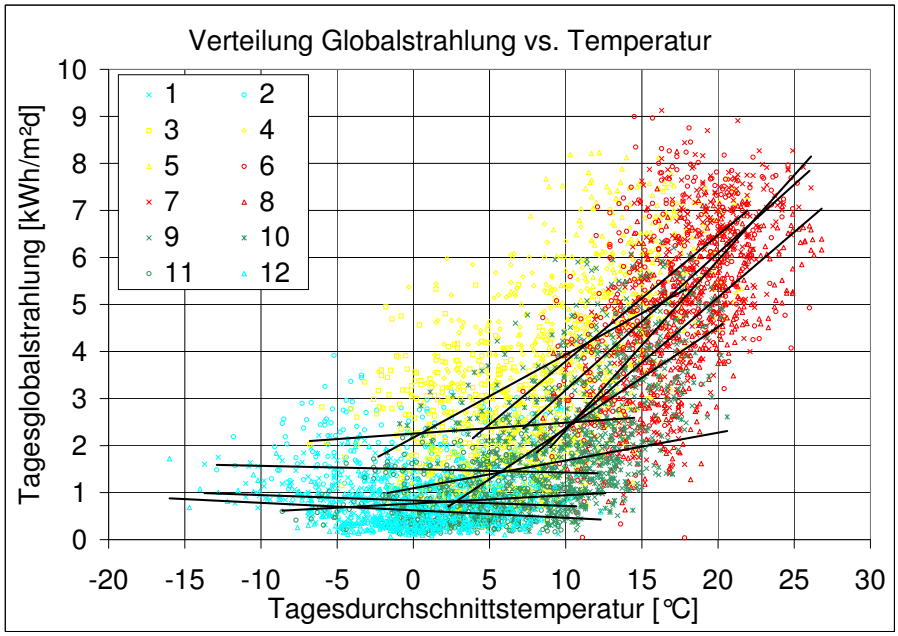


Abbildung 3.15.: Verhältnis der Globalstrahlung pro Tag zur Tagesdurchschnittstemperatur in Abhängigkeit des Monats einschließlich linearer Regression für jeden Monat.

Die weiteren Wärmegewinne in einem Gebäude werden zu den internen Gewinnen zusammengefasst. Diese beinhalten zum Beispiel die Abwärme, welche beim Kochen entsteht, sämtliche Wärmegewinne aus dem Betrieb elektrischer Geräte, Wärmeverluste der Warmwasserverteilung und die durch die Bewohner abgestrahlte Körperwärme. Für die Summe aller dieser Wärmegewinne kann ein Wert von ca. $22\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2a}}$ [21] angenommen werden.

[21] *Quelle* EnEV Tabelle 2 Zeile 5

3.2.3. Heizwärmebedarf

Die Energielücke die nach Berücksichtigung der internen- und der solaren Gewinne zum Raumwärmebedarf bleibt, wird als Heizwärmebedarf bezeichnet und gibt die Menge an Energie an, die ein Heizsystem erbringen muss um die Bedürfnisse der Bewohner nach Raumwärme zu befriedigen.

Der weitaus überwiegende Teil der bewohnten Wohneinheiten ist mit einer Sammelheizung ausgestattet. Hierzu zählen Fern-, Block-, Zentral- und Etagenheizung. Die Bedeutung der Einzel- oder Mehrraumöfen hat in Deutschland kontinuierlich abgenommen. Zur Beheizung werden vorwiegend Gas und Heizöl verwendet, wobei der Gas- den Heizöleinsatz gegenüber früheren Jahren sogar überflügelt hat [22]. Für die Deckung der Wärmenachfrage werden die Beheizungs- und Energiearten wie in Abbildung 3.16 zu sehen genutzt.

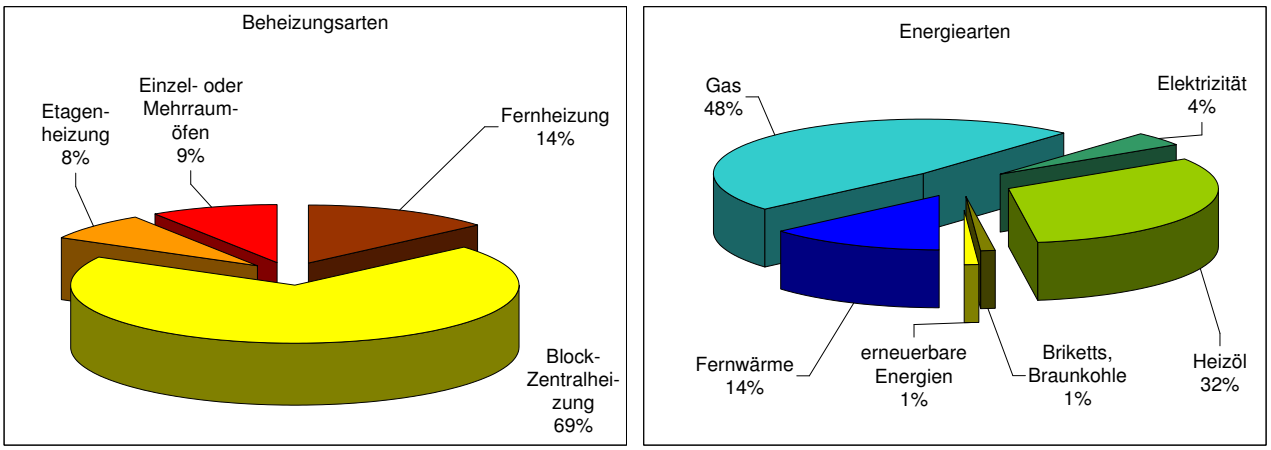


Abbildung 3.16.: *links:* Verhältnis der verschiedenen Bezugsarten. *rechts:* Genutzte Energiequellen für die Deckung der Wärmenachfrage. *Quelle:* DESTATIS [b] (2005)

Die Energiemenge, die benötigt wird um ein Gebäude mit Wärme zu versorgen, ist von Gebäude zu Gebäude sehr unterschiedlich. Um Gebäude miteinander vergleichen zu können, kann der spezifische Heizwärmebedarf in kWh pro Jahr und pro Quadratmeter Wohnfläche angegeben werden. Typische Werte für Einfamilienhäuser sind im Bereich von 60 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2a}}$ bis über 200 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2a}}$. In der Regel ist der spezifische Heizwärmebedarf für neuere Gebäude niedriger, da in den letzten Jahren, zum Teil durch die Energie-Einspar-Verordnung (EnEV) begründet, vermehrt auf Wärmeschutz Wert gelegt wird. In Allgemeinen kann ebenfalls davon ausgegangen werden, dass größere Gebäude wie Reihenhäuser oder Mehrfamilienhäuser aufgrund des günstigeren Verhältnis von Gebäudevolumen zur Fläche der thermischen Hülle einen geringeren spezifischen Heizwärmebedarf aufweisen als Einfamilienhäuser [23] . Wohnhäuser mit einem Heizwärmebedarf kleiner $30\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2a}}$ werden als Niedrigenergie- und kleiner $15\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2a}}$ als Passivhaus bezeichnet.

[22] *Quelle:* DESTATIS [b] (2005).
[23] Ähnliche thermische Eigenschaften der Außenwände vorausgesetzt.

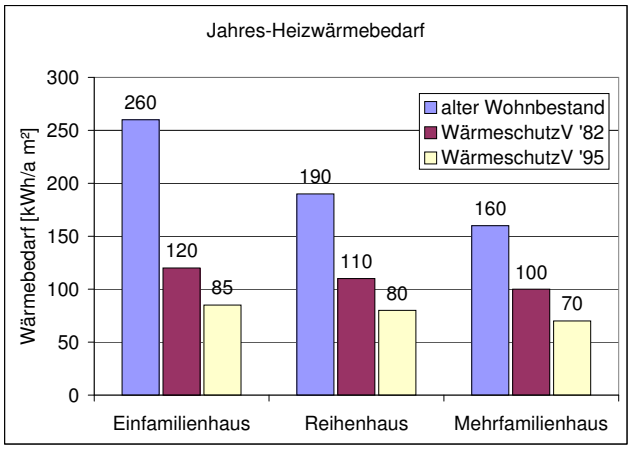


Abbildung 3.17.: Jahresheizwärmebedarf bzw. -verbrauch des Wohnbestandes und Höchstwerte des Jahres-Heizwärmebedarfs nach der Wärmeschutzverordnung von 1982 bzw. von 1995. *Quelle:* K. Biassin (1998) Abbildung 2-1.

3.2.4. Warmwassernachfrage

Die Warmwassernachfrage hängt stark von der Anzahl der Bewohner und deren Gewohnheiten ab. Diese sind sehr schwer zu klassi- und quantifizieren. Der durchschnittliche Warmwasserverbrauch für Wohnflächen kann grob mit dem Wert $12,5$ kWh/m^{2}a abgeschätzt werden [24]. Der Trinkwarmwasserbedarf pro Person beträgt im Schnitt ca. 1,18 kWh/Person [25]. Dies entspricht einem Bedarf an Warmwasser von 29,0 l pro Tag und Person [26]. Im Durchschnitt werden für das Baden ca. 4,5 kWh, für das Duschen ca. 1,6 kWh und für eine sonstige Zapfung ca. 0,16 kWh benötigt. Als Duschdauer werden 2 min bis 10 min angenommen. Die Entnahme von Warmwasser findet nahezu ausschließlich zwischen 6:00 Uhr und 22:00 Uhr statt [27].

Es ist zu beachten, dass diese Werte die Wärmenachfrage der Person ohne Berücksichtigung von Wärmeverlusten wiedergibt. Je nach Güte der haustechnischen Installation können Wärmeverluste zwischen 15% und 60% durch die Rohrleitungen entstehen.

[24] *Quelle* EnEV Tabelle 2 Zeile 1.
[25] *Quelle* P. Loose (1991)
[26] bei einer Erwärmung des Wassers von 10°C auf 45°C.
[27] *Quelle* P. Loose (1991)

4. Energieversorgung

Zur Versorgung der Haushalte mit Energie stehen verschiedene Infrastrukturen zur Verfügung. Diese sollen in diesem Kapitel genauer beleuchtet werden.

4.1. Stromversorgung

Für die Versorgung mit Strom steht ein flächendeckendes Stromnetz zur Verfügung. Dieses wird zu einem großen Teil zentral durch Großkraftwerke beschickt.

4.1.1. Kraftwerkspark

Um den Kraftwerkspark in Deutschland zu beschreiben wurde auf ein Gutachten [1] des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung in Karlsruhe zurückgegriffen.

Die Netto-Engpassleistung [2] der deutschen Stromanbieter lag im Dezember 2003 bei ca. 97 GW [3]. Die durch diese Kraftwerke erzeugte Energie entsprach im ersten Halbjahr 2005 ca. 268 TWh [4]. Für das ganze Jahr kann somit der Energieverbrauch Deutschlands auf 636 TWh abgeschätzt werden. Dabei wird ca. zwei Drittel der Energie durch fossile Energieträger und ein Drittel durch Kernenergie gedeckt (siehe Abbildung 4.1).

Aus der Kapazität und der erzeugten Energie der einzelnen Kraftwerkstypen kann deren durchschnittliche Auslastung berechnet werden. Diese ergibt sich aus $E = P\,t$. Benutzt man hierbei für die Energie E die abgegebene Energiemenge pro Jahr und für die Leistung P die installierte Kraftwerkskapazität erhält man für t eine Zeitdauer pro Jahr. Diese Zeitdauer wird Volllaststunden genannt und gibt die Auslastung des Kraftwerks an. 8760 Volllaststunden entsprechen dabei einer Auslastung von 100 %. Die durchschnittliche Auslastung der verschiedenen Kraftwerkstypen für das Jahr 2005 ist nach den obigen annahmen in Abbildung 4.2 zusammengefasst.

Die Gesamtkapazität [5] des deutschen Kraftwerksparks ist so dimensioniert, dass die maximale Stromnachfrage Deutschlands gedeckt werden kann [6]. Wird eine geringere Leistung nachgefragt, können

[1] *Quelle:* M. Klobasa (2005).
[2] maximal in das deutsche Stromnetz durch die Kraftwerke der Energie-Versorgungs-Unternehmen (EVU) (ohne Industriebetriebe oder private Einspeisung) einzuspeisende Leistung.
[3] entspricht ca. 1,2 kW pro Einwohner.
[4] *Quelle:* DESTATIS [c] Tabelle 3.2
[5] entspricht Netto-Engpassleistung
[6] unter Vernachlässigung des Strombezugs aus dem Ausland (siehe Abbildung 4.3)

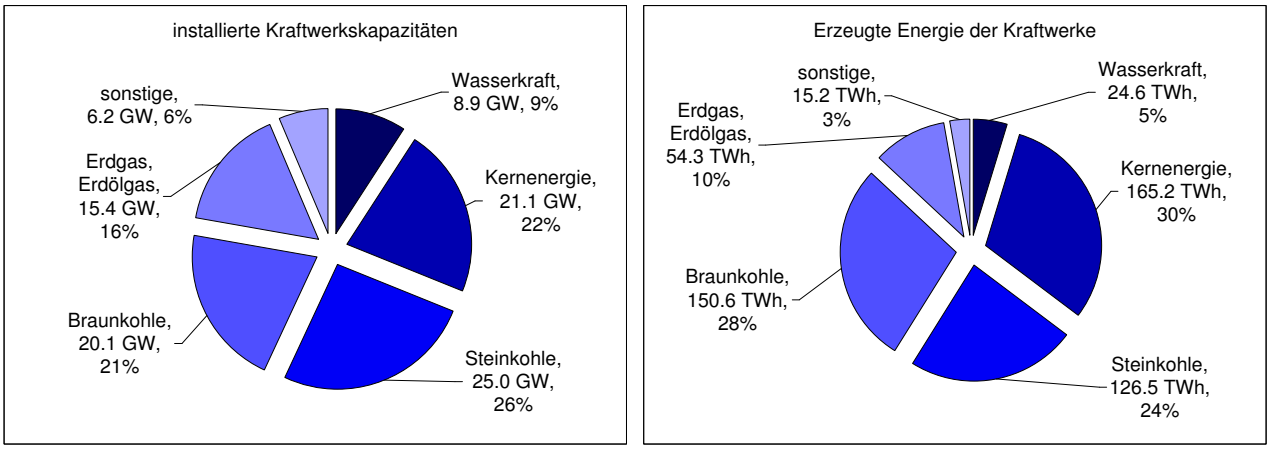


Abbildung 4.1.: *links:* installierte Kapazitäten in GW und Anteil der einzelnen Kraftwerkstypen an der Gesamtkapazität der deutschen Energieversorger (Strom) von 2003. *Quelle:* M. Klobasa (2005); *rechts:* Jahresenergieproduktion der einzelnen Kraftwerkstypen. *Quelle:* DESTATIS [c].

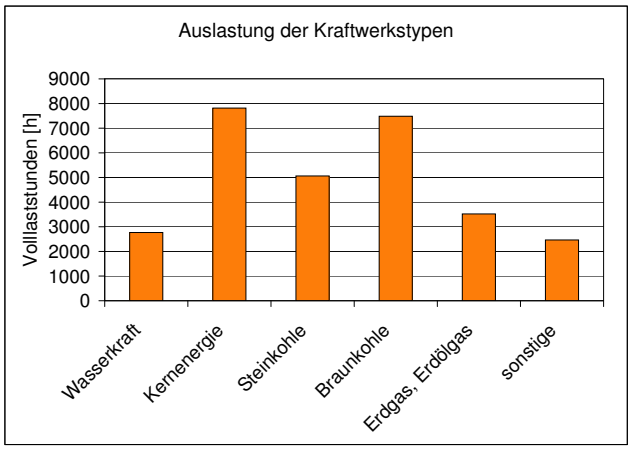


Abbildung 4.2.: Auslastung der Kraftwerkstypen anhand der installierten Kapazitäten und des Jahresenergieverbrauchs.

Kraftwerke teilweise oder ganz abgeschaltet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Kraftwerkstypen, wie z.B. Investitionskosten, Energiekosten oder Aufwand für das Anfahren bzw. Abschalten werden diese in unterschiedlichem Maße zur Deckung der Stromnachfrage genutzt. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden Kraftwerke mit niedrigen Energiekosten und hohen Investitionskosten bei möglichst hoher Auslastung betrieben. Zu diesen Typen gehören Kern- und Braunkohlekraftwerke (siehe Abbildung 4.2). Für die Deckung der Spitzenlasten wird hingegen auf Kraftwerke zurückgegriffen (vornehmlich Gasturbinen und Speicher- und Pumpwasserkraftwerke), die sowohl schnell in ihrer Leistung geregelt werden können, als auch günstige Installationskosten aufweisen. Daraus ergibt sich eine so genannte Merit Order, die die Einsatzreihenfolge eines Kraftwerksystems angibt.

In Europa findet ein reger Handel mit elektrischer Energie über die Landesgrenzen hinweg statt. Die dadurch resultierenden Im- und Exporte Deutschlands sind für das Jahr 2004 in Abbildung 4.3 dargestellt.

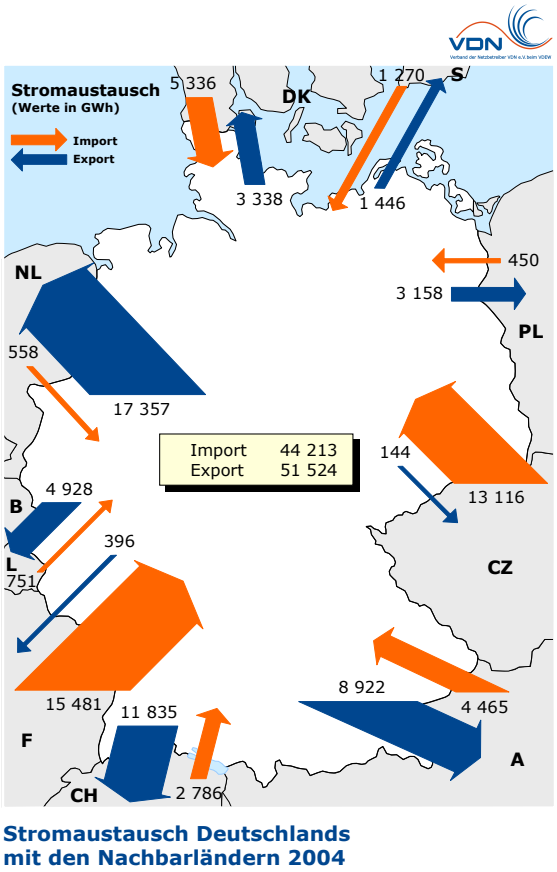


Abbildung 4.3.: Stromaustausch mit den Nachbarländern des Jahres 2004. *Quelle* VDN.

Aufgrund des täglichen Verlaufs der Stromnachfrage (siehe Abbildung 3.4) muss die Energieabgabe der Kraftwerke und somit der Kraftwerksmix laufend angepasst werden.

Die durch die Stromproduktion verursachte spezifische CO_2 Emission liegt bei ca. 0,55 kg pro kWh Strom [7].

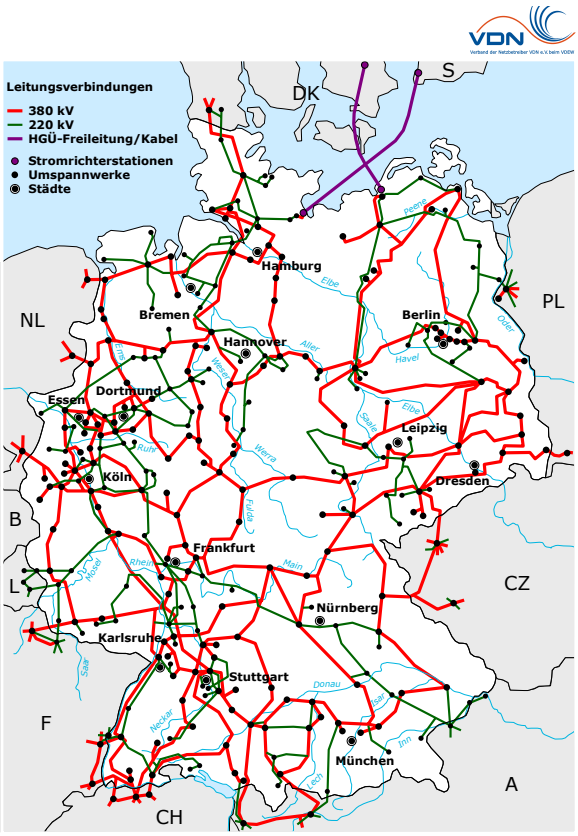
4.1.2. Stromverteilungsnetze

In Deutschland gibt es vier große Übertragungsnetzbetreiber. Diese sind EnBW Transportnetze AG, E.ON Netz GmbH, RWE Transportnetz Strom GmbH und Vattenfall Europe Transmission GmbH. Die regionale Aufteilung Deutschlands ist in Abbildung 4.4 zu sehen. Im deutschen Stromnetz wird Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz transportiert. Der Hausanschluss an das Netz erfolgt im Allgemeinen durch einen 400 V Drehstromanschluss. Dieser besteht aus drei Leitungen die Wechselstrom mit einer Phasenverschiebung von je $\frac{2}{3}\pi$ und einer effektiven Spannung von 230 Volt führen. Aufgrund der Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der transportierten Stromstärke können die Stromverluste durch den Transport verringert werden, indem der Strom für die Leitung über größere Entfernungen auf höhere Spannungen transformiert wird. Für den Transport großer Strommengen

[7] *vergleiche* M. Klobasa (2005) Tabelle 2.

ist ein Höchstspannungsnetz aufgebaut, welches mit Spannungen von 380 kV und 220 kV die Ballungszentren miteinander verbindet (siehe Abbildung 4.4 *rechts*). Es gibt in Deutschland insgesamt zur Zeit 36000 km solcher Transportleitungen. Zubringer, die den Strom von diesen Fernleitungen auf die feineren Verteilungsnetze bringen, arbeiten bei einer Spannung von 110 kV. Dieses Netz besteht aus 75000 km Leitungen und wird Hochspannungsnetz genannt. Das Mittelspannungsnetz mit 20 kV und das Niederspannungsnetz mit 230 bzw. 400 V verteilen dann den Strom in die Haushalte. Das Niederspannungsnetz besteht aus über einer Million Kilometer Kabel [8].

Regelzonen der deutschen Übertragungsnetzbetreiber 2005



Deutsches Höchstspannungsnetz 2005

Abbildung 4.4.: *links:* Regelzonen der vier Netzbetreiber; *rechts:* Höchstspannungs Leitungsnetz in Deutschland. *Quelle* VDN.

In die elektrischen Netze werden nach Angaben des VDN [9] jährlich ca. 2 Mrd Euro investiert. Dies sind gut 40 % der gesamten Investitionen in der Stromwirtschaft (Prognosewert 2004). Die dadurch entstehenden Nutzungsentgelte für die Stromnetze entsprechen auf die Energiemenge umgerechnet 5,46 ct/kWh für Nieder- 2,74 ct/kWh für Mittel- und 1,27 ct/kWh für Hochspannungsnetze [10].

Der durchschnittliche Strompreis für Haushaltskunden in Deutschland liegt bei 17,09 ct/kWh [11]. In den letzten Jahren ist trotz der Liberalisierung des Strommarktes eine deutliche Tendenz zu steigenden

[8] *Quelle:* VDN (2005)
[9] *vergleiche* VDN (2005)
[10] *Quelle:* VDN (2005)
[11] vgl. Eurostat

Preisen zu beobachten. In Abbildung 4.5 ist der Verlauf der Strompreise der letzten Jahre [12] und eine Schätzung des VDN zu sehen, in der gezeigt wird aus welchen Bestandteilen sich der Strompreis für Haushaltskunden zusammensetzt.

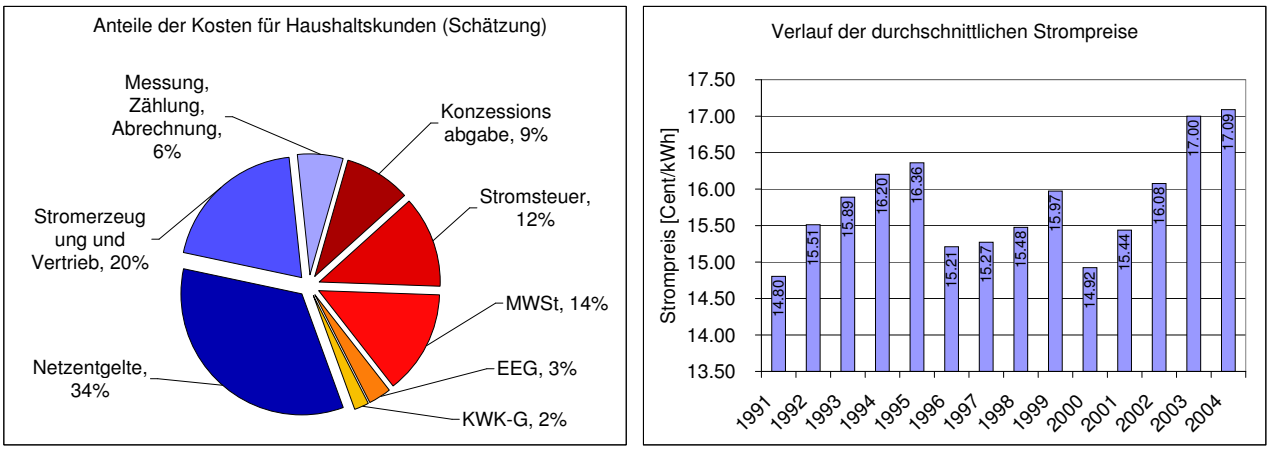


Abbildung 4.5.: *links:* Schätzung der Bestandteile des Strompreises für Haushaltskunden. *Vergleiche* VDN (2005); *rechts:* Verlauf der Strompreise der letzten Jahre. *Quelle* BMWi (2005).

4.2. Brennstoffe

Für die Versorgung der Haushalte mit Erdgas steht ein weit reichendes Gasnetz zur Verfügung, welches mit Hilfe von Pipelines vorwiegend aus Nord- und Osteuropa bzw. Asien versorgt wird. Hingegen gelangt Heizöl meist mit Hilfe von Schiffen aus den Fördergebieten und anschließend über Schiene und Straßen zum Endverbraucher. Im Rahmen dieser Arbeit wurde bei späteren Modellierungen Erdgas repräsentativ für alle fossilen Brennstoffe zur Deckung der Brennstoffnachfrage von Haushalten genutzt. Dementsprechend wurde hierauf ein verstärktes Augenmerk gelegt.

4.2.1. Erdgas

Die chemische Zusammensetzung von Erdgas schwankt beträchtlich. Ein Hauptbestandteil ist immer Methan (CH_4). Häufig enthält Erdgas auch größere Anteile höherer Kohlenwasserstoffe wie zum Beispiel, Ethan, Propan, Butan und Ethen. Darunter befindet sich auch Schwefelwasserstoff, der durch Entschwefelung des Erdgases entfernt wird und bis zu neun Prozent Kohlendioxid.

„Die Tatsache, dass Erdgas ein Brennstoff ist, der als Gas mit dem zweiten, bei der Verbrennung notwendigen Gas Luftsauerstoff reagiert, führt dazu, dass mit wenig Aufwand eine 'saubere' Verbrennung zu erzielen ist. Der Einsatz von Erdgas trägt deshalb zur Umweltschonung bei.“ [13]

Der Energieinhalt von Brennstoffen kann durch den Heizwert oder den Brennwert beschrieben werden. Dabei ist der Heizwert (Hu) die frei werdende Wärmemenge pro Mengeneinheit bei der Verbrennung.

[12] Quelle BMWi
[13] *Quelle:* K. Biassin (1998) Kapitel 14.6.

Typischerweise in $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$. Die chemische Formel für die Verbrennung von Methan kann folgendermaßen dargestellt werden.

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O(g) \tag{4.1}$$

Es entsteht neben dem Treibhausgas CO_2, Wasserdampf. Thermochemisch kann für Methan die frei werdende Energie mit Hilfe der Bindungsenthalpien berechnet werden:

$$-74,85\frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + 2 * (0\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) \rightarrow -393,5\frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + 2 * (-241,8\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) \tag{4.2}$$

Man erhält für den Energiegewinn bei der Verbrennung einen Wert von 802 $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$. Für einen Kubikmeter Methan ergibt sich daraus bei Normaldruck von 1,013 bar und einer Temperatur von 15 °C ein Energieinhalt von 9,4 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$.

Neuere Verbrennungskessel, so genannte Brennwertkessel, nützen neben der Abwärme durch die Verbrennung auch die latente Wärme des Wasserdampfes. Wird soviel Energie aus dem Abgas an das zu erwärmende Medium abgegeben, dass die Abgastemperatur unter die Kondensationstemperatur des Wasserdampfes fällt, so kondensiert dieser und gibt dabei zusätzlich seine latente Wärme ab. Die chemische Formel ändert sich geringfügig zu:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O(l) \tag{4.3}$$

Daraus folgt mit der Bindungsenthalpie für $H_2O(l)$:

$$-74,85\frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + 2 * (0\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) \rightarrow -393,5\frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + 2 * (-285,8\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) \tag{4.4}$$

Somit ergibt sich einen Wärmegewinn für die Verbrennung von 890 $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ bzw. für dieselben Normalbedingungen wie oben 10,5 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$. Der Energieinhalt unter Berücksichtigung der Kondensationswärme wird als Brennwert (Ho) definiert.

Die Stadtwerke Augsburg geben den Energieinhalt ihres Erdgases mit 10,14 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$ an.

Bei Heizungsanlagen wird der Nutzungsgrad der Energie definiert als der Quotient aus nutzbarer Wärme und Heizwert, da der Heizwert historisch als maximal nutzbare Energiemenge angenommen wurde. Bei Brennwertkesseln, also Anlagen die die latente Wärme des Wasserdampfes nutzen kann die nutzbare Wärme größer sein als der Heizwert wodurch sich rechnerisch Wirkungsgrade größer 100% ergeben können.

Die Kosten für Erdgas für Haushaltskunden liegen bei 6,31 Cent/kWh [14]. Ebenso wie die Strompreise sind auch die Gaspreise zeitlich nicht stabil. Ihr Verlauf ist in Abbildung 4.6 zu sehen. Auf Grund der Kopplung des Gaspreises an den Ölpreis kann für die zukünftige Entwicklung der Gaspreise eine Kostenerhöhung nicht ausgeschlossen werden.

[14] *Quelle:* Eurostat (2005)

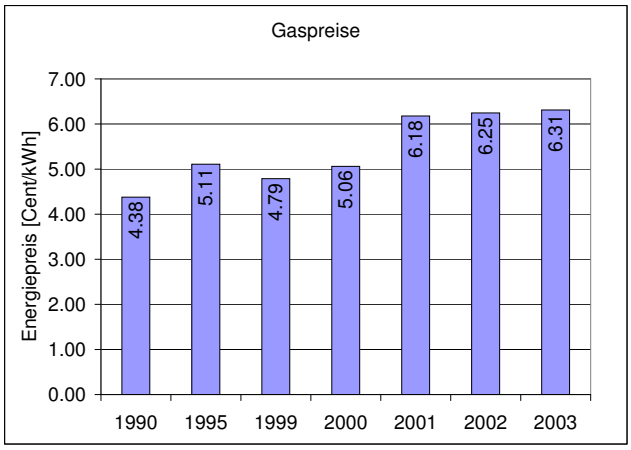


Abbildung 4.6.: Verlauf der durchschnittlichen Gaspreise der letzten Jahre. *Quelle:* Eurostat (2005).

4.3. Fernwärme

Bei der Fernwärme wird die Wärme von Kraftwerken zur Deckung des Wärmebedarfs von Gebäuden genutzt. Diese Wärme kann in Heizkraftwerken erzeugt werden oder aus der Abwärme von Kraftwerken zur Stromerzeugung oder Müllverbrennungsanlagen stammen. Dabei sind Fernwärmenetze keine flächendeckenden Netze. Diese Versorgen viel mehr die Gebäude in der Nähe der Kraftwerke mit Wärme. Vornehmlich sind Fernwärmenetze in Städten zu finden. In Abbildung 4.7 ist das Versorgungsgebiet der Stadt Augsburg zusehen [15].

[15] *Quelle* Stadtwerke Augsburg [a]

Abbildung 4.7.: Versorgungsgebiet der Stadtwerke Augsburg mit Fernwärme.

5. Prozesse zur Energieumwandlung, zum Energieanschluss bzw. zur Speicherung

Nahezu die gesamte Energie, die durch ein Gebäude oder seine Bewohner nachgefragt wird, muss vor der Nutzung umgewandelt werden. So wird beispielsweise der bezogene Strom nicht in Form von Strom sondern vielmehr als Licht, Wärme oder mechanische Bewegung benötigt, Gas und Öl als Raumwärme oder warmes Wasser. Einige dieser Umwandlungsprozesse werden folgend näher betrachtet. Dabei wurden für jeden Prozess Durchschnittswerte für den Wirkungsgrad η, die Installationskosten $K_{Inst.Ges.}$, die Lebensdauer t_L, die daraus resultierenden annuitätischen [1] Installationskosten k_{Inst} und die variablen Kosten K_{Var} ermittelt und für die späteren Modelle und Optimierungen zusammengefasst.

5.1. Strom

Zur Deckung der Stromnachfrage der Haushalte wurden drei Prozesse betrachtet. Zum einen ein herkömmlicher Netzanschluss, eine Photovoltaikanlage und ein Blockheizkraftwerk. Letzteres wird in Abschnitt 5.4 gesondert behandelt.

5.1.1. Anschluss an das öffentliche Stromnetz

Es kann davon ausgegangen werden, dass nahezu alle Haushalte in Deutschland die Möglichkeit besitzen, Strom aus dem Stromnetz zu beziehen. Hierbei wird der dreiphasige Drehstrom an eine Übergabeeinheit im Gebäude angeschlossen. Aus diesem Anschluss an das Netz resultieren vernachlässigbar kleine Stromverluste. Ebenso wurden für die weiteren Betrachtungen die Installationskosten vernachlässigt. Die variablen Kosten sind die Energiekosten für den bezogenen Strom. Diese sind von Stromanbieter zu Stromanbieter verschieden. Die Stadtwerke Augsburg bieten Strom zu folgenden Konditionen an (siehe Tabelle 5.1 und Abbildung 5.1).

Tarif	I	II
monatlicher Grundpreis in Euro	3,05	7,47
Preis pro kWh in Cent	18,12	15,61

Tabelle 5.1.: Strompreise der Stadtwerke Augsburg (*vgl.* Stadtwerke Augsburg [b]) seit dem 1.1.2005. Tarif I für Jahresverbrauche kleiner 2113 kWh; darüber Tarif II.

[1] Zinssatz = 5 %

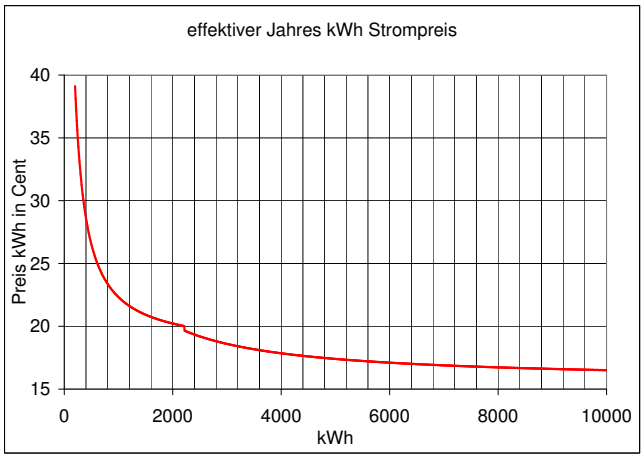


Abbildung 5.1.: Effektiver Strompreis in Cent pro kWh in Abhängigkeit des Jahresstrombedarfs pro Haushalt der Stadtwerke Augsburg vom 01.1.2005.

Der durchschnittliche Strompreis pro kWh beträgt 17,09 Cent in Deutschland und der CO_2 Ausstoß 0,55 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$ [2].

Die für die Modellierungen und Optimierungen der folgenden Kapitel wichtigen Eigenschaften des Netzanschlusses sind in Tabelle 5.2 zusammengetragen.

Einheit	η %	$K_{Inst.Ges.}$ $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$	t_L a	k_{Inst} $\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}$	K_{Var} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	CO_2 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Netzanschluss	100	0	∞	0	0,1709	0,55

Tabelle 5.2.: Netzanschluss.

5.1.2. Photovoltaikanlage (PV)

Abbildung 5.2.: Photovoltaikanlage.

Die Kapazität von Photovoltaikanlagen wird im Allgemeinen in der Einheit kW_P angegeben. Dies gibt an wieviel Maximal- bzw. Peak-Leistung die PV-Anlage bei einer einfallenden Referenzleistung der Globalstrahlung von 800 W_Global erbringt und liegt im Schnitt bei 0,127 $\frac{\text{kW}_\text{P}}{\text{m}^2}$. Somit liegt der

[2] siehe Kapitel 4.1

Wirkungsgrad der Anlagen für die Umwandlung der Strahlungsenergie in Strom bei ca. 16 % [3]. Zur Ermittlung der spezifischen Installationskosten $K_{Inst.Ges.}$ wurden für mehrere Anlagen [4] der Preis für die Zellen, die Ständer zur Befestigung und die Verkabelung betrachtet und in Abhängigkeit der, von der Anlage erreichbaren Peakleistung in Abbildung 5.3 *links* aufgetragen. Für die Installationskosten in Abhängigkeit der Peakleistung wurde ein linearer Trend der Form, $K_{Inst.Ges.} = m\ P_{max}$ mit P_{max} gleich Peakleistung der Anlage erstellt. m entspricht dabei den durchschnittlichen Installationskosten pro Peakleistung. Dieser lineare Trend beträgt ca. 4600 Euro pro installierte Peak-Kapazität und entspricht den spezifischen, zu entrichtenden, einmaligen Investitionskosten.

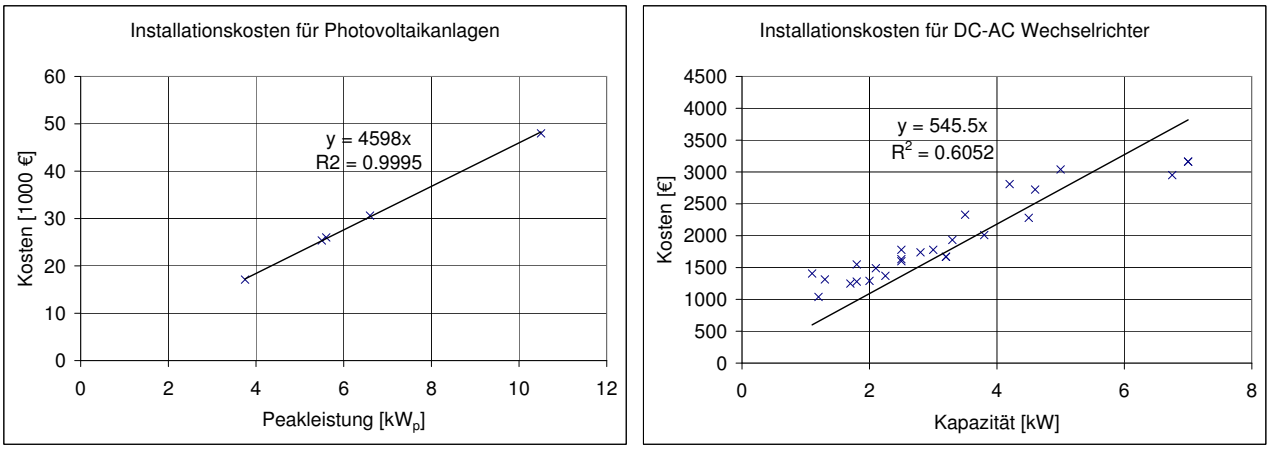


Abbildung 5.3.: *links:* Kosten für die Installation verschiedener Photovoltaikanlagen und linearer Trend. Die resultierenden spezifischen Kosten liegen bei ca. $4600 \frac{\text{Euro}}{\text{kW}_\text{P}}$; *rechts:* Kosten für die Installation verschiedener DC-AC Wechselrichter und linearer Trend. Die resultierenden spezifischen Kosten liegen bei ca. $546 \frac{\text{Euro}}{\text{kW}_\text{P}}$.

Die Lebenszeit der PV-Anlagen wurde mit 25 Jahren angenommen. Daraus ergeben sich annuitätische Installationskosten von 326 $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}_\text{P}\ \text{a}}$. Bei einem Aufschlag auf diese Kosten von ca. 10 % für die Installation können die annuitätische Installationskosten mit 360 $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}_\text{P}\ \text{a}}$ angenommen werden. Die Variablen Kosten werden als Null abgeschätzt.

Betreibt man eine Photovoltaikanlage im Netzbetrieb, muss zusätzlich ein DC-AC Wechselrichter [5] installiert werden, der den Gleichstrom der PV-Anlagen mit einem mittleren Wirkungsgrad von 93 % in netzkonformen Wechselstrom mit 50 Hz und 230 V transformiert. Für diesen Wechselrichter fallen zusätzliche Kosten an (siehe Abbildung 5.3 *rechts*). Bei einer Lebensdauer von 5 Jahren ergeben sich jährliche Kosten für die Installation von 130 $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}\ \text{a}}$.

Der Solarstrom kann nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz [6] an einen Netzbetreiber für 54,53 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$ [7] verkauft werden. Dies entspricht in diesem Fall negativen variablen Kosten von 0,5453 $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$.

[3] Da die Angabe der Kapazität in kW_P die Leistungsabgabe und nicht, wie bei allen anderen Prozessen die Leistungsaufnahme beschreibt ist der Wirkungsgrad, wie er für die späteren Optimierungen benutzt wird 100 %.
[4] siehe Anhang Tabelle A.1.
[5] siehe Anhang Tabelle A.2.
[6] *Quelle:* EEG (2004)
[7] Für Anlagen die bis zum 31.12.2005 fertig gestellt sind. Für Anlagen die später in Betrieb genommen werden verringert sich die Vergütung um 6,5 % pro Jahr.

Einheit	η %	$K_{Inst.Ges.}$ $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$	t_L a	k_{Inst} $\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}$	K_{Var} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	CO_2 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
PV-Anlage	100	4600	25	360	0	0
DC-AC Wechselrichter	93	546	5	130	0 / -0,5453	0

Tabelle 5.3.: Photovoltaikanlage und Wechselrichter.

Um die Energiekosten für einspeisefähigen Wechselstrom aus Photovoltaikanlagen abzuschätzen, wurden die entstehenden Installationskosten einer Photovoltaikanlage samt Wechselrichter berechnet. Diese entsprechen 490 Euro pro kW_P [8]. Aus den Wetterdaten [9] wurde weiter die jährliche durchschnittliche Globalstrahlung zu 1000 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$ bestimmt (siehe Abbildung 3.14).

Demzufolge ergibt sich die durchschnittliche Auslastung einer Photovoltaikanlage aus $\frac{1000\frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{0{,}8\text{kW}_\text{P}}$ zu 1250 Volllastsunden und der daraus resultierende Energiepreis zu $\frac{490\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}}{1250\frac{\text{h}}{\text{a}}} = 0,39\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$. Im Vergleich dazu kostet Strom aus dem Netz zur Zeit im Schnitt 0,17 $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$.

Berücksichtigt man für Anlagen die im Jahr 2005 in Betrieb gehen, dass aufgrund des Erneuerbare-Energien-Gesetz eine Vergütung 54,53 Cent pro kWh garantiert wird, kann dementsprechend pro kW_P installierter PV-Anlage mit einem Verkaufserlös von 695 €/a bei Installationskosten von 490 € pro Jahr gerechnet werden.

5.2. Wärme

Neben den Prozessen zur Strombereitstellung werden in dieser Arbeit einige Prozesse zur Deckung der Wärmenachfrage betrachtet. Diese sind die Prozesse Gas- und Pelletheizung, die Wärmepumpe und das BHKW [10]. Ölheizungen wurden aufgrund ihrer nahen Verwandtschaft zu Gaskesseln nicht gesondert betrachtet.

5.2.1. Gasheizung

Abbildung 5.4.: Flamme einer Gasheizung.

[8] 9,1 m^2 Modulfläche und ein kW Wechselrichter
[9] *Quelle:* Wetterstation Krumbach (2005)
[10] wird in Kapitel 5.4 gesondert betrachtet

Der Vorteil der Gasheizung ist die relativ einfache und günstige Installation und Instandhaltung und die relativ umweltverträgliche Verbrennung (im Vergleich zu Öl oder Kohle). Jedoch erzeugt jeder Kubikmeter verbranntes Erdgas ca. einen Kubikmeter CO_2. Dies entspricht in etwa 200g Kohlendioxid pro kWh verbranntem Gas.

Gasbrenner haben, in Abhängigkeit ihrer Bauart Wirkungsgrade von 80 bis 110 % [11]. Ausschlaggebend für den Wirkungsgrad sind die Abgas-, Abstrahl- und Auskühlverluste.

Mit der Verbrennungswärme des Erdgases wird im Normalfall ein Wasserkreislauf erhitzt, mit dem die Raumwärme und die Warmwasserwärme erzeugt wird.

Es gibt drei Arten von Gasheizungen die im Folgenden kurz beschrieben werden [12].

Atmosphärische Brenner (siehe Abbildung 5.4) sind durch ihre einfache Bauart kostengünstig und wartungsarm. Die Verbrennungsluft wird aus der Umgebung angesaugt. Trotz des einfachen Aufbaus erzielen diese Brenner bereits gute Wirkungsgrade und geringe Emissionswerte.

Bei den **Gebläsebrennern** sorgt hingegen ein Gebläse für die Zufuhr der Verbrennungsluft. Dies gewährt eine optimale Verbrennung und bietet die Möglichkeit der Leistungsregelung. Gebläsebrenner verzeichnen geringfügig bessere Wirkungsgrade als atmosphärische Brenner.

In Folge der Emissionsdiskussion sind die **Vormischbrenner** entwickelt worden. Sie erzielen die besten Wirkungsgrade bei geringeren Emissionswerten. Sie verursachen bei der Verbrennung minimale Stickstoffoxid-Emissionen. Dies geschieht mittels Absenkung der Verbrennungstemperatur durch optimale Vermischung des Gas-Luft-Gemisches, vergrößerter Brennerfläche und Absenkung der Verweilzeit des Verbrennungsgases in der Flamme.

Um den spezifischen Installationspreis für Gasheizungen abzuschätzen wurden wiederum mehrere Heizungen als Grundlage [13] genommen und deren Preis in Abhängigkeit der Leistung betrachtet (siehe Abbildung 5.5). Für die jährlichen Installationskosten für Gasheizungen ergaben sich bei Berücksichtigung einer Lebensdauer von 15 Jahren und 10 % Aufschlag für Aufbau und Anschluss 14 $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$.

Die variablen Kosten ergeben sich aus den Gaspreisen. Sie betragen 6,31 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$ [14]. Für den Wirkungsgrad von Gasheizungen wurden 98 % angenommen. Wobei dies der Wirkungsgrad im Bezug auf den Brennwert, nicht auf den Heizwert ist (siehe Kapitel 4.2.1).

Einheit	η %	$K_{Inst.Ges.}$ $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$	t_L a	k_{Inst} $\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}$	K_{Var} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	CO_2 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Gasheizung	98	138	15	14	0,0631	0,2

Tabelle 5.4.: Gasheizung.

[11] siehe Kapitel 4.2.1
[12] *Quelle:* K. Biassin (1998) Kapitel 14.6.4.2.
[13] siehe Anhang Tabelle A.3
[14] siehe Kapitel 4.2.1

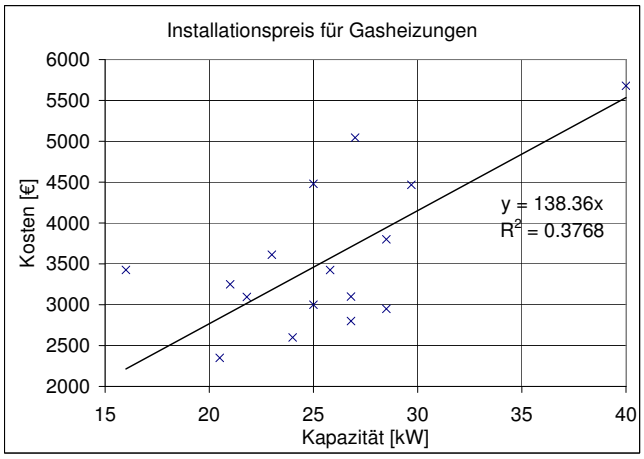


Abbildung 5.5.: Kosten für die Installation einer Gasheizung in Abhängigkeit der Kapazität der Anlage und linearer Trend ($138\frac{\text{Euro}}{\text{kW}_\text{P}}$).

5.2.2. Pelletheizung

Abbildung 5.6.: Holzpellets.

Pellets bestehen aus gepressten Holzabfällen, vornehmlich aus Sägewerken. In Pelletheizungen werden diese Presslinge mit Hilfe, meist einer Förderschnecke in den Brennraum transportiert und dort verbrannt. Die entstehende Verbrennungswärme wird, wie bei einer Gasheizung zur Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs genutzt. Aus einer Großzahl an Pelletheizungen [15] unterschiedlicher Kapazität wurde der spezifische Installationspreis ermittelt (siehe Abbildung 5.7). Die Lebensdauer einer Pelletheizung wurde als 15 Jahre angenommen.

Die Preise für Pellets schwanken leicht Regional und sind von der Bestellmenge, auf Grund der unterschiedlichen Transportkosten abhängig. Für den durchschnittlichen Pelletpreis wurden 180 Euro pro Tonne ermittelt. Bei einem mittleren Energieinhalt von 4,9 kWh/kg beträgt der Energiepreis somit 3,7 ct/kWh.

Für die Bewertung der CO_2 Emission gibt es verschiedene Ansätze. Zum einen kann, wie bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen die entstehende Menge an Kohlendioxid als Emission angenommen werden. Im Gegensatz dazu kann jedoch in Erwägung gezogen werden, dass durch die Verbrennung von Holz gerade soviel CO_2 produziert wird, wie es beim Wachsen aus der Luft aufgenommen hat. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aus diesem Grund der Pelletheizung keine Kohlendioxidemission zugewiesen.

[15] siehe Anhang Tabelle A.4

CO_2-Emissionen die beispielsweise aus dem Transport der Pellets resultieren wurden vernachlässigt.

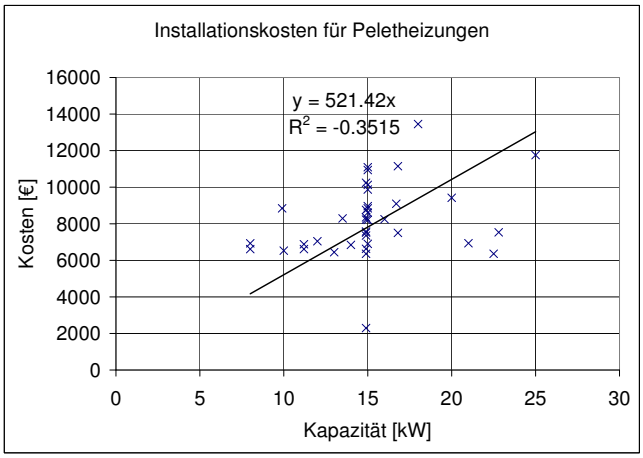


Abbildung 5.7.: Spezifische Kosten für die Installation einer Pelletheizung (linearer Trend $521 \frac{\text{Euro}}{\text{kW}_\text{P}}$).

Einheit	η %	$K_{Inst.Ges.}$ $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$	t_L a	k_{Inst} $\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}$	K_{Var} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	CO_2 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Pelletheizung	92	521	15	50	0,037	0

Tabelle 5.5.: Pelletheizung.

5.2.3. Solarkollektor

Ein Solarkollektor wandelt einfallende Sonnenstrahlung in Wärme um. Diese Wärme wird durch ein Fluid, im einfachsten Fall Wasser abtransportiert. Die Schwierigkeit bei der Herstellung von Solarkollektoren liegt darin, die erzeugte Wärme zu einem möglichst großen Teil zu nutzen. Dem entgegen wirken die Abstrahlungsverluste der Kollektorfläche (siehe Kapitel 3.2.1).

Zur Bestimmung eines spezifischen Installationspreis für Solarkollektoranlagen wurden Sets, bestehend aus den Modulen und den Modulträgern bewertet [16].

Für die Anlage wurden keine variablen Kosten und keine CO_2 Emission angesetzt.

Einheit	η %	$K_{Inst.Ges.}$ $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$	t_L a	K_{Inst} $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}_\text{P}\ \text{a}}$	K_{Var} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	CO_2 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Solarkollektor	91	377	15	36	0	0

Tabelle 5.6.: Solarkollektor.

[16] siehe Anhang Tabelle A.5

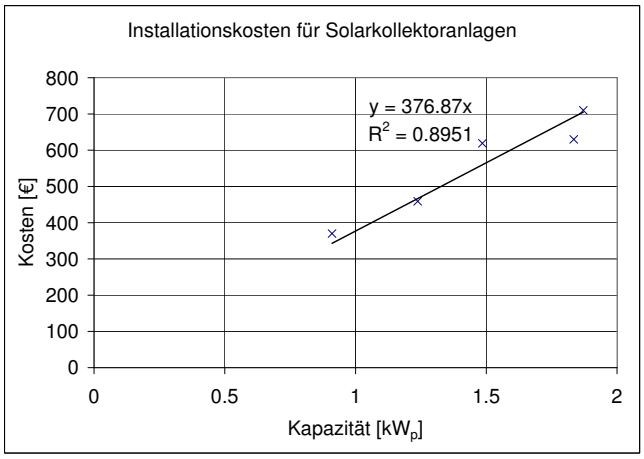


Abbildung 5.8.: Spezifische Kosten für die Installation eines Solarkollektors (linearer Trend $370\frac{\text{Euro}}{\text{kW}_\text{P}}$).

5.2.4. Wärmepumpe

Die Wärmepumpe nutzt die Wärme der Umgebung (Luft, Wasser, Bodenwärme), um damit z.B. Wasser für die Raumheizung aufzuheizen. Ihr Prinzip entspricht dem einer Kältemaschine; sie transportiert Wärme vom kälteren zum wärmeren Körper bzw. Wärmereservoir. Dazu muss ihr die mechanische Energie W von außen zugeführt werden. Nutzbar ist die, dem wärmeren Reservoir zugeführte Wärmemenge Q_{innen}. Der Wirkungsgrad ergibt sich zu:

$$\varepsilon_{\text{WP}} = \frac{Q_{\text{innen}}}{W} \tag{5.1}$$

Als obere Grenze des Wirkungsgrades, der Leistungszahl der Wärmepumpe kann die Leistungszahl eines linkslaufenden Carnotprozess angenommen werden:

$$\varepsilon_{\text{WP}} = \frac{T_{\text{innen}}}{T_{\text{innen}} - T_{\text{aussen}}} \tag{5.2}$$

Die Leistungszahl ist größer 1 und umso größer, je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur ist.

Der Carnotprozess beschreibt den Wärmetransport mit maximaler Leistungszahl. Heutige Wärmepumpen haben eine wesentlich niedrigere Leistungszahl. Diese liegt zwischen 3 und 6.

Technisch lässt sich die Wärmepumpe wie folgt realisieren. Einen Kompressor verdichtet adiabatisch ein Gas. Das Arbeitsmittel kondensiert daraufhin isobar und gibt seine latente Wärme an das zu erwärmende Wärmebad ab. Anschließend entspannt sich das flüssige Arbeitsmittel beim Durchgang durch ein Drosselventil adiabat. Durch isobare Aufnahme von Wärme aus dem kälteren Wärmebad verdampft das Arbeitsmedium und wird wieder vom Kompressor angezogen. Dieser Vorgang wird kontinuierlich fortgesetzt.

Zur Bestimmung der Kosten und der Leistungszahl von Wärmepumpen wurden verschiedene Anlagen betrachtet [17]. Als durchschnittliche Leistungszahl ergab sich 4,6. Die Installationskosten pro Kapazität

[17] siehe Anhang Tabelle A.6

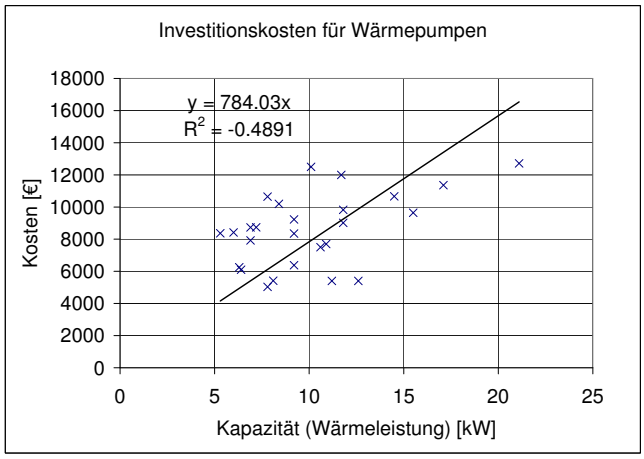


Abbildung 5.9.: Spezifische Kosten für die Installation einer Wärmepumpe in Abhängigkeit der abgegebenen Wärmeleistung (linearer Trend: $784\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$).

Wärmeleistung $K_{Inst.Ges.W}$ betragen im Schnitt $784\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$. Bei einer Lebensdauer der Wärmepumpe von 15 Jahren ergibt sich daraus eine Annuität von 76 $\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}$. Für die Annuität bezogen auf die aufgenommene elektrische Energie beträgt, mit einer Leistungszahl von 4,6, 360 $\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}$. Die Variablen kosten sind die Stromkosten. Diese werden in den späteren Modellen in den Prozessen Netzanschluss bzw. BHKW berücksichtigt. Der CO_2 Ausstoß der durch eine Wärmepumpe erzeugt wird ist gleich dem für eine kWh aufgenommenem Strom [18].

Einheit	η %	$K_{Inst.Ges.}$ $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$	t_L a	k_{Inst} $\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}$	K_{Var} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	CO_2 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Wärmepumpe	460	3606	15	360	0	0

Tabelle 5.7.: Wärmepumpe. Sämtliche Kosten beziehen sich auf die aufgenommene elektrische Energie.

5.3. Speicher

Neben den Prozessen zur Bereitstellung der Nachgefragten Energie stellen ebenso Energiespeicher wichtige Komponenten zur Deckung einer Energienachfrage dar. Durch Energiespeicher können Kapazitätslücken von Prozessen geschlossen werden. Dementsprechend kann teilweise, unter Benutzung eines Speichers in Fällen einer ungleichmäßigen Nachfrage teure Prozesskapazität durch meist günstigere Speicherkapazität ersetzt werden. In diesem Fall kann zu Zeiten, in denen die Nachfrage nach Energie kleiner ist als die Prozesskapazität Energie im Speicher zwischengelagert werden. Ist die Nachfrage größer als die Prozesskapazität, kann die Versorgungslücke durch Energie aus dem Speicher geschlossen werden.

Wärmespeicher sind aus dem Versorgungssystem unserer Häuser nahezu nicht mehr weg zu denken. Im Gegensatz dazu haben Speicher für elektrische Energie in unseren Häusern im Allgemeinen nur für

[18] 0,55 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$ für Strom aus dem Netz. Er wird bei den Strom erzeugenden Prozessen (Netzanschluss, BHKW) berücksichtigt.

Kleinanwendungen wie Uhren, Taschenlampen, Fernbedienungen usw. Einzug gefunden. Eine Speicherung von elektrischer Energie im Maßstab wie bei der Wärmeversorgung von Gebäuden ist aus Kostengründen nahezu nur in so genannten „Insellösungen“ [19] zu finden.

5.3.1. Strom

Zur Speicherung von Strom gibt es mehrere Möglichkeiten. Die gebräuchlichste, für Speicher der Größenordnung wie sie in dieser Arbeit betrachtet wird, sind Akkumulatoren. Weitere Möglichkeiten für die Speicherung elektrischer Energie können Schwungräder, Kondensatoren oder die Kombination aus Wasserstoffelektrolyse, Wasserstoffspeicher und Brennstoffzelle sein. Im Weiteren wurden nur Akkumulatoren betrachtet, da diese technologisch bereits soweit ausgereift sind, dass sie beispielsweise bei der Stromversorgung von Gebäuden im Inselbetrieb erfolgreich eingesetzt werden.

Die Installationskosten wurden, wie bereits bei den anderen Prozessen, aus den Kosten und Kapazitäten von verschiedenen Akkus verschiedener Anbieter berechnet [20].

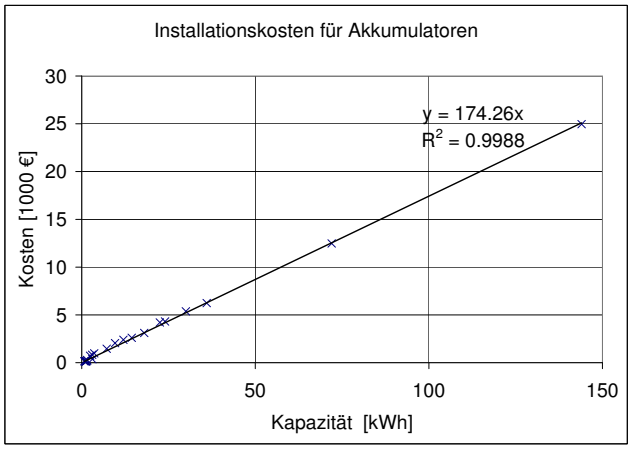


Abbildung 5.10.: Spezifische Kosten für die Installation eines Stromspeichers aus Akkumulatoren (linearer Trend: $174\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$).

Die Lebenszeit von Akkumulatoren ist von einer Vielzahl an Einflüssen, abhängig. Diese sind neben der Anzahl der durchlaufenen Zyklen [21] auch die Fahrweise der Akkumulatoren. Somit ist es schwierig eine bestimmte Lebenszeit anzugeben. Diese wurde jedoch mit 4 Jahren abgeschätzt. Ähnliches gilt für den Wirkungsgrad. Akkus weisen im unbenutzten Zustand Energieverluste von ca. 30 % pro Monat auf. Diese wurden auf einen zum Energiedurchsatz proportionalen Wirkungsgrad von 95 % abgeschätzt.

[19] elektrische Versorgung eines Gebäudes oder mehrerer Gebäude ohne Anschluss an das öffentliche Stromnetz durch Photovoltaikanlagen, Generatoren, BHKW's ...
[20] siehe Anhang Tabelle A.7
[21] Ent- und Beladungen

Einheit	η %	$K_{Inst.Ges.}$ $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	t_L a	k_{Inst} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh a}}$	K_{Var} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	CO_2 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Akkumulatoren	95	174	4	49	0	0

Tabelle 5.8.: Akkumulatoren.

5.3.2. Warmwasser

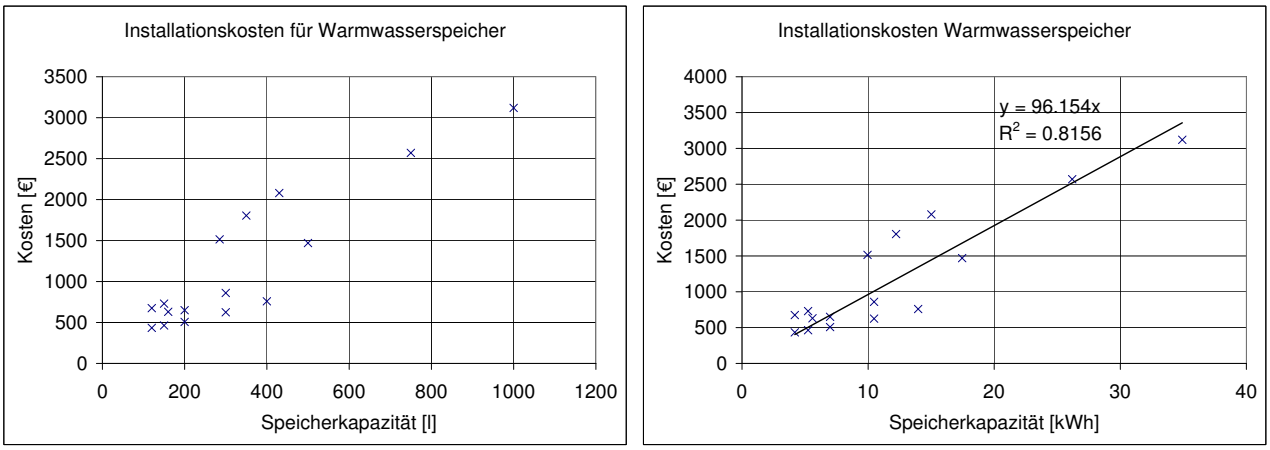


Abbildung 5.11.: *links:* spezifische Kosten für die Installation eines Warmwasserspeichers in Abhängigkeit der Speicherkapazität in Litern; *rechts:* spezifische Kosten für die Installation eines Warmwasserspeichers in Abhängigkeit der Speicherkapazität in kWh (linearer Trend: $96\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$).

Zur Berechnung des Energieinhaltes eines Speichers wurde davon ausgegangen, dass der Temperaturunterschied zwischen der maximalen und minimalen Wassertemperatur im Speicherkessel 30 °C beträgt. Aus diesem Wert, den Installationskosten pro Liter Speicherinhalt und der Lebenszeit von 15 Jahren kann die spezifische Speicherkapazität im kWh pro Liter ermittelt werden [22].

Die Wärmeverluste eines Wärmespeichers hängen vom Temperaturunterschied zwischen Speichermedium und Umgebung und von der Dauer dieses Temperaturunterschieds ab. Demzufolge sind die Verluste nicht vom Energiedurchsatz, sondern unter anderem von der Speicherdauer abhängig. Für die spätere lineare Optimierung ist der Wirkungsgrad jedoch proportional zum Energiedurchsatz definiert. Dazu wird dieser als 95 % angenommen.

Einheit	η %	$K_{Inst.Ges.}$ $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	t_L a	k_{Inst} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh a}}$	K_{Var} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	CO_2 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Warmwasserspeicher	95	96	15	10	0	0

Tabelle 5.9.: Warmwasserspeicher.

[22] siehe Anhang Tabelle A.8

5.4. Blockheizkraftwerke

Zur Bewertung der Kosten für die Installation von BHKW's wurde auf eine Studie, die im Auftrag der Stadt Frankfurt am Main durchgeführt wurde, zurückgegriffen [23]. Diese teilt Blockheizkraftwerke nach den Energieträgern, die diese nutzen, in die vier Gruppen Erdgas, Biogas-/Klärgas, Heizöl und Raps- bzw. Pflanzenöl-BHKW's ein. Für alle diese Gruppen wurden sowohl spezifische Installationskosten $K_{\text{Inst.Ges}}$, als auch spezifische Wartungskosten K_{Wartung} in Abhängigkeit der maximalen elektrischen Leistung P_{el} der BHKW's ermittelt. Für die Installationskosten pro kW Installierte Kapazität wurde eine exponentielle Kostenfunktion $K_{\text{Inst.}}(P_{\text{el}})$ aufgestellt. Die Preise für die Installation beinhalten dabei sowohl die Kosten für das KWK-Modul sowie sämtliche Kosten die für Transport und Montage, Inbetriebnahme, Schalldämmung, Schmierölver- und -entsorgung etc..

Ähnlich wurde für die Wartungskosten pro kWh erzeugte elektrische Energie eine exponentielle Kostenfunktion $K_{\text{Wartung}}(P_{\text{el}})$ aufgestellt. Diese Kosten beinhalten alle Wartungs- und Reparaturarbeiten, Ersatzteile, Betriebsstoffe (außer Brennstoff), die für die BHKW-Anlage benötigt werden. Eine so genannte Generalüberholung ist, ebenfalls enthalten.

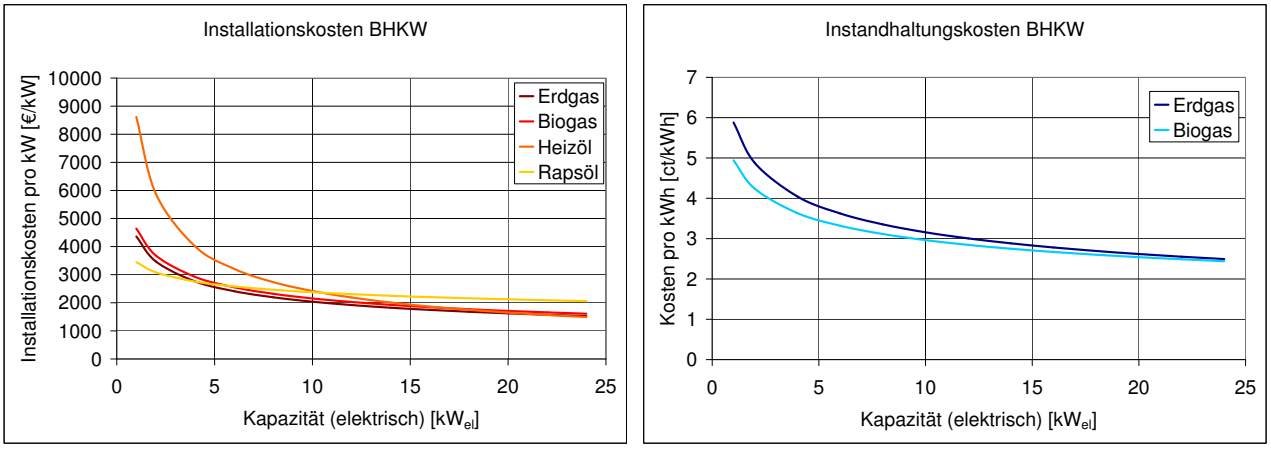


Abbildung 5.12.: *links:* Installationskosten pro kW installierte Leistung. *rechts:* Kosten eines Instandhaltungsvertrags pro kWh erzeugte elektrischer Energie in Abhängigkeit der installierten Leistung in kW_{el}. Für die Instandhaltungskosten von Öl-BHKW's liegen keine statistischen Werte vor.

Zur Bestimmung der linearen spezifischen Installationskosten $K_{Inst.Ges.}$ wurde aus obigen Daten die Steigung der linearen Regression der Kosten in Abhängigkeit der elektrischen Kapazität von BHKW's bis 10 kW_{el} bestimmt.

Zur Ermittlung von typischen Wirkungsgraden von BHKW's wurden einige Anlagen näher betrachtet. Der durchschnittliche Gesamtwirkungsgrad eines BHKW's beträgt 88 %. Diese nutzbare Energie wird im Schnitt zu 33 % als elektrische Energie und zu 67 % als Wärme bereitgestellt. Daraus ergeben sich Wirkungsgrade von $\eta_{\text{el}} = 29$ % und $\eta_{\text{th}} = 59$ %.

Aus Abbildung 5.13 ergeben sich spezifische Installationskosten pro elektrische Kapazität eines BHKW von 2257 Euro. Bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 29 % sind die spezifischen Kosten pro kW in-

[23] Quelle: ASUE (2005)

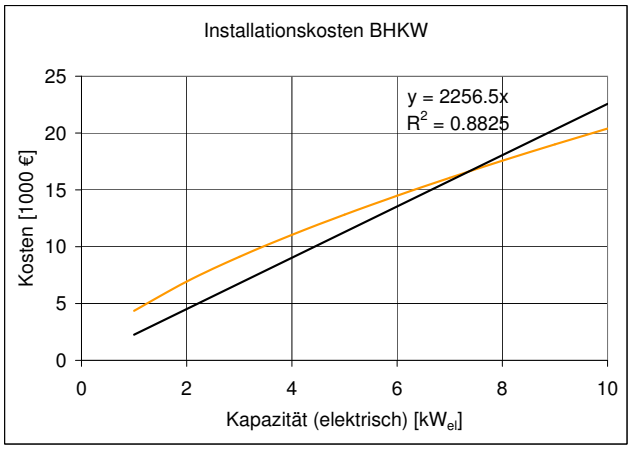


Abbildung 5.13.: Spezifische Kosten von BHKW's in Abhängigkeit der elektrischen Kapazität von BHKW's bis 10 kW_{el}.

stallierte Kapazität der Energieaufnahme gleich 677 Euro. Dementsprechend liegen die annuitätischen Kosten K_{Inst} für ein BHKW für eine Lebensdauer von 15 Jahren bei 65 $\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}$. Die variablen Kosten für ein Blockheizkraftwerk setzen sich zusammen aus den Kosten für den Instandhaltungsvertrag von 3 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}_{\text{el}}}$ und den Energiekosten von 5,76 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$ [24]. Wird Strom aus Blockheizkraftwerken an einen Netzbetreiber verkauft so ist durch das Energie-Einspeise-Gesetz [25] ein Mindesterlös von 5,11 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}_{\text{el}}}$ garantiert. Für diesen Fall ergeben sich variable Kosten von 3 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}_{\text{el}}}$ für den Instandhaltungsvertrag minus 5,11 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}_{\text{el}}}$ für die Vergütung, ergibt K_{Var}=-2,11 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}_{\text{el}}}$.

Einheit	η %	$K_{Inst.Ges.}$ $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$	t_L a	K_{Inst} $\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}$	K_{Var} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	CO_2 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
BHKW gesamt	88	677	15	65	0,00576	0,2
elektrisch genutzt	33				0,03	
elektrisch verkauft	33				-0,0211	
thermisch	66					

Tabelle 5.10.: Blockheizkraftwerk.

5.5. Hilfsprozesse

Für spätere Modellierungen und Optimierungen wurden weitere Prozesse benötigt, die hier kurz zusammengefasst werden.

[24] setzt sich zusammen aus 6,31 Cent/kWh Gaskosten abzüglich 0,55 Cent/kWh Energiesteuern, die für KWK-Anlagen rückerstattet wird.

[25] *Quelle:* EEG (2004).

Einheit	η %	$K_{Inst.Ges.}$ $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$	t_L a	k_{Inst} $\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}$	K_{Var} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	CO_2 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Elektroinstallation	100	0	∞	0	0	0
Warmwassernetz	80	0	∞	0	0	0
Heizkörper	90	0	∞	0	0	0

Tabelle 5.11.: Hilfsprozesse zur Modellierung und Optimierung.

5.6. Zusammenfassung

Einheit	η %	k_{Inst} $\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}$	K_{Var} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	CO_2 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Netzanschluss	100	0	0,1709	0,55
PV-Anlage	100	360	0	0
DC-AC Wechselrichter	93	130	0 / -0,5453	0
Gasheizung	98	14	0,0631	0,2
Pelletheizung	92	50	0,037	0
Solarkollektor	91	36	0	0
Wärmepumpe	460	360	0	0
Akkumulatoren	95	49	0	0
Laderegler	95	62	0	0
Warmwasserspeicher	95	10	0	0
BHKW gesamt	88	65	0,00576	0,2
davon elektrisch	33	0	0,03 / -0,0211	0
davon thermisch	66	0	0	0
Elektroinstallation	100	0	0	0
Warmwassernetz	80	0	0	0
Heizkörper	90	0	0	0

Tabelle 5.12.: Prozesse zur Modellierung und Optimierung.

In Tabelle 5.12 sind alle Prozesse aufgeführt die für die späteren Modelle und Optimierungen standartmäßig benutzt werden.

6. Blockheizkraftwerke

Eine Wärmekraftmaschine wandelt Wärme teilweise in mechanische Energie um. Beispiele für Wärmekraftmaschinen sind der Stirling-, Otto- und Dieselmotor oder die Dampfmaschine und Turbine. Die Wirkungsgrade dieser Maschinen liegt grob bei ca. 40 %, die restliche Energie geht in Form von Wärme verloren. Um den Wirkungsgrad dieser Wärmekraftmaschinen zu erhöhen ist es sinnvoll, die anfallende Restwärme zur Sättigung einer Wärmenachfrage zu nutzen. Diese Nutzung von mechanischer Energie und Wärme nennt man Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Die KWK findet z.B. Millionenfach in Pkws Verwendung, in denen die Abwärme des Motors zur Beheizung der Fahrgastzelle benutzt wird. In einigen Industriezweigen wie beispielsweise in der Papierindustrie die sowohl eine große Nachfrage nach Prozesswärme als auch nach Strom hat, wird die Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt um den Primärenergieeinsatz und somit Kosten zu senken. Kleine Anlagen, die die Kraft-Wärme-Kopplung nutzen nennt man Blockheizkraftwerke.

6.1. Modelle

6.1.1. PowerPlus Technologies GmbH ecopower Mini-BHKW

Abbildung 6.1.: ecopower Mini-BHKW.

[1]Das ecopower Mini-BHKW wandelt mit Hilfe eines Einzylinder 4-Takt-Hubkolbenmotor mit 272 cm^3 Hubraum thermische Energie, die aus Erdgas oder Flüssiggas gewonnenen wird teilweise in mechanische Energie um. Aus dieser mechanischen Energie wird durch einen Generator elektrische Energie

[1] *Quelle:* PowerPlus Technologies GmbH. URL: http://www.ecopower.de/

in einem Leistungsbereich von 1,3 bis 4,7 kW erzeugt. Die dabei anfallende Wärmeleistung beträgt 4,0 bis 12,5 kW. Dementsprechend arbeitet das BHKW in einem Bereich von ca. 30 bis 100 % modulierend. Der Gesamtwirkungsgrad der Energieumwandlung bleibt im gesamten Modulationsbereich größer 90 %.

6.1.2. Solo Stirling GmbH Solo Stirling 161

Abbildung 6.2.: Solo Stirling 161 microKWK-Modul

[2]Das SOLO-Modul wandelt mit Hilfe eines Stirlingmotors Wärmeenergie teilweise in mechanische und anschließend durch einen Generator in elektrische Energie um. Die damit zur Verfügung gestellte Leistung kann in einem Bereich von 2 - 9,5 kW (elektrisch) bzw. 8 - 26 kW (thermisch) stufenlos moduliert werden. Der Wirkungsgrad des Moduls liegt zwischen 22 und 24 % elektrisch bei einem Gesamtwirkungsgrad von 92 - 96 %. Die Verwendung eines Stirlingmotors zeigt gegenüber anderen Verbrennungsmotoren in einigen Bereichen große Vorteile auf. Ein Stirlingmotor ist, wie ein Otto- oder Dieselmotor, eine Kolbenmaschine. Sie nutzt die Volumenausdehnung eines Gases bei Erwärmung und wandelt diese in Bewegung um. Während beim Otto- oder Dieselprozess die Wärmezufuhr durch eine explosionsartige Verbrennung eines Luft- Treibstoffgemisches im Kolbenraum diskontinuierlich von statten geht, kann der Energieträger beim Stirlingmotor kontinuierlich, in einer externen Brennkammer verbrannt werden. Damit ist er Brennstoff variabel. Auf Grund der externen Verbrennung werden ganz ohne Katalysator und Lambdasonde Emissionen weit unter denen anderer Motorenkonzepte erreicht.

6.1.3. Viessmann SOFA 3

[3]Viessmann hat, in Zusammenarbeit mit zwei wissenschaftlichen Instituten, ein Hausenergiesystem auf Basis einer Brennstoffzelle mit einer maximalen elektrischen Leistung von 2 kW entwickelt. Die thermische Leistung der Brennstoffzelle beträgt 5 kW. Die Brennstoffzelle ist in einem Bereich von 20

[2] *Quelle:* Solo Stirling GmbH. URL: http://www.stirling-engine.de/
[3] *Quelle:* J. Lang (2004)

Abbildung 6.3.: Viessmann SOFA 3

% - 100 % der Leistung modulierbar. Zusätzlich ist in das System ein Gasbrenner zur Deckung von Spitzenwärmelasten in einem Leistungsbereich von 15 - 25 kW integriert.

Bei dieser Anlage handelt es sich um einen Prototyp in dritter Version. Die Marktreife des Aggregates wird von Viessmann auf 2010 prognostiziert.

Brennstoffzellen generieren in den so genannten Stacks aus je zwei Protonen und zwei Elektronen die aus molekularem Wasserstoff generiert werden und einem Sauerstoff-Atom sowohl elektrischen Strom als auch Wärme. Als Reaktionsprodukt entsteht Wasser. Dabei arbeiten Brennstoffzellen nahezu lautlos und sehr effizient bei geringer Schadstoffemission. In der Viessmann-Brennstoffzelle können neben reinem Wasserstoff auch wasserstoffhaltige Gase und Treibstoffe eingesetzt werden. Hierbei muss der eingesetzte Energieträger allerdings vor der Nutzung in der Brennstoffzelle unter hohem Aufwand in einem Reforming-Prozess in Wasserstoff, Kohlendioxid und in weitere Bestandteile aufgespaltet werden. Außer dem muss der Brennstoff entschwefelt und vom Kohlenmonoxid befreit werden.

Die Brennstoffzelle liefert, im Gegensatz zu Blockheizkraftwerken mit mechanischem Antrieb Gleichstrom, der von einem Wechselrichter in netzkonformen Wechselstrom umgewandelt werden muss.

6.2. Einsatzbereiche von Blockheizkraftwerken

Um mögliche Einsatzbereiche von Blockheizkraftwerken zu bewerten, wurde ein Vergleich von Gas-Blockheizkraftwerk mit den Eigenschaften aus Tabelle 5.10 mit der Kombination aus Netzanschluss

(siehe Tabelle 5.2) und Gasheizung (siehe Tabelle 5.4) erstellt. Dazu wurde ermittelt, welcher Primärenergieeinsatz pro kWh nachgefragter Gesamtenergie in Abhängigkeit des Stromanteils am Gesamtenergiebedarf (SaE) benötigt wird (siehe Abbildung 6.4). Der Gesamtenergiebedarf ergibt sich aus der Summe des nachgefragten Stroms (E_{N_S}) [4] und der nachgefragten Wärme (E_{N_W}) ($E_{ges} = E_{N_S} + E_{N_W}$). Somit ist der Stromanteil am Gesamtenergiebedarf gleich $\frac{E_{N_S}}{E_{ges}}$. Der Primärenergiebedarf pro kWh Gas wurde dabei als 1 kWh und pro kWh Strom aufgrund des Umwandlungswirkungsgrades der Kraftwerke und der Netzverluste als 2,5 kWh angenommen. Die Summe aus Wärme- (E_{N_W}) und Stromnachfrage (E_{N_S}) wurde als 1 kWh definiert ($E_{N_W} + E_{N_S} = 1\text{kWh}$). Dadurch kann der Primärenergiebedarf pro kWh nachgefragter Gesamtenergie in Abhängigkeit des Stromanteils an der Gesamtenergienachfrage, anhand der Wirkungsgrade der Prozesse und deren jeweiligem Primärenergiebedarf errechnet werden. In Abbildung 6.4 ist dieser Primärenergiebedarf sowohl für eine Gasheizung und einen Netzanschluss, als auch für ein BHKW graphisch dargestellt.

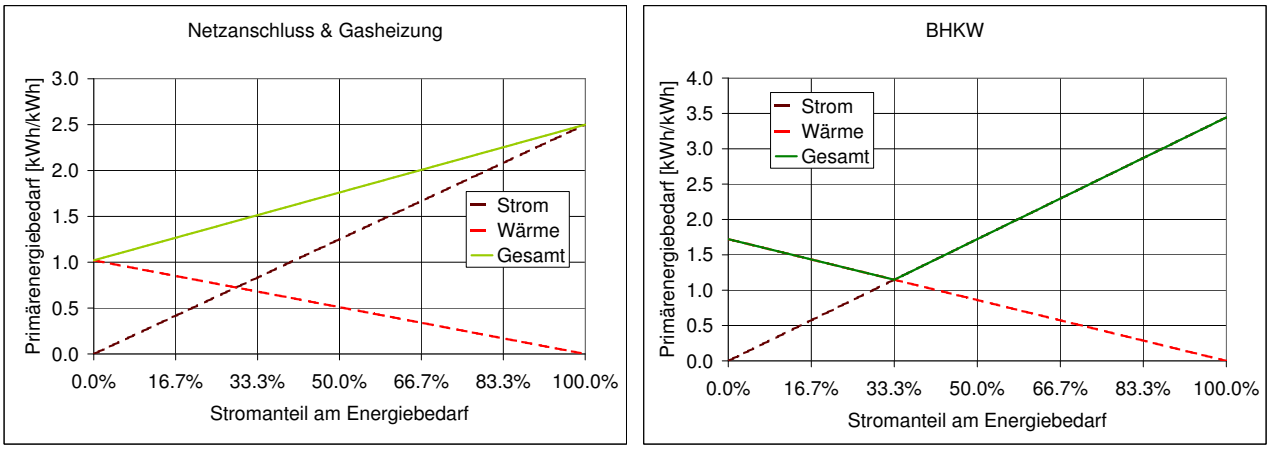


Abbildung 6.4.: Primärenergieeinsatz in kWh Primärenergie pro kWh nachgefragter Energie in Abhängigkeit vom Anteil des Strombedarfs am Gesamtenergiebedarf; *links:* für die Kombination aus Netzanschluss und Gasheizung; *rechts:* für ein BHKW.

Bei der Variante mit Netzanschluss und Heizung ist keine Kopplung der beiden Prozesse zur Deckung der Nachfrage gegeben. Dadurch kann immer die gerade benötigte Energiemenge an Strom und Wärme bereitgestellt werden. Die vom Prozess aufgenommene Energiemenge (E_{auf}) ist dabei durch den Wirkungsgrad des Prozesses (η) mit der Energienachfrage verknüpft.

$$E_{auf_W}(SaE) = E_{N_W}/0,98 \tag{6.1}$$

$$E_{auf_S}(SaE) = E_{N_S}/1 \tag{6.2}$$

Der Primärenergiebedarf ergibt sich zu:

$$E_P(SaE) = E_{auf_W} * 1\frac{\text{kWh}}{\text{kWh}} + E_{auf_S} * 2,5\frac{\text{kWh}}{\text{kWh}} \tag{6.3}$$

(siehe Abbildung 6.4 *links*).

Ein BHKW arbeitet hingegen mit einem festen Verhältnis von Strom zu Wärme (hier 33 $\%_{el}$ zu 67 $\%_W$). Für die Energie, die das BHKW aufnehmen muß um die Nachfrage nach Strom bzw. Wärme zu

[4] Indizes: N: Nachfrage; W: Wärme; S: Strom; P: Primärenergie; auf: Aufnahme

decken gilt:

$$E_{auf_W}(SaE) = E_{N_W}/(0,88 * 0,67) \tag{6.4}$$

$$E_{auf_S}(SaE) = E_{N_W}/(0,88 * 0,33) \tag{6.5}$$

Entspricht die Nachfrage nicht dieser Verteilung wurde so verfahren, dass sowohl die Nachfrage nach Strom als auch die nach Wärme mindestens gedeckt sind.

$$E_{auf}(SaE) = E_{auf_W} \text{ falls } E_{auf_W} \geq E_{auf_S} \tag{6.6}$$

bzw.

$$E_{auf}(SaE) = E_{auf_S} \text{ falls } E_{auf_S} > E_{auf_W} \tag{6.7}$$

und

$$E_P(SaE) = E_{auf} * 1\frac{\text{kWh}}{\text{kWh}} \tag{6.8}$$

(siehe Abbildung 6.4 *rechts*).

Überschüssig produzierte Wärme bzw. Strom bleibt ungenutzt.

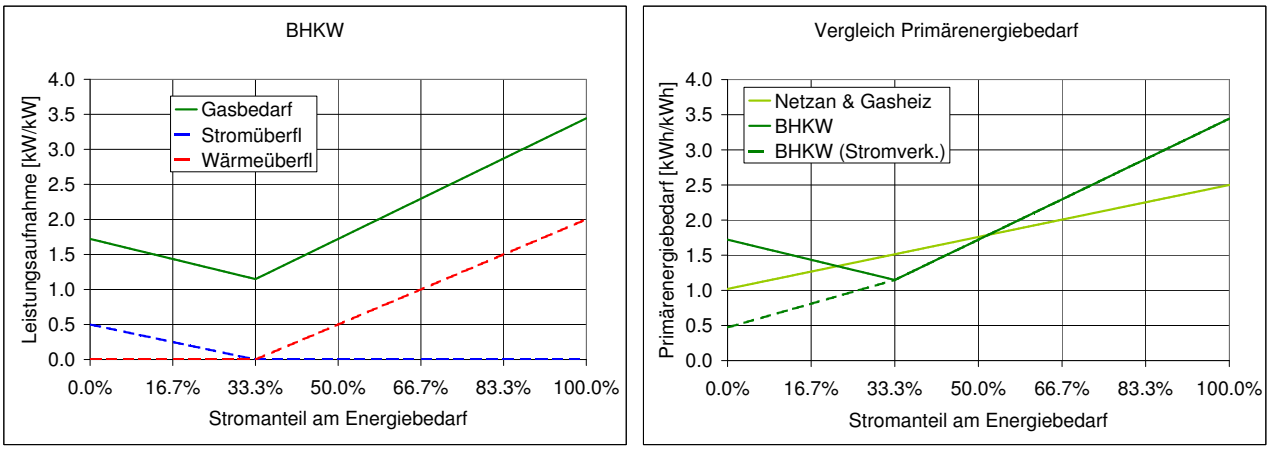


Abbildung 6.5.: *links:* Primärenergiebedarf des BHKW und überschüssig vom BHKW produzierte Wärme bzw. Strom; *rechts:* Primärenergieeinsatz in kWh Primärenergie pro kWh nachgefragter Energie in Abhängigkeit vom SaE für die Kombination aus Netzanschluss und Gasheizung und für ein BHKW (gestrichelte Linie: Berücksichtigung des Verkaufs des überschüssig produzierten Stromes mit 2,5 kWh/kWh).

Wie in Abbildung 6.5 zu sehen, ist trotz der teilweisen Erzeugung von ungenutzter Energie zwischen einem Stromanteil am Gesamtenergiebedarf von 22 % und 55 % der Primärenergiebedarf des BHKW geringer, als bei der Kombination aus Netzanschluss und Gasheizung (N&G).

Stellt man dem die Brennstoff- und Strombezugskosten die bei der Deckung der Energienachfrage entstehen gegenüber, zeigt sich, dass das BHKW von ca. 10 % bis zu ca. 70 % Stromanteil am gesamten Energiebedarf die Energie günstiger zur Verfügung stellen kann (siehe Abbildung 6.7 *links*).

Die CO_2 Belastung pro kWh Energienachfrage ist unter 63 % SaE bei der Nutzung eines BHKW niedriger (siehe Abbildung 6.8). Dies ist zum Teil durch eine Gutschrift von CO_2-Emissionen für

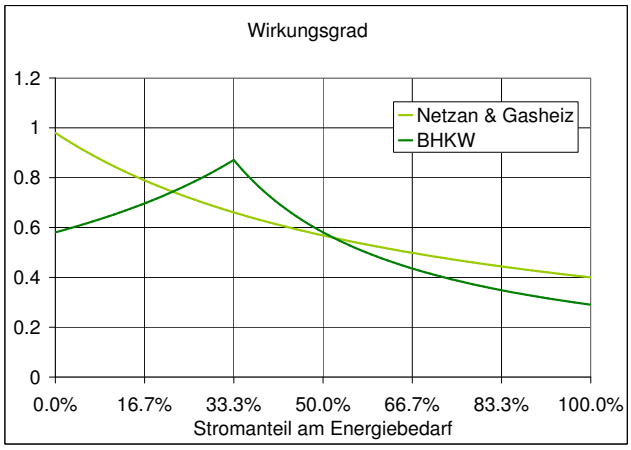


Abbildung 6.6.: Wirkungsgrad der beiden Optionen

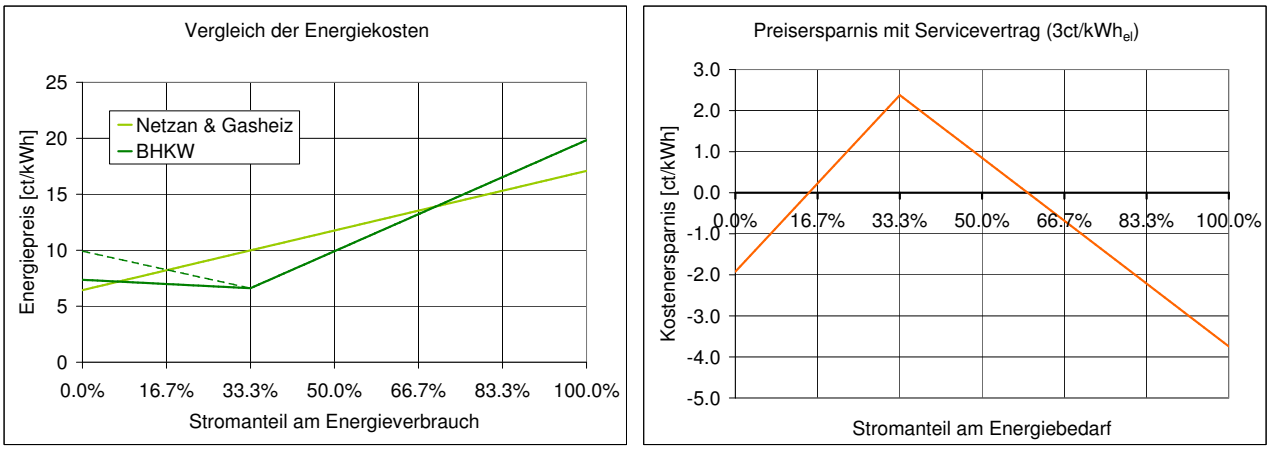


Abbildung 6.7.: *links:* Energiebezugskosten in Abhängigkeit des Stromanteils für beide Varianten (gestrichelte Linie: ohne Berücksichtigung der Verkaufserlöse aus der Stromeinspeisung); *rechts:* Kostenersparnis pro kWh Energie bei der Nutzung eines Blockheizkraftwerks zur Deckung der Energienachfrage in Abhängigkeit des Stromanteils an der Gesamtnachfrage. Hier ist im Gegensatz zur linken Abbildung ein Servicevertrag mit Kosten von 3 Cent/kWh$_{el}$ berücksichtigt.

verkauften Strom begründet. Bezieht man die Verringerung der CO_2-Emission die durch die Nutzung eines Blockheizkraftwerks bei optimaler Auslastung (33 % Strom- und 67 % Wärmenachfrage) voll auf die Stromproduktion so ergibt sich eine Einsparung von ca. 0,27 kg CO_2 / kWh$_{el}$.

Aus energetischer und umwelttechnischer Sicht ist die Nutzung eines BHKW in Fällen vorzuziehen, in denen das Verhältnis von Strom- und Wärmenachfrage zum Verhältnis von Strom- und Wärmebereitstellung durch das BHKW in etwa entspricht. Berücksichtigt man einen Servicevertrag rechnet sich ein BHKW in einem Bereich zwischen ca. 15 und 60 % (siehe Abbildung 6.7 *rechts*). Allerdings ist zu beachten, dass für das BHKW deutlich höhere Installationskosten aufgebracht werden müssen, sodass auf die geringeren Energiebezugskosten [5] die Kosten für die Installation aufgerechnet werden müssen.

[5] Im folgenden werden mit Energiekosten sämtliche, auf kWh bezogene Gesamtkosten bezeichnet. Diese beinhalten somit die Energiebezugskosten, die Installationskosten und sonstige Kosten (z.B. Servicevertrag). Als Energiebezugskosten werden die Kosten für die bezogene Energiemenge bezeichnet (Strom- bzw. Gaskosten).

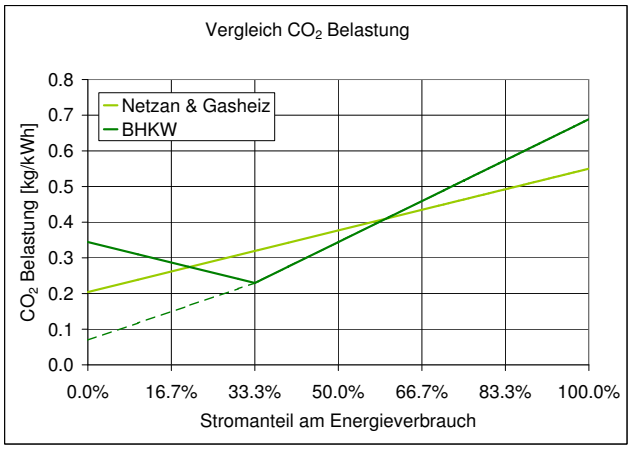


Abbildung 6.8.: CO_2 Belastung pro kWh Energienachfrage in Abhängigkeit des Stromanteils am Energiebedarf (gestrichelte Linie: Berücksichtigung einer Gutschrift von 0,55 kg CO_2 pro kWh verkauftem Strom). (CO_2-Emissionsminderung bei 33 % Stromanteil am Strombedarf ca. 0,27 kg CO_2 / kWh$_{el}$).

Die spezifischen Installationskosten pro Kapazität werden dabei, wie in Tabelle 5.12 angegeben, zu Grunde gelegt.

Die benötigte Kapazität zur Deckung der Nachfrage entspricht der größten nachgefragten Leistung der betrachteten Zeitperiode. Um die Installationskosten möglichst gering zu halten ist es sinnvoll die nachgefragte Energie mit einer möglichst kleinen installierten Kapazität zu Decken und somit eine große Auslastung zu erreichen. Ein Maß für die Auslastung sind Volllaststunden. Diese ergeben sich aus dem Quotienten aus pro Jahr aufgenommener Energie und installierter Kapazität. 8760 Volllaststunden sind dementsprechend eine Auslastung von 100 % [6].

Um die Gesamtkosten pro kWh Energie für die beiden Szenarien (N&G bzw. BHKW) bestimmen zu können, wurden für die Auslastung der Prozesse Volllaststunden für die verschiedenen Prozesse abgeschätzt. Die Volllaststunden einer Gasheizung wurden mit 2000 h/a angenommen. Dies deckt sich mit späteren Simulationen (siehe Abbildung 6.9).

Aus Volllaststunden (VLS) und der, durch einen Prozess aufgenommenen Energie (E_{auf}) kann auf die pro kWh zu installierende Kapazität (Kap) der verschiedenen Prozesse und somit auf die spezifischen Installationskosten pro kWh Energienachfrage geschlossen werden. Aus $\frac{E_{auf}}{Kap} = VLS$ und $K_{Inst} = k_{Inst} * Kap$ ergeben sich die energiebezogenen Installationskosten zu

$$K_{Inst}(E_{auf}) = k_{Inst}\frac{VLS}{E_{auf}} \tag{6.9}$$

In Abbildung 6.9 *rechts* sind die spezifischen Installationskosten in Abhängigkeit des Anteils des nachgefragten Stromes an der Gesamtnachfrage zu sehen.

Wie in Abbildung 6.10 zu sehen ist, sind die Gesamtkosten pro kWh bezogener Energie stark von der Auslastung des Blockheizkraftwerks und dem Anteil des Strombedarfs am Energieverbrauch abhängig.

[6] vgl. 4.1.1

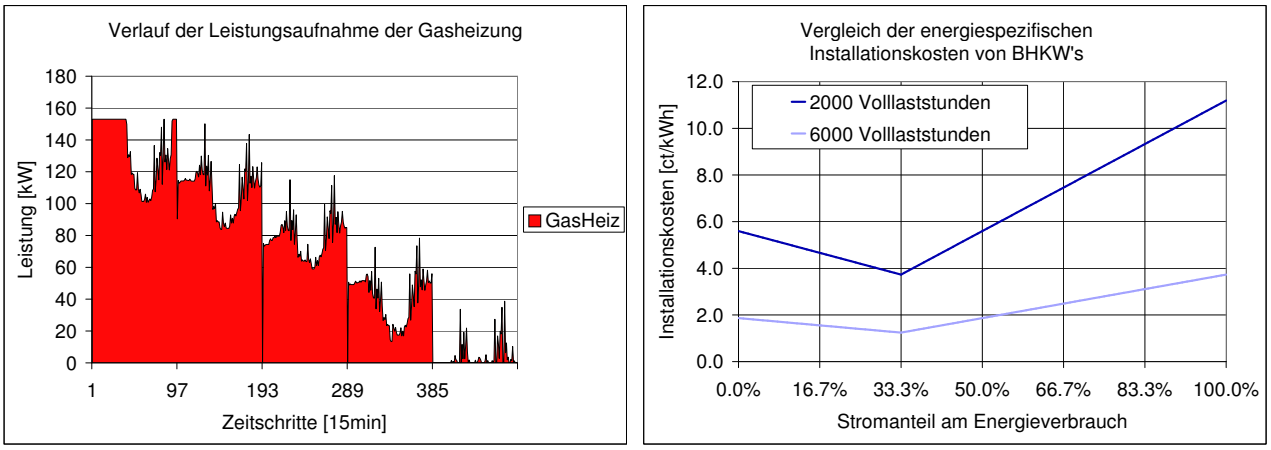


Abbildung 6.9.: *links:* Verlauf der Leistungsaufnahme einer Gasheizung für ein Jahr, das aus 5 repräsentierenden Tagen modelliert wurde. Die Kapazität beträgt in diesem Beispiel 153 kW, die aufgenommene Energie 350 MWh und dementsprechend die Auslastung 2286 h/a; *rechts:* Vergleich der auf die Energienachfrage umgelegten Installationskosten eines BHKW in Abhängigkeit der Volllaststunden bei Installationskosten von 65 Euro pro kW Prozesskapazität.

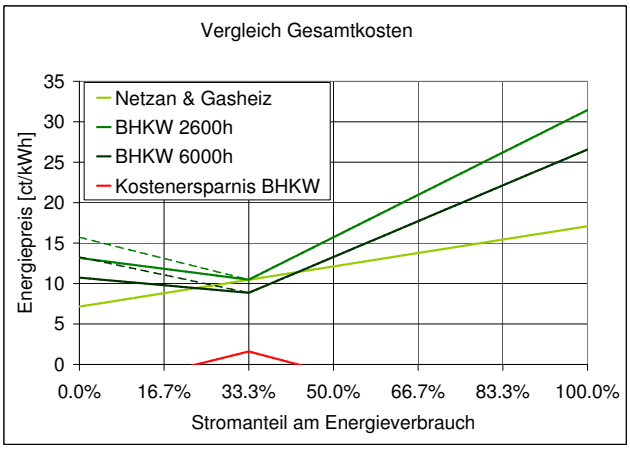


Abbildung 6.10.: Gesamtkosten (Energiekosten) für die Deckung der Nachfrage der Variante Gasheizung und Netzanschluss mit 2000 Volllaststunden der Gasheizung im Vergleich mit einer Deckung durch ein BHKW mit je einer Auslastung von 2600 bzw. 6000 Volllaststunden. (gestrichelte Linien entsprechen Kosten ohne Vergütung des verkauften Stroms). Die rote Linie zeigt die Kostenersparnis in Cent pro kWh bei einer Auslastung des BHKW von 6000 und der Gasheizung von 2000 Volllaststunden (Maximum = 1,61 Cent/kWh).

Für den Fall einer Auslastung des BHKW von 2600 h/a und der Gasheizung von 2000 h/a ergeben sich für einen Anteil der Stromnachfrage von einem Drittel gleiche Kosten für beide Varianten (10,48 Cent/kWh). Für eine höhere Auslastung des BHKW verringern sich die Kosten z.B. auf 8,86 Cent/kWh um 15 % bei 6000 Volllaststunden des BHKW. In diesem Fall stellt das BHKW die Energie [7] in einem Bereich von 23 % bis 43 % Stromanteil des Energiebedarfs günstiger zur Verfügung. Die Installationskosten machen dabei einen Anteil von ca. 17 % bei 6000 Volllaststunden bis ca. 36 % bei

[7] unter Berücksichtigung der Installationskosten

2000 Volllaststunden aus.

Mit einem Mix an Prozessen kann versucht werden bestimmte Energienachfragen an ein BHKW zum Beispiel durch den Einsatz eines Spitzenlastkessels oder von Energiespeichern soweit zu modifizieren, dass das BHKW mit einer möglichst großen Auslastung einen Grundlastteil der Nachfrage decken kann. Somit können die Gesamtkosten reduziert werden.

6.2.1. Variation der Energie- und Installationskosten

Bisher wurde gezeigt, welchen Einfluss der Anteil der Stromnachfrage am Gesamtenergiebedarf und die Auslastung des BHKW auf die Wirtschaftlichkeit haben. Es wurden die heutigen Energiepreise zugrunde gelegt. In diesem Kapitel soll bestimmt werden, welche Auswirkungen eine Änderung der Energie- und Installationskosten auf die ökonomische Beurteilung von Blockheizkraftwerken hat. Dazu werden eine Steigerung der Gaspreise um 20 % bei gleich bleibendem Strompreis, eine Steigerung des Strompreises um 20 % bei gleich bleibenden Gaskosten und eine Verringerung der Installationskosten von Blockheizkraftwerken um 20 % bewertet. Diese Szenarien wurden zur Bewertung, zum Einen der Auswirkung des Verhältnisses von Strom- zu Gaskosten und zum Anderen der Auswirkung des Verhältnisses von Energiekosten zu Installationskosten ausgewählt.

Erhöhung des Gaspreises

In diesem Szenario wurden die Gaspreise von 6,31 Cent pro kWh um 20 % auf 7,57 Cent pro kWh erhöht. Die Strompreise blieben unverändert bei 17,09 Cent pro kWh [8]. Dadurch erhöhen sich die Energiekosten wie in den Abbildungen 6.11 zu sehen.

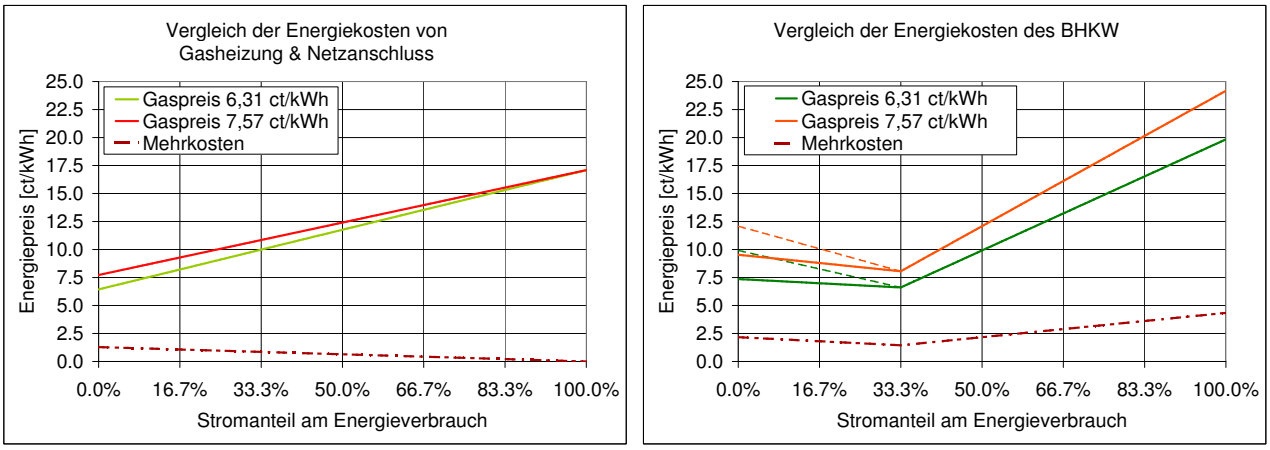


Abbildung 6.11.: *links:* Energiekosten in Abhängigkeit des Stromanteils für die Deckung der Nachfrage mittels Gasheizung und Netzanschluss und dem Gaspreis (punktgestrichelte Linie: Mehrkosten durch den neuen Gaspreis); *rechts:* Energiekosten in Abhängigkeit des Stromanteils für die Deckung der Nachfrage mittels BHKW und dem Gaspreis. (punktgestrichelte Linie: Mehrkosten durch den neuen Gaspreis).

[8] Strom wird in Deutschland zu 10 % aus Gas erzeugt (siehe Abbildung 4.1 *rechts*). Bei einer Erhöhung der Gaspreise um 20 % würde sich dementsprechend der Strompreis um ca. 2 % erhöhen. Dies wurde vernachlässigt.

Eine Erhöhung der Gaspreise wirkt sich stark nachteilig auf die Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken aus. Während sich die Preiserhöhung bei der Variante mit Gasheizung und Netzanschluss hauptsächlich für Nachfragen mit starkem Wärmeanteil bemerkbar machen, ist dies, bei der Variante mit BHKW, sowohl für eine große Wärmenachfrage wie auch für eine große Stromnachfrage unvorteilhaft (siehe Abbildung 6.11). Um den Energiebedarf bei einem Stromanteil am Gesamtenergiebedarf von 33 % zu gleichen Kosten zu stillen wie mit einer Gasheizung und einem Netzanschluss, ist, aufgrund des neuen Gaspreises, eine Auslastung des BHKW von 3300 Volllaststunden nötig. Bei einer Auslastung des BHKW von 6000 Volllaststunden verringert sich der Bereich, in dem das BHKW die Energie preiswerter zur Verfügung stellt im Gegensatz zum alten Gaspreis [9] auf 28 % bis 37 % Stromanteil am Gesamtenergiebedarf (siehe Abbildung 6.12).

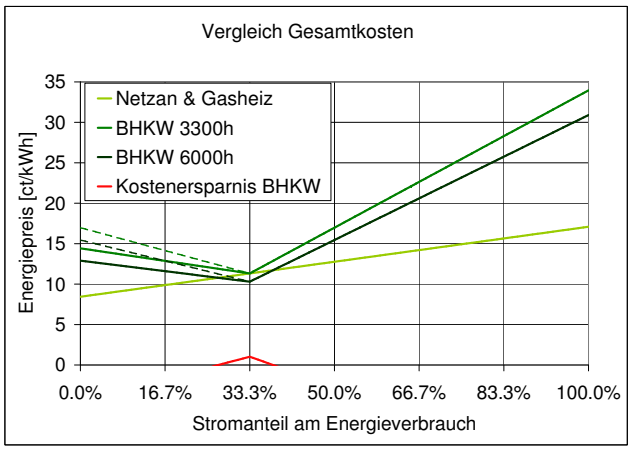


Abbildung 6.12.: Gesamtkosten für die Deckung der Nachfrage der Variante Gasheizung und Netzanschluss mit 2000 Volllaststunden der Gasheizung im Vergleich mit einer Deckung durch ein BHKW mit je einer Auslastung von 3300 bzw. 6000 Volllaststunden. (gestrichelte Linien entsprechen Kosten ohne Vergütung des verkauften Stromes). Die rote Linie zeigt die Kostenersparnis in Cent pro kWh bei einer Auslastung des BHKW von 6000 und der Gasheizung von 2000 Volllaststunden (Maximum = 1,02 Cent/kWh).

Erhöhung des Strompreises

Hier wurden die Strompreise, bei konstanten Gaspreisen, von 17,09 Cent/kWh um 20 % auf 20,51 Cent/kWh erhöht. Die Gestehungskosten der, vom BHKW produzierten Energie, sind von den Strompreisen unabhängig. Entsprechend bleiben die Kosten wie sie in Abbildung 6.7 *links* zu dargestellt sind. Aufgrund der Verteuerung der Energiekosten bei der Deckung der Nachfrage mit Hilfe eines Netzanschlusses und einer Gasheizung erhöht sich die Rentabilität eines BHKW gegenüber diesen Prozessen (siehe Abbildung 6.13).

Bei einer Auslastung des BHKW von 6000 Volllaststunden kann die Energienachfrage in einem Bereich von 19 % bis 54 % Stromnachfrage am Energiebedarf kostengünstiger gedeckt werden. Die Kostenersparnis beträgt maximal knapp 24 %.

[9] von 23 % - 43 %

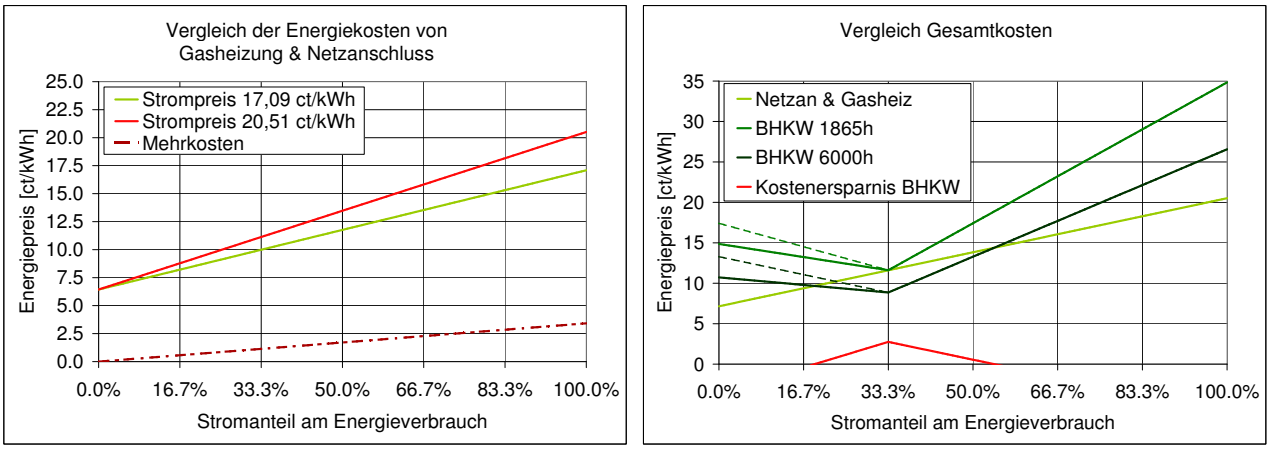


Abbildung 6.13.: *links:* Energiebezugskosten in Abhängigkeit des Stromanteils für die Deckung der Nachfrage mittels Gasheizung und Netzanschluss und dem Strompreis. (punktgestrichelte Linie: Mehrkosten durch den neuen Strompreis); *rechts:* Gesamtkosten für die Deckung der Nachfrage der Variante Gasheizung und Netzanschluss mit 2000 Volllaststunden der Gasheizung im Vergleich mit einer Deckung durch ein BHKW mit je einer Auslastung von 1865 bzw. 6000 Volllaststunden. (gestrichelte Linien entsprechen Kosten ohne Vergütung des verkauften Stromes). Die rote Linie zeigt die Kostenersparnis in Cent pro kWh bei einer Auslastung des BHKW von 6000 und der Gasheizung von 2000 Volllaststunden (Maximum = 2,75 Cent/kWh).

Verringerung der Installationskosten

Als weiterer Ansatzpunkt wurde eine Verringerung der Installationspreise für Blockheizkraftwerke von 65 Euro/kW um 20 % auf 52 Euro/kW untersucht. Die Energiebezugskosten blieben hierbei unangetastet und sind somit sowohl für die Prozesse Gasheizung und Netzanschluss, als auch für ein BHKW gleich wie in Abbildung 6.7.

Eine Verringerung der Installationspreise ergibt sich beispielsweise aus der Installation eins großen Blockheizkraftwerks anstatt von mehreren kleinen (siehe Abbildung 5.12). Ebenso könnten durch steigenden Produktionszahlen, aufgrund von Skaleneffekten, BHKW's in Zukunft günstiger gefertigt und angeboten werden.

Durch die niedrigeren Installationspreise arbeitet das BHKW zwischen einem Stromanteil von 22 % bis 45 % finanziell effektiver als eine Gasheizung und ein Netzanschluss.

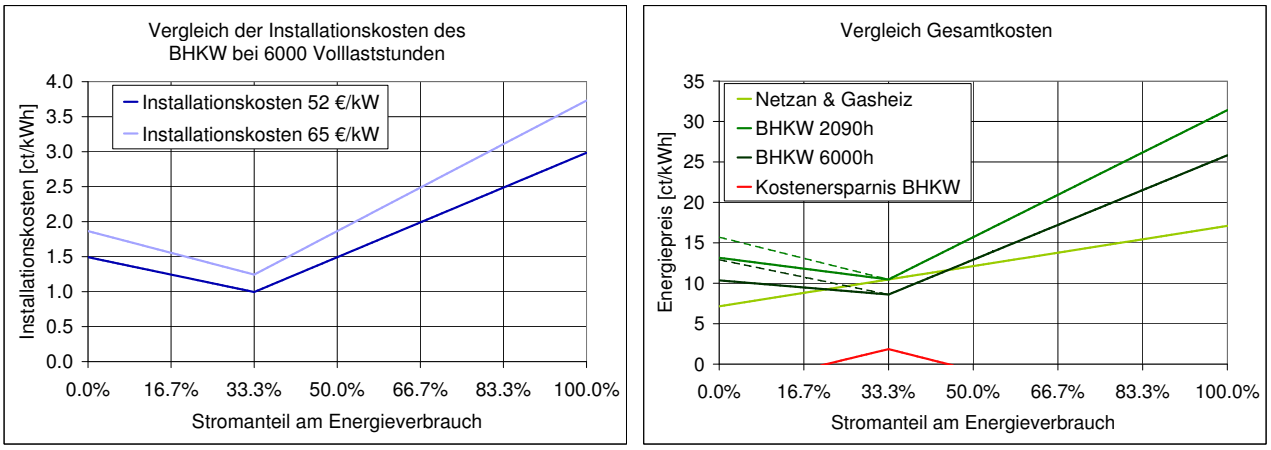


Abbildung 6.14.: *links:* Vergleich der Installationskosten in ct/kWh in Abhängigkeit des Stromanteils und der Installationskosten in Euro/kW Kapazität bei einem BHKW mit 6000 Volllaststunden; *rechts:* Gesamtkosten für die Deckung der Nachfrage der Variante Gasheizung und Netzanschluss mit 2000 Volllaststunden der Gasheizung im Vergleich mit einer Deckung durch ein BHKW mit je einer Auslastung von 2090 bzw. 6000 Volllaststunden. (gestrichelte Linien entsprechen Kosten ohne Vergütung des verkauften Stromes). Die rote Linie zeigt die Kostenersparnis in Cent pro kWh bei einer Auslastung des BHKW von 6000 und der Gasheizung von 2000 Volllaststunden (Maximum = 1,86 Cent/kWh).

Zusammenfassung

In den obigen Betrachtungen ist zu erkennen, dass der Anteil der Stromnachfrage an der Gesamtenergienachfrage das entscheidende Kriterium darstellt, ob ein BHKW den richtigen Prozess zur Deckung der Nachfrage darstellt. Nur in einem relativ geringen Bereich des Verhältnisses zwischen Strom- und Wärmebedarf arbeitet ein BHKW effektiv und wirtschaftlich. Dieser Bereich ist unter anderem stark von der Auslastung eines BHKW abhängig (siehe Abbildung 6.9). Bei schlechter Auslastung eines BHKW können die spezifischen Installationskosten einen deutlichen Anteil an den Kosten zur Deckung der Nachfrage haben. Ferner ist das Verhältnis von Gas- zu Stromkosten von großer Bedeutung. Sinkende Gas- aber auch steigende Strompreise steigern, ebenso wie eine Verringerung der spezifischen Installationskosten pro Kapazität, die Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken im Vergleich zu einer „herkömmlichen“ Energieversorgung.

6.3. Effektivität eines BHKW aufgrund des Jahresenergiebedarf

Um ein BHKW sinnvoll zu nutzen sollte sowohl der erzeugte elektrische Strom als auch die anfallende Wärme bestmöglich genutzt werden. Ein typischer Wert für das Verhältnis zwischen elektrischer Leistung und Wärmeleistung eines BHKW ist ein Drittel (elektrisch) zu zwei Drittel (Wärme) (siehe Kapitel 6.2).

Verschiedene Typen von Haushalten haben einen unterschiedlichen Bedarf an Energie. Im Schnitt [10]

[10] *Quelle:* M. Barbosa (2004)

ergibt sich ein Stromverbrauch von 31,3 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$ und ein Wärmeverbrauch (bei Nutzung einer Gasheizung) von 161,8 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$. Dies entspricht einem Verhältnis von 15 % Strom- und 85 % Gas- bzw. Wärmebedarf. In Gebäuden mit einer größeren Anzahl an Familien wird dieses Verhältnis aufgrund sinkender spezifischer Wärmenachfrage auf bis zu 20 % (elektrisch) zu 80 % (Wärme) erhöht (siehe Abbildung 6.15 *links*).

Anzahl Familien im Gebäude	kWh Strom pro m^2	kWh Gas pro m^2	Anteil Strom [%]	Anteil Wärme [%]
1	31.1	164.3	16	84
2	32.8	188.0	15	85
3 bis 4	32.1	157.7	17	83
5 bis 10	31.2	126.5	19	81
11 und mehr	29.3	117.9	20	80
Gesamt	31.3	161.8	15	85

Tabelle 6.1.: Strom- und Wärmenachfrage in kWh pro Quadratmeter Wohnfläche und pro Jahr.

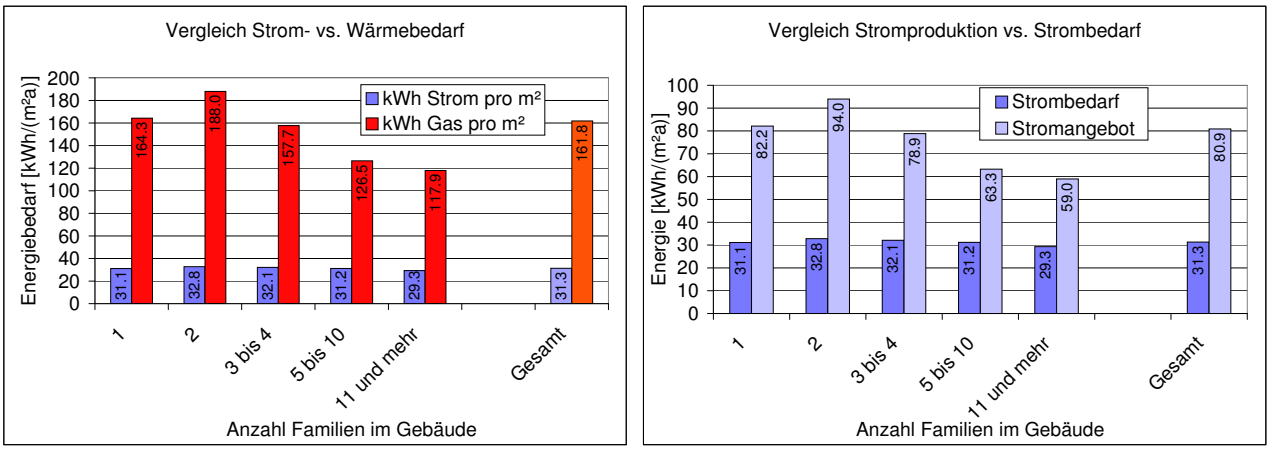


Abbildung 6.15.: *links:* Strom und Wärmebedarf pro Quadratmeter Bezugsfläche und Jahr in Abhängigkeit der Anzahl an Familien im Gebäude; *rechts:* Stromproduktion eines BHKW bei Deckung der Wärmenachfrage im Vergleich zur Stromnachfrage je m^2 und Jahr.

Um mit einem BHKW [11] die Nachfrage nach Strom und Wärme mindesten zu decken muss in unseren Breitengraden [12] das BHKW, aufgrund des Jahresenergiebedarfs, wärmegeführt betrieben werden. Dabei wird der gesamte Wärmebedarf mittels eines BHKW gedeckt. Der dadurch bereitgestellte Strom wird zum Einen zur Deckung der eigenen Stromnachfrage benutzt, zum Anderen an einen Netzbetreiber verkauft. Für die Energieproduktion eines BHKW zur Versorgung von Haushalten ergeben sich dadurch folgende Werte (Tabelle 6.2).

Bei einer vollständigen Deckung der Wärmenachfrage von 161,8 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$ [13] durch das BHKW würden ca. 81 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$ Strom erzeugt werden. Der Bedarf an Primärenergie liegt dafür bei 279 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$. Bei diesem Szenario kann jedoch eine elektrische Energie von 49,6 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$ in das Stromnetz eingespeist werden. Bewertet man diese mit einem Primärenergieeinsatz von 2,5 kWh pro kWh (sihe Kapitel 6.2) kann

[11] Keine anderen Prozesse werden in diesem Fall zur Deckung der Nachfrage nach Strom und Wärme berücksichtigt.
[12] bei herkömmlicher Wärmedämmung der versorgten Gebäude.
[13] im Mittel über alle Gebäudetypen

Anzahl Familien im Gebäude	Strom-nachfrage	Strom-angebot	Strom-überschuss
1	31.1	82.2	51.1
2	32.8	94.0	61.2
3 bis 4	32.1	78.9	46.8
5 bis 10	31.2	63.3	32.1
11 und mehr	29.3	59.0	29.7
Gesamt	31.3	80.9	49.6

Tabelle 6.2.: Stromnachfrage der Bewohner, Stromangebot durch das BHKW und der daraus resultierende Stromüberschuss in kWh pro Quadratmeter und Jahr in Abhängigkeit der Anzahl der Familien in einem Gebäude.

der Primärenergieeinsatz für diese Betrachtung um 124 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$ auf 155 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$ reduziert werden. Der CO_2 Ausstoß für diese Fahrweise beträgt 55,7 kg pro Jahr und Quadratmeter Wohnfläche. Jedoch kann eine Emission von 27,3 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{a}}$ aufgrund des Stromverkaufs gutgeschrieben werden, sodass der bereinigte CO_2 Ausstoß rechnerisch 28,4 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{a}}$ beträgt.

Im Gegensatz dazu wäre bei einer Versorgung des Objekts mit einer Gasheizung und einem Netzanschluss ein Primärenergiebedarf von 243 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$ [14] bei einer CO_2 Produktion von 50,24 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{a}}$ zu verbuchen. Die jährlichen Energiebezugskosten für diese Art der Vorsorgung belaufen sich auf 10,42 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$ für die Wärme- und 5,35 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$ für die Strombereitstellung auf gesamt 15,77 Euro pro Quadratmeter Bezugsfläche. Geht man von 2000 Volllaststunden einer Gasheizung und annuitätischen Installationskosten von 14 Euro pro kW und Jahr aus, ergeben sich zusätzliche Installationskosten von 1,16 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$ für eine zu installierende Leistung von 83 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Somit belaufen sich die jährlichen Gesamtkosten für die Versorgung eines durchschnittlichen Gebäudes auf 16,92 Euro pro Quadratmeter Wohnfläche.

Bei der Variante der Versorgung durch ein BHKW fallen spezifische Gaskosten von 16,05 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$, spezifische Instandhaltungskosten [15] von 2,43 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$ und spezifische Verkaufserlöse für überschüssig produzierten Strom von 2,53 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$ an [16]. Somit ergeben sich variable Kosten von 15,94 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$. Soll der Energiebedarf des Gebäudes durch ein BHKW zu den gleichen Gestehungskosten produziert werden wie bei der Variante mit Gasheizung und Netzanschluss, so dürfen die Installationskosten für das BHKW dementsprechend 0,98 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$ nicht übersteigen. Jedoch betragen bei annuitätischen Installationskosten von 65 $\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}$ die Installationskosten selbst bei einer Auslastung von 8760 Volllaststunden 2,07 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$.

Dementsprechend ist eine Versorgung eines Gebäudes mit diesem Verhältnis von Strom- zu Wärmenachfrage zwar ökologisch, aufgrund des geringeren Primärenergiebedarfs (siehe auch Abbildung 6.5 *rechts*) und CO_2 Ausstoßes, nicht aber ökonomisch allein durch ein Blockheizkraftwerk zu bewerkstelligen.

Wesentlich kostengünstigere Ergebnisse könnten mit einem BHKW erzielt werden, wenn die Nachfrage nach Strom und Wärme besser mit dem Angebot des Blockheizkraftwerks übereinstimmen würde. Dies kann erreicht werden, wenn im oben betrachteten Gebäudetyp die gesamte Stromnachfrage durch ein

[14] Netzanschluss 78 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$; Gaszeizung 165 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$
[15] aufgrund des Servicevertrags
[16] siehe Tabelle 5.10

BHKW gedeckt wird und die benötigte Wärme zum Teil durch die Abwärme des BHKW und zum Teil durch einen zusätzlichen Spitzenlastkessel erbracht wird. Der Vorteil liegt darin, dass somit eine möglichst große Auslastung, des mit hohen Investitionskosten belegten Blockheizkraftwerks, erreicht werden kann und sich somit die jährlichen Kosten verringern.

Legt man die durchschnittlichen Nachrfragen nach 31,3 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$ an elektrischer Energie und 161,8 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$ an Wärme zu Grunde, könnte bei einer vollständigen Stillung der Stromnachfrage durch das BHKW, von diesem 62,6 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$ an Wärme erbracht werden. Dementsprechend müsste die Versorgungslücke von 99,2 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$ durch einen Spitzenlastkessel (Gasheizung) geschlossen werden.

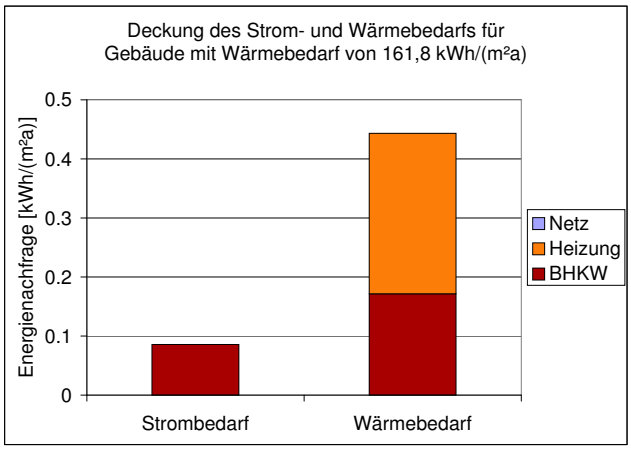


Abbildung 6.16.: Anteil des vom BHKW erbrachten Stroms (100 %) und der erbrachten Wärme (39 %) am gesamten Jahresenergiebedarf. Bezogen auf die im Schnitt pro Tag nachgefragte Energie.

Die dadurch entstehenden variablen Kosten belaufen sich auf 13,53 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$ (6,39 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$ durch Energiebezugskosten der Gasheizung, 6,21 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$ durch die Energiebezugskosten und 0,94 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$ durch die Instandhaltungskosten des BHKW). Um mit gleichen jährlichen Kosten wie bei der Variante mit Gasheizung und Netzanschluss die Nachfrage decken zu können, dürfen somit die Installationskosten 3,39 $\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2\text{a}}$ nicht übersteigen. Durch den Einsatz der Gasheizung zur Abdeckung der Spitzenlasten reduziert sich die Auslastung dieser in diesem Fall. Diesbezüglich wurde dieselbe Kapazität von 83 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ der Gasheizung zu Grunde gelegt wie bei dem Szenario in dem die gesamte Wärmenachfrage durch die Gasheizung gedeckt wird. Entsprechend könnte zu gleichen Gesamtkosten ein BHKW mit 36 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ Leistungsaufnahme [17] installiert werden. Daraus ergeben sich Volllaststunden des Blockheizkraftwerks von ca. 3000 $\frac{\text{h}}{\text{a}}$. Im Allgemeinen kann allerdings von einer höheren Auslastung des BHKW aufgrund des installierten Spitzenlastkessel und mit einer geringeren zu installierenden Kapazität des Spitzenlastkessels gerechnet werden. Somit ergibt sich eine geringere jährliche finanzielle Belastung. Darüber hinaus kann die CO_2 Produktion und der Primärenergiebedarf um ca. 15 % gesenkt werden.

[17] entspricht ca. 10 $\text{W}_{\text{el}}/\text{m}^2$

Szenario	Primär-energie $[\frac{kWh}{a}]$	Installations-kosten $[\frac{Euro}{m^2a}]$	Energiebe-zugskosten $[\frac{Euro}{m^2a}]$	Gesamt-kosten $[\frac{Euro}{m^2a}]$	CO_2 Emission $[\frac{kg}{m^2a}]$
N+G	243,4	1,16	15,77	16,92	50,2
BHKW	154,6 [a]	5,17	15,94	21,11 [b]	28,4 [a]
BHKW+G	209,3	3,03	13,53	16,56 [b]	41,9

Tabelle 6.3.: Primärenergiebedarf, CO_2 Emission und Kosten der drei Szenarien. [a]: unter Berücksichtigung des Stromverkaufs [b]: bei 3500 Volllaststunden des BHKW.

6.4. Effektivität eines BHKW aufgrund des monatlichen Energiebedarfs

In Kapitel 6.3 wurde nicht berücksichtigt, in wie weit die unterschiedliche Nachfrage nach Raumwärme der verschiedenen Monate eine Rolle spielt. Um diese mit einzubeziehen wurde anhand der Wetterdaten aus Kapitel 3.2.1 und den daraus resultierenden Heizgradstunden (siehe Abbildung 3.12) der Anteil des Raumwärmebedarfs jedes Monats am Jahresheizwärmebedarf bestimmt.

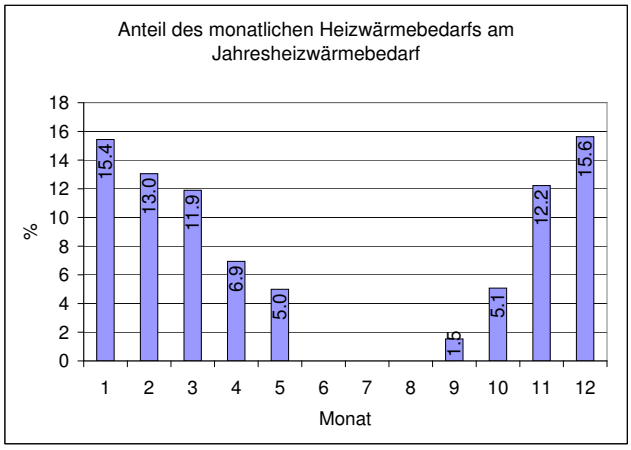


Abbildung 6.17.: Anteil des Heizwärmebedarf jedes Monats vom gesamten Jahresheizwärmebedarf.

Zu dem wurde der Energiebedarf für die Deckung der Stromnachfrage und die Aufbereitung des Warmwassers pro Monat abgeschätzt. Für die Stromnachfrage wurde der durchschnittliche Jahresenergiebedarf von 31,3 kWh (siehe Tabelle 3.1) pro Quadratmeter Wohnfläche gleichmäßig zu 2,61 kWh/m^2 auf die Monate verteilt. Beim Energiebedarf für die Warmwasserbereitstellung wurde ebenso der Jahresenergiebedarf von 12,5 kWh/m^2 (siehe Kapitel 3.2.4) zu gleichen Teilen den Monaten zugeordnet. Aus diesen Daten kann, in Abhängigkeit des Dämmstandards der Gebäude, der monatliche Energiebedarf für Wärme und Strom abgeschätzt werden.

Für den mittleren gesamten Wärmebedarf von 161,8 $\frac{kWh}{m^2a}$ werden, unter Berücksichtigung der Energienachfrage für die Warmwasseraufbereitung, 149,3 $\frac{kWh}{m^2a}$ für die Bereitstellung der Raumwärme benötigt. In dieser Betrachtung wird das BHKW so eingesetzt, dass in Monaten, in denen der Stromanteil am Gesamtenergiebedarf größer als 33 % ist [18] , der Wärmebedarf vollständig durch das BHKW und der benötigte Strom aus BHKW-Strom und Netzstrom gedeckt wird. In Monaten in

[18] Sommerfall

denen der Stromanteil kleiner als 33 % ist [19], wird dieser Bedarf vollständig durch das BHKW und die Wärmenachfrage durch die anfallende BHKW-Wärme und einen zusätzlichen Spitzenlastkessel gedeckt (siehe Abbildung 6.18).

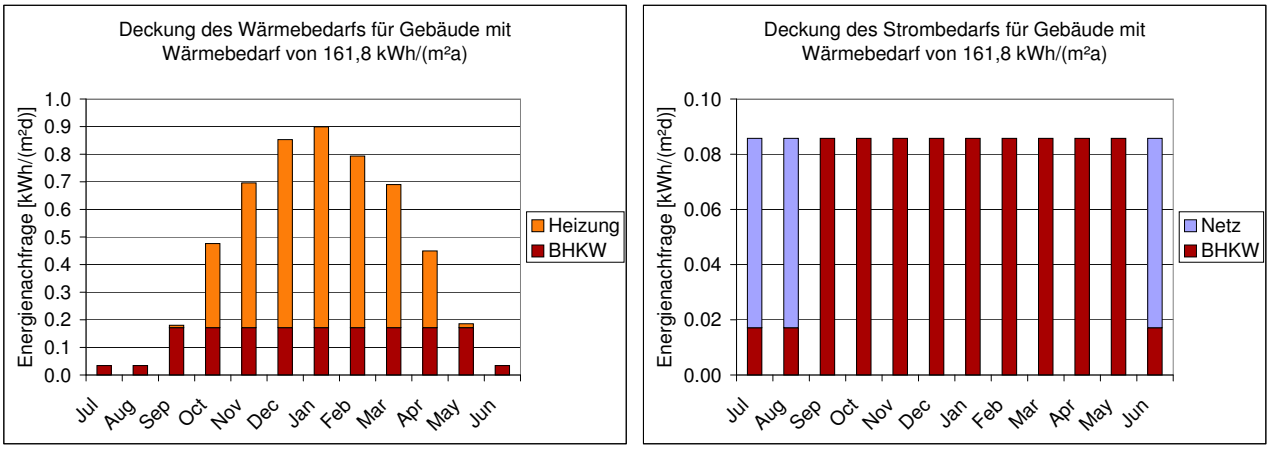


Abbildung 6.18.: *links:* Deckung des täglichen Wärmebedarfs durch BHKW und Gasheizung in den verschiedenen Monaten; *rechts:* Deckung der täglichen Stromnachfrage durch das BHKW und einen Netzanschluss in den verschiedenen Monaten. Je für eine Wärmenachfrage von 161,8 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2a}}$.

Bei dieser Fahrweise können vom BHKW 25,0 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2a}}$ (80 %) des Strombedarfs und 50,1 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2a}}$ (31 %) des Wärmebedarfs gedeckt werden. Die restliche Nachfrage wird durch eine Gasheizung bzw. einen Netzanschluss gestillt. Der dabei resultierende Primärenergiebedarf liegt bei 216 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2a}}$ und der CO_2 Ausstoß bei 43,5 $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^2a}}$. Bei einer Dimensionierung der Gasheizung wie in Kapitel 6.3 ergeben sich für eine Auslastung des BHKW von 3150 Volllaststunden dieselben jährlichen Kosten wie bei einer herkömmlichen [20] Versorgung.

In Abbildung 6.18 ist dargestellt, dass das eingesetzte BHKW in den drei Sommermonaten Juni, Juli und August aufgrund der geringen Wärmenachfrage die Stromnachfrage nicht decken kann. In den anderen Monaten hingegen wird der Bedarf an elektrischer Energie nur durch das BHKW erbracht. Im Allgemeinen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die nachgefragte elektrische Leistung eines Haushalts starke Lastspitzen aufweist, welche nicht wirtschaftlich durch ein BHKW gedeckt werden können. Um diese Aspekte weiter beleuchten zu können werden in den folgenden Kapiteln Modelle erstellt, in denen eine noch genauere zeitliche Auflösung zu Grunde gelegt wird.

6.5. Verteilung der Kosten auf Wärme und Strom

Betrachtet man die Gesamtkosten für die, von einem BHKW zur Verfügung gestellten Energie, ergibt sich, aufgrund der hohen Investitionskosten, eine starke Abhängigkeit von der Auslastung des Blockheizkraftwerks. In Abbildung 6.19 sind diese Kosten im Vergleich zu den Kosten, die durch die

[19] Monate mit Raumwärmebedarf
[20] Gasheizung und Netzanschluss

Deckung mittels einer Gasheizung und eines Netzanschlusses entstehen abgebildet (siehe auch Abbildung 6.20). Um die Kosten vergleichen zu können, wurde mit beiden Varianten eine Nachfrage von 0,59 kWh Wärme und 0,29 kWh elektrischer Energie gedeckt. Diese entsprechen dem Energieangebot eines Blockheizkraftwerks unter Nutzung einer Menge an Gas mit Brennwert von 1 kWh.

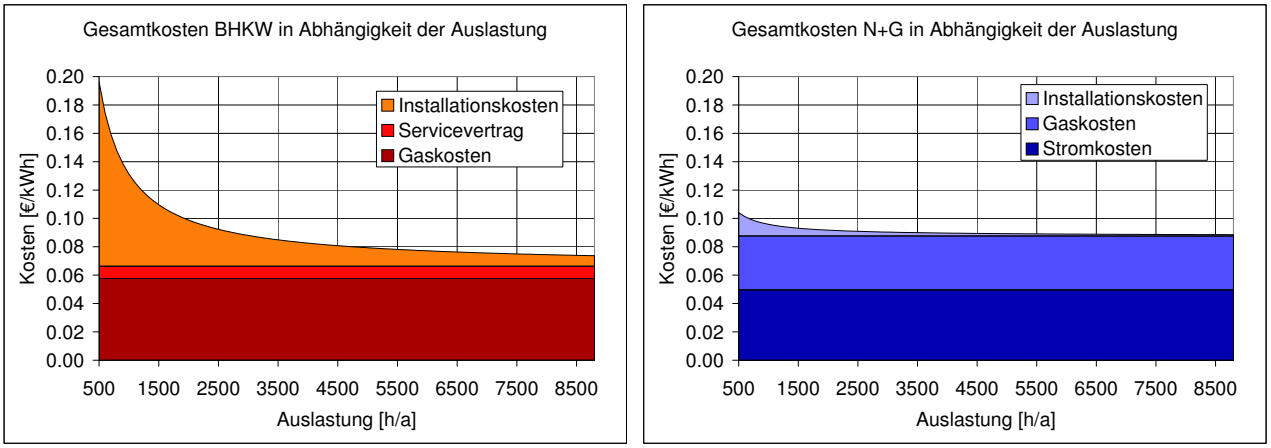


Abbildung 6.19.: *links:* Gesamtkosten der Energieversorgung mittels BHKW (0,59 kWh Wärme und 0,29 kWh elektrischer Energie); *rechts:* Gesamtkosten der Energieversorgung mittels Gasheizung und Netzanschluss der selben Nachfrage.

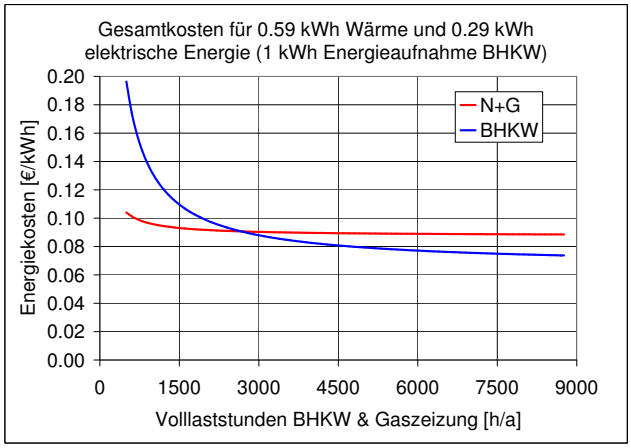


Abbildung 6.20.: Kosten pro 0,59 kWh Wärme und 0,29 kWh elektrischer Energie eines BHKW's im Vergleich zu einer Variante mit Netzanschluss und Gasheizung.

Aufgrund der Bereitstellung von zwei Gütern durch das BHKW ist eine eindeutige Zuweisung von Kosten für Wärme und Strom nicht möglich. Diese Zuweisung kann aus vielen Gesichtspunkten getroffen werden. Im Folgenden sollen einige Möglichkeiten genauer betrachtet werden.

Eine Möglichkeit ist, die gesamten Kosten der produzierten Wärme zuzuordnen. Dabei entstehen, z.B. bei einer Auslastung des BHKW von 5000 Volllaststunden Kosten von 13,45 Cent/kWh Wärme. In diesem Fall werden 0,49 kWh an elektrischer Energie erzeugt, die nicht mit Kosten beaufschlagt werden. Diese Bewertung der Kosten ist dann sinnvoll, wenn die elektrische Energie nicht genutzt werden kann.

Für den Fall, dass nur der Strom des BHKW verbraucht wird und die Wärme ungenutzt bleibt sind

die Gesamtkosten auf die Stromproduktion umzulegen. Die Kosten für eine kWh elektrischer Energie belaufen sich hierbei auf 27,31 Cent und sind somit über 10 Cent/kWh höher als bei Netzstrom. Es fallen 2,0 kWh an Abwärme an.

Eine weitere Möglichkeit der Verteilung der Kosten ist, die vom BHKW erzeugte Wärme mit den Preisen, für mit einer Gasheizung erzeugter Wärme, zu belegen. Die restlichen Kosten können dann auf die Stromproduktion umgelegt werden. Daraus ergibt sich, bei einer Auslastung des BHKW von 5000 Volllaststunden, ein Strompreis von 12,95 Cent/kWh. Damit ist BHKW-Strom um knapp ein Viertel (4,14 Cent/kWh) günstiger als Netzstrom.

Entsprechend können die Strompreise für BHKW-Strom gleich den Netzstrompreisen gesetzt werden. Dadurch können die Wärmekosten auf 5,03 Cent/kWh um ca. 29 % gesenkt werden.

Weiter wurde geprüft, welche Energiekosten sich ergeben, wenn das Verhältnis von Strom- zu Wärmekosten unverändert zu Netzstrom und Wärme aus einer Gasheizung bleibt. Hier kommt es, bei einer Auslastung des BHKW von 5000 Volllaststunden zu einer Verringerung der Strom- bzw. Wärmekosten zum Fall der Versorgung mit Gasheizung und Netzanschluss um je 13 %.

Die Kosten für die verschiedenen Varianten sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

Szenario	Stromkosten [Cent/kWh]	Wärmekosten [Cent/kWh]
Netzanschluss und Gasheizung	17,09	7,07
Blockheizkraftwerk		
nur Kosten für Wärme	0	13,45
nur Kosten für Strom	27,31	0
Wärmekosten gleich wie bei Gasheizung	12,95	7,07
Stromkosten wie bei Netzanschluss	17,09	5,03
gleiches Verhältnis	14,84	6,14

Tabelle 6.4.: Kosten für Wärme und Strom (bei 5000 Volllaststunden des BHKW und 2000 Volllaststunden der Gasheizung).

Aus diesen energiebezogenen Kosten [21] können bereits einige (wirtschaftliche) Aspekte für Blockheizkraftwerke abgeleitet werden. Da die Kosten, für mittels eines BHKW produzierten Strom, ohne eine Nutzung der dabei erzeugten Wärme deutlich über denen für Netzstrom liegen. Eine solche, rein stromgeführte Fahrweise, stellt aus Sicht der Energiepreise keine sinnvolle Alternative zu Netzstrom dar. Ähnliches gilt für vom BHKW erzeugte Wärme. Auch durch die Mindestvergütung mit 5,11 Cent/kWh für BHKW-Strom durch den Netzbetreiber kostet eine kWh BHKW-Wärme 10,93 €. Somit ist eine wärmegeführte Fahrweise ohne eigene Stromnutzung unrentabel (vergleiche Abbildung 6.10).

[21] bei Auslastungen der Prozesse von 5000 Volllaststunden des BHKW und 2000 Volllaststunden der Gasheizung

7. Modellierung möglicher Szenarien

Um die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken in verschiedenen Einsatzgebieten zu ermitteln wurden Computermodelle von Gebäuden entwickelt. Dazu mussten sowohl die Strom- und Wärmenachfragen der Bewohner, als auch die thermischen Eigenschaften der Gebäude modelliert werden. Anschließend wurden die Nachfragekurven durch modellierte Prozesse wie Beispielsweise eine Gasheizung oder ein Blockheizkraftwerk gedeckt und die dabei entstehenden Kosten und anderen Umwelteinflüsse untersucht.

7.1. Modellierung der Nachfrage

Zur Modellierung der Nachfrage nach Strom und warmem Wasser wurde eine Monte-Carlo-Simulation programmiert. Anhand dieses Programms konnten dann beliebig viele mögliche Strom- bzw. Warmwassertagesgänge in minutengenauer Auflösung erzeugt werden. Der Heizwärmebedarf wurde mit Hilfe von Wetterdaten und der thermischen Eigenschaften von Gebäuden modelliert.

7.1.1. Monte Carlo Simulation der Stromnachfrage

Um den Lastgang eines Haushalts zu ermitteln wurde eine Monte Carlo Simulation der Nutzung elektrischer Geräte erstellt. Am Beispiel eines Fernsehers soll die Vorgehensweise verdeutlicht werden.

Struktur des Modells am Beispiel Fernsehgerät

Zuerst wurden Daten über die Energieaufnahme von Fernsehgeräten gesammelt. Aus der Energieaufnahme pro Stunde der Geräte bei Betrieb wurde die durchschnittliche Leistung $P_{\oslash\ \text{Fernseher}}$ der Geräte bestimmt. Um eine Variation der Leistungen verschiedener Fernseher zu ermöglichen, wurde aus $P_{\oslash\ \text{Fernseher}}$ eine zufällige Leistung mit $P_{\text{Modell Fernseher}} = P_{\oslash\ \text{Fernseher}} \pm 50\%$ für den Modellfernseher ermittelt.

Weiter wurde ermittelt, wie lange ein Fernsehgerät im Schnitt pro Tag läuft und daraus eine maximale $t_{\text{max Fernseher}}$ und eine minimale $t_{\text{min Fernseher}}$ Laufzeit für den Modellfernseher festgelegt. Für die Monte Carlo Simulation gilt dementsprechend $t_{\text{min Fernseher}} < t_{\text{Modell Fernseher}} < t_{\text{max Fernseher}}$.

Um einen möglichen Lastgang $P_{\text{Modell Fernseher}}(t)$ des Fernsehgeräts zu erhalten mussten noch Einschaltzeiten $t_{\text{ein Fernseher}}$ für die Nutzung des Modellfernsehgeräts generiert werden. Dazu wurde die

Wahrscheinlichkeit für das Einschalten in Abhängigkeit der Tageszeit ermittelt. Im Fall des Fernsehers konnten dazu, neben anderen Quellen, TV-Einschaltquoten [1] genutzt werden.

Für die Modellierung der Stromnachfrage wurde für jede Stunde des Tages die Wahrscheinlichkeit $W_{\text{ein Fernseher}}(Stunde)$ für das Einschalten des Fernsehers ermittelt. Das Simulationsprogramm vergleicht die Wahrscheinlichkeit $W_{\text{ein Fernseher}}(1)$ der ersten Stunde des Tages mit einer erzeugten Zufallszahl Rnd [2]. Ist die Zufallszahl Rnd größer als die Einschaltwahrscheinlichkeit, so wird in dieser Stunde der Fernseher nicht ein geschaltet und dieselbe Prozedur in der nächsten Stunde wiederholt. Ist $Rnd < W_{\text{ein Fernseher}}(Stunde)$ wird ebenso mit Hilfe einer Zufallszahl eine Einschaltminute in der jeweiligen Stunde ermittelt. Somit wird vom Simulationsprogramm eine minutengenaue Einschaltzeit $t_{\text{ein Fernseher}}$ erzeugt. Die Modelllastkurve des Modellfernsehers ergibt sich aus der Einschaltzeit $t_{\text{ein Fernseher}}$, der Laufzeit $t_{\text{Modell Fernseher}}$ und der ermittelten Leistungsaufnahme $P_{\text{Modell Fernseher}}$.

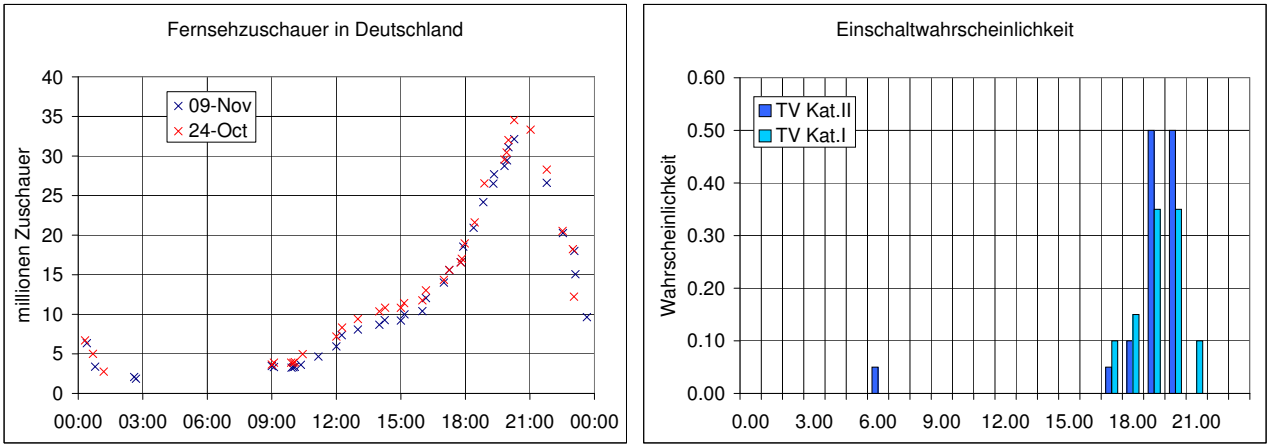


Abbildung 7.1.: *links:* Zuschauerzahlen im deutschen Fernsehen, berechnet aus den Einschaltquoten und den Zuschauerzahlen der ARD für den 24.10.2005 und den 9.11.2005; *rechts:* Wahrscheinlichkeit für das Einschalten eines Modellfernsehers an einem Wochentag eines berufstätigen Nutzers (Kat. I: Wahrscheinlichkeit für eine lange Nutzung; Kat. II: Wahrscheinlichkeit für eine kurze Nutzung des Fernsehgerät).

Im Modell wurde von einer durchschnittlichen Nutzung eines Fernsehgeräts von 4,1 Stunden pro Tag [3] ausgegangen. Die Nutzungsdauer pro Lauf wurde in zwei Kategorien eingeteilt. Zum einen in eine lange Nutzung, die der Länge von Filmen oder ähnlichem entspricht. Hier wurde $t_{\text{min Fernseher}} =$ 2,1 h und $t_{\text{max Fernseher}} =$ 5,0 h gewählt. Die andere Kategorie repräsentiert kurze Fernsehnutzungen, beispielsweise Nachrichten mit 0,2 h $< t_{\text{Modell Fernseher}} <$0,5 h. Die durchschnittliche Laufzeit beträgt somit 3,55 h bzw. 0,35 h pro Lauf. Berücksichtigt man die mittlere Laufzeit am Tag von 4,1 Stunden so können die Einschaltwahrscheinlichkeiten für beide Kategorien $W_{\text{ein Fernseher Kat.I}} = 1,2$ und $W_{\text{ein Fernseher Kat.II}} = 1,05$ abgeschätzt werden (siehe Abbildung 7.1 *rechts*). Zur Verteilung der Tageseinschaltwahrscheinlichkeiten auf den Tagesverlauf wurde auf die Zuschauerzahlen im deutschen Fernsehen zurück gegriffen (siehe Abbildung 7.1 *links*).

Aus den stündlichen Wahrscheinlichkeiten wurde durch das Simulationsprogramm ein möglicher Ta-

[1] *Quelle:* ARD. URL: http://quoten.daserste.de/quoten.asp
[2] $Rnd \in [0, 1]$
[3] *Quelle:* M. Barbosa (2004) Tabelle 2.5-6.

gesverlauf der vom Modellfernseher aufgenommenen Leistung erstellt (siehe Abbildung 7.2).

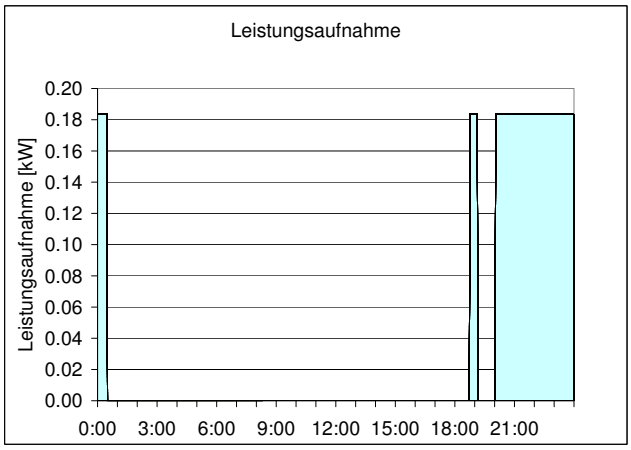


Abbildung 7.2.: Möglicher Lastgang eines Fernsehers eines berufstätigen Nutzers an einem Werktag.

Um das Nutzungsverhalten der Bevölkerung von Fernsehern möglichst getreu abzubilden wurde weiter die Durchsetzung von Haushalten mit Fernsehern $W_{\text{Haushalt Fernseher}}$ benutzt (siehe Tabelle 7.1). Hierzu wird ebenfalls nach der Monte Carlo Methode vor der Erzeugung des Lastgangs des Fernsehers ermittelt, ob der betreffende Haushalt über einen Fernseher verfügt.

Aufstellung des Modells

Bewohner pro Haushalt	1	2	3	4	5	Durchschnitt
Anteil an Haushalten	0,323	0,332	0,168	0,14	0,037	1
Gerät	$W_{\text{Anz.1}}$	$W_{\text{Anz.2}}$	$W_{\text{Anz.3}}$	$W_{\text{Anz.4}}$	$W_{\text{Anz.5}}$	$W_{\oslash}$
Waschmaschine	0,89	0,95	0,99	0,99	0,99	0,94
Wäschetrockner	0,18	0,36	0,54	0,72	0,9	0,40
Kühlschrank	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Gefrierschrak	0,32	0,64	0,92	0,92	0,92	0,63
Geschirrschpüler	0,29	0,58	0,87	0,95	0,95	0,60
Elektroherd	0,70	0,98	0,99	0,99	0,99	0,89
Mikrowellengerät	0,33	0,66	0,99	0,99	0,99	0,66
Fernseher	0,95	0,98	0,99	0,99	0,99	0,97
Computer	0,29	0,57	0,86	0,99	0,99	0,60
Fernseher2	0,21	0,42	0,63	0,84	0,99	0,47
Computer2	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3	0,13
Kühlschrank2	0,07	0,14	0,21	0,28	0,35	0,16
Staubsauger	0,33	0,66	0,99	0,99	0,99	0,67
Anzahl Lampen	15	23	31	39	47	25

Tabelle 7.1.: Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein verschiedener elektrischer Geräte in einem Haushalten Abhängigkeit der Bewohnerzahl des Haushalts.

Für die wichtigsten elektrischen Geräte eines Haushalts wurde nach dem gleichen Prinzip vorgegangen.

Die gesamte Leistungsaufnahme eines Haushalts gilt dann:

$$P_{\text{Haushalt}}(t) = \sum_i P_{\text{Haushalt } i}(t) \tag{7.1}$$

mit $i \subseteq j$ und $j \in$ {Fernseher, Waschmaschine, Kühlschrank, Elektroherd, ...} mit der Bedingung: $j \in i$ wenn Zufallszahl $Rnd_j \leq W_{\text{Haushalt } j}$.

Die elektrischen Geräte konnten dabei in drei Kategorien eingeteilt werden. In einer Kategorie werden Geräte zusammengefasst, deren Nutzung stark vom Verhalten der Bewohner des Haushalts abhängen, wie Fernseher, Geschirrspülmaschine, Fön, Licht. Für diese Geräte wurde, wie beim Beispiel des Fernsehers, eine Einschaltwahrscheinlichkeit für jede Stunde bestimmt, um damit die Lastgänge zu erzeugen.

Eine weitere Kategorie bilden Geräte die nur wenig vom Benutzer abhängig sind. Zu diesen gehören Kühlschrank und Gefriertruhe. Hier wurde aus den durchschnittlichen Jahresenergieverbrauchen ein durchschnittlicher Tagesenergiebedarf berechnet. Aus diesem und der Leistungsaufnahme der Geräte konnte auf die tägliche Laufzeit geschlossen werden. Geht man von einer bestimmten Laufzeit pro Kühlzyklus des Kühlschranks bzw. der Gefriertruhe aus, kann die Anzahl der täglichen Anläufe berechnet werden, welche mittels Zufallszahlen gleichmäßig über den Tag verteilt werden kann und somit ein Lastgang für diese Geräte simuliert wird.

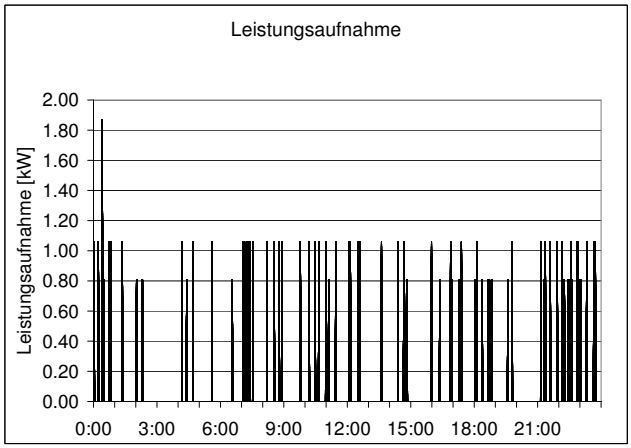


Abbildung 7.3.: Möglicher Lastgang eines Kühlschranks und einer Gefriertruhe.

Die letzte Gruppe bilden Geräte mit konstanter Stromaufnahme wie elektrische Uhren und der Standby Betrieb bei Fernseher, Computer, Radio...

Erzeugung von Haushaltstypen

Um ein möglichst getreues Abbild der Stromnachfrage von Haushalten zu erhalten wurde dem unterschiedlichen Verhalten der Bewohner von Haushalten Rechnung getragen. Dazu wurden fünf verschiedene Modellbewohner mit unterschiedlichem Nutzungsverhalten erdacht [4]. Diese sind Schüler1, Schüler2, Angestellte, Arbeiter und Hausfrauen bzw. -Männer (siehe Abbildung 7.4). Jeder dieser

[4] für Wochentage

Personen wurden elektrische Geräte und deren Nutzungswahrscheinlichkeiten pro Stunde zugewiesen. Zu den Geräten zählen Fernseher, Radio, Computer, Mikrowelle, Wasserkocher und elektrische Beleuchtung. Dabei können mehrere Personen gleichzeitig das gleiche Gerät benutzen, jedoch kann jedes Gerät gleichzeitig nur einmal betrieben werden.

Die unterschiedlichen Personen unterscheiden sich sowohl durch die Zeiten, an denen sie im Haushalt anwesend sind, als auch durch die Geräte, die sie nutzen. Aus den fünf unterschiedlichen Personen wurden unterschiedliche Haushaltstypen erstellt und in Tabelle 7.2 zusammengefasst.

Haushaltstyp	Schüler	Arbeiter	Angestellter	Hausfrau, -mann	Haushalt
Single-I		1			abends
Single-II				1	am Tag
Rentner				2	am Tag
Paar-I		1		1	am Tag
Paar-II		1	1		abends
Paar-II+	1	1	1		abends
Paar-I++	2	1		1	am Tag

Tabelle 7.2.: Anzahl der verschiedenen Bewohnertypen in den jeweiligen Haushalten und Unterscheidung der Haushalte, in denen die Hausarbeit wie Kochen und Wäsche waschen hauptsächlich unter Tags bzw. am Abend erledigt wird.

Neben den, in Abbildung 7.4 berücksichtigten elektrischen Geräten wurden die Geräte und Maschinen, die zur Bewerkstelligung des Haushalts benutzt werden (Kochplatten, Ofen, Waschmaschine, Wäschetrockner, Geschirrspülmaschine und Staubsauger) in zwei unterschiedliche Nutzungsfälle eingeteilt. In Fall I wird die Hausarbeit hauptsächlich am Tag erledigt, im Fall II hauptsächlich am Abend.

Mit Hilfe der zusammengetragenen Daten können mögliche Lastgänge für die verschiedenen Haushaltstypen erzeugt werden.

Wie in Abbildung 7.6 zu sehen werden für gleiche Haushalte höchst unterschiedliche Lastkurven durch die Monte Carlo Simulation generiert.

Schüler 1

Gerät	Kat	Leistung(kW)	Laufzeit (h)		Anlaufwahrscheinlichkeit mit Startzeit nach … Uhr																							
			min	max	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00
L Sch 1	1	0.12	0.10	0.50	0.10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.90	0.10							0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.10	0.10	0.10	0.50	0.50
L Gang	1	0.12	0.10	0.20	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.70	0.70							0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.30	0.50	0.50	0.50
L Küche	1	0.12	0.10	0.20							0.10	1.00											0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.10
L Wohn	1	0.24	0.50	4.00								0.05											0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10
Mikro	4	0.9	0.05	0.10								0.10							0.10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.02
Wasserkocher	4	1.20	0.05	0.10								0.10																
Computer	2	0.5	0.10	0.30								0.10							0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Computer	2	0.5	1.00	3.00															0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
TV	2	0.15	0.20	0.50								0.05							0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
TV	2	0.15	1.00	4.00															0.10	0.10	0.10	0.10	0.15	0.50	0.50	0.10	0.02	
Radio	2	0.10	0.20	0.40								0.50							0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Radio	2	0.1	0.50	4.00															0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
TV 1	2	0.12	0.20	0.50								0.05							0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
TV 1	2	0.12	1	4															0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.5	0.5	0.1	0.02	
L Bad	1	0.10	0.10	0.30	0.10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.20	0.80										0.10	0.10	0.05	0.20	0.50	0.60	0.60

Schüler 2

Gerät	Kat	Leistung(kW)	Laufzeit (h)		Anlaufwahrscheinlichkeit mit Startzeit nach … Uhr																							
			min	max	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00
L Sch 2	1	0.12	0.10	0.50	0.10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.90	0.10							0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.10	0.10	0.10	0.50	0.50
L Gang	1	0.12	0.10	0.20	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.70	0.70							0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.30	0.50	0.50	0.50
L Küche	1	0.12	0.10	0.20							0.10	1.00											0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.10
L Wohn	1	0.24	0.50	4.00								0.05											0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10
Mikro	4	0.9	0.05	0.10								0.10							0.10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.02
Wasserkocher	4	1.20	0.05	0.10								0.10																
Computer 2	2	0.5	0.10	0.30								0.10							0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Computer 2	2	0.5	1.00	3.00															0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
TV	2	0.15	0.20	0.50								0.05							0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
TV	2	0.15	1.00	4.00															0.10	0.10	0.10	0.10	0.15	0.50	0.50	0.10	0.02	
Radio	2	0.10	0.20	0.40								0.50							0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Radio	2	0.1	0.50	4.00															0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
TV 2	2	0.12	0.20	0.50								0.05							0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
TV 2	2	0.12	1	4															0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.5	0.5	0.1	0.02	
L Bad	1	0.10	0.10	0.30	0.10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.20	0.80										0.10	0.10	0.05	0.20	0.50	0.60	0.60

Angestellter

Gerät	Kat	Leistung(kW)	Laufzeit (h)		Anlaufwahrscheinlichkeit mit Startzeit nach … Uhr																							
			min	max	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00
L Sch	1	0.12	0.10	0.50	0.10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.10	1.00											0.05	0.10	0.10	0.10	0.50	0.50
L Gang	1	0.12	0.10	0.20	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10	1.00											0.50	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50
L Küche	1	0.12	0.10	1.00							0.10	1.00											0.10	0.10	0.30	0.30	0.30	0.30
L Wohn	1	0.24	0.50	4.00								0.05											0.10	0.20	0.40	0.40	0.40	0.20
L Bad	1	0.12	0.10	0.30							0.10	1.00											0.10	0.05	0.20	0.50	0.60	0.60
Mikro	4	0.90	0.05	0.10								0.20											0.10	0.05		0.05	0.05	
Wasserkocher	4	1.2	0.05	0.10								0.30																
Computer	2	0.5	0.10	0.30								0.10											0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Computer	2	0.15	1.00	3.00																			0.15	0.02	0.02			
TV	2	0.1	0.20	0.50								0.05											0.10	0.20	0.05			
TV	2	0.15	1.00	4.00																			0.15	0.50	0.50	0.10		
Radio	2	0.1	0.20	0.40								0.30											0.10	0.20	0.05			
Radio	2	0.10	0.50	4.00																			0.20	0.10	0.05			

Arbeiter

Gerät	Kat	Leistung(kW)	Laufzeit (h)		Anlaufwahrscheinlichkeit mit Startzeit nach … Uhr																							
			min	max	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00
L Sch	1	0.12	0.10	0.50	0.10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	1.00											0.05	0.05	0.10	0.10	0.10	0.50	0.50
L Gang	1	0.12	0.10	0.20	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	1.00											0.20	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50
L Küche	1	0.12	0.10	1.00							1.00											0.05	0.10	0.10	0.30	0.30	0.30	0.30
L Wohn	1	0.24	0.50	4.00							0.05											0.05	0.10	0.20	0.40	0.40	0.40	0.20
Mikro	4	0.9	0.05	0.10							0.20											0.10	0.05			0.05	0.05	
Wasserkocher	4	1.20	0.05	0.10							0.30																	
Computer	2	0.5	0.10	0.30							0.10											0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Computer	2	0.15	1.00	3.00																		0.05	0.15	0.02	0.02			
TV	2	0.10	0.20	0.50							0.05											0.05	0.10	0.20	0.05			
TV	2	0.15	1.00	4.00																		0.08	0.15	0.50	0.50	0.10		
Radio	2	0.10	0.20	0.40							0.30											0.05	0.10	0.20	0.05			
Radio	2	0.1	0.50	4.00																		0.50	0.20	0.10	0.05			
L Bad	1	0.10	0.10	0.30	0.10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	1.00											0.10	0.10	0.05	0.20	0.50	0.60	0.60

Hausfrau -Mann

Gerät	Kat	Leistung(kW)	Laufzeit (h)		Anlaufwahrscheinlichkeit mit Startzeit nach … Uhr																							
			min	max	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00
L Sch	1	0.12	0.1	0.5	0.1	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.1	0.3	0.25	0.1	0.05							0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.5	0.5
L Gang	1	0.12	0.1	0.2	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.1	0.3	0.25	0.1	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
L Küche	1	0.12	0.1	1							0.1	0.3	0.25	0.1	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3
L Wohn	1	0.24	0.5	4								0.3	0.25	0.1	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2
L Bad	1	0.12	0.1	0.3	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.1	0.3	0.25	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.2	0.5	0.6	0.6
Mikro	4	0.9	0.05	0.1								0.05	0.1	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	
Wasserkocher	4	1.2	0.05	0.1								0.1	0.2	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05			
Computer	2	0.5	0.1	0.3										0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Computer	2	0.15	1	3												0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02			
TV	2	0.1	0.2	0.5									0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.1	0.2	0.05			
TV	2	0.15	1	4									0.05	0.1	0.15	0.15	0.05	0.05	0.25	0.15	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.1		
Radio	2	0.1	0.2	0.4								0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.05			
Radio	2	0.1	0.5	4									0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.05			
Fön	3	1	0.05	0.1									0.1	0.1	0.1								0.1	0.1	0.1			

Abbildung 7.4.: Wahrscheinlichkeiten für das Einschalten eines Geräts in Abhängigkeit der Person.

Hausarbeit am Abend																												
Gerät	Kat	Leistung(kW)	Laufzeit (h)		Anlaufwahrscheinlichkeit mit Startzeit nach ... Uhr																							
			min	max	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00
KochPlatte1	4	1.20	0.20	0.50									0.10									0.20	0.10	0.40	0.10	0.05	0.01	
KochPlatte2+3	4	3.4	0.20	0.50									0.05									0.10	0.40	0.20	0.05			
Mikro	4	0.9	0.05	0.10								0.05	0.00										0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00
Ofen	4	0.80	0.20	0.80								0.00	0.00										0.00	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00
Spüle	4	1.10	1.00	1.00								0.05	0.05										0.00	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00
Staubsauger	0	1.40	0.10	0.30																		0.02	0.02	0.02	0.01	0.01		
Trockner	3	3.00	1.00	1.00								0.12	0.02										0.00	0.08	0.08	0.02	0.00	0.00
Waschmaschine	3	1.00	1.00	1.00								0.18	0.03										0.00	0.10	0.10	0.03		
Wasserkocher	4	1.20	0.05	0.10								0.10	0.00										0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ofen	4	0.80	1.00	3.00																			0.05					

Hausarbeit Tagsüber																												
Gerät	Kat	Leistung(kW)	Laufzeit (h)		Anlaufwahrscheinlichkeit mit Startzeit nach ... Uhr																							
			min	max	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00
KochPlatte1	4	1.2	0.2	0.5									0.1			0.1	0.1	0.15	0.05		0.05	0.05	0.1	0.05				
KochPlatte2+3	4	3.4	0.2	0.5													0.4	0.05				0.4	0.05					
Waschmaschine	3	1	1	1										0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07				
Trockner	3	3	1	1										0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03				
Spüle	4	1.1	1	1									0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02			
Wasserkocher	4	1.2	0.05	0.1								0.05	0.05	0.05			0.05	0.1	0.05				0.05	0.05	0.05	0.05		
Mikro	4	0.9	0.05	0.1												0.05	0.2	0.05			0.05	0.2	0.05					
Ofen	4	0.8	0.2	0.8									0.05		0.05	0.05			0.02	0.05	0.02	0.02						
Ofen	4	0.8	1	3											0.05	0.05			0.02	0.05	0.02	0.02						
Staubsauger	0	1.4	0.1	0.3										0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05							

Abbildung 7.5.: Wahrscheinlichkeiten für das Einschalten eines Geräts im Fall, dass die Hausarbeit am Abend, bzw. unter Tags erledigt wird.

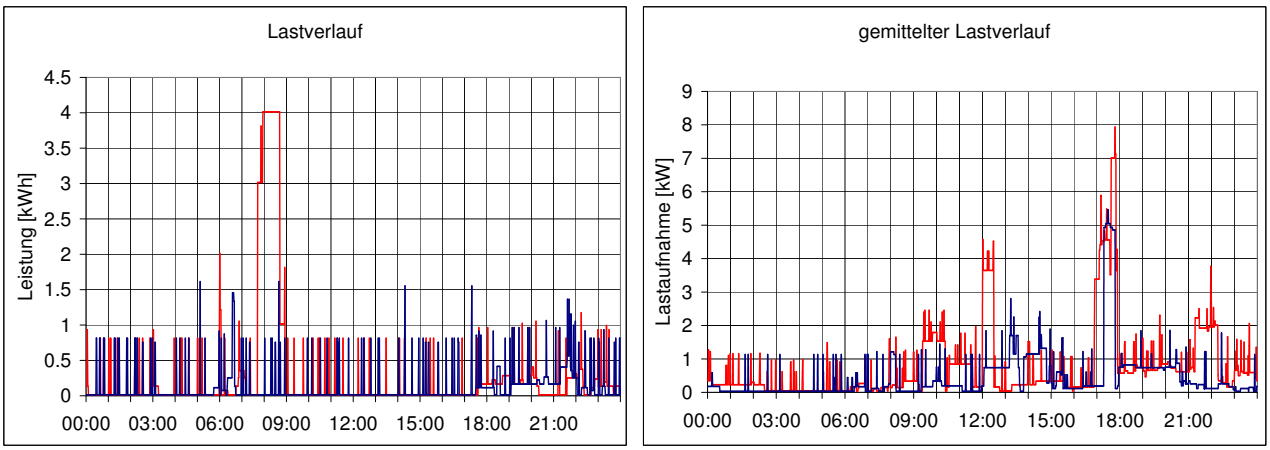


Abbildung 7.6.: *links:* mögliche Lastgänge für zwei Singlewohnungen (je Single-I); *rechts:* mögliche Lastgänge für zwei Haushalte mit je 4 Personen (je Paar-I++)

Plausibilität der Lastgänge

Zur Verifizierung der erhaltenen Lastkurven wurden durchschnittliche Lastgänge aus je 100 Durchläufen des gleichen Haushalts erstellt (siehe Abbildung 7.7).

Für diese gemittelten Lastgänge wurde die resultierende Tagesenergienachfrage jedes Haushaltstyps errechnet. Um diese Werte besser mit statistischen Energieverbrauchen von Haushalten vergleichen zu

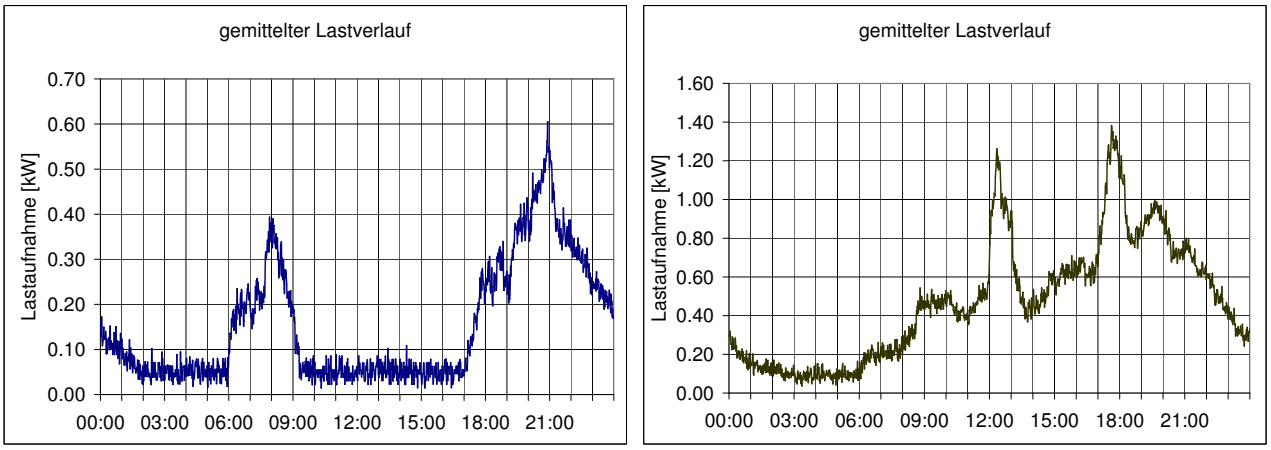


Abbildung 7.7.: Durchschnittlicher Lastgang von je 100 Haushalten; links: Single-I; rechts: Paar-I++.

können, wurden diese auf Jahresenergieverbrauche hoch skaliert [5]. Diese Nachfrage nach elektrischer Energie ist in Tabelle 7.3 für die Haushalte aufgetragen.

Haushaltstyp	Anzahl Personen	Strombedarf ($\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$)
Single-I	1	1337
Single-II	1	1891
Rentner	2	3075
Paar-I	2	2963
Paar-II	2	2673
Paar-II+	3	3694
Paar-I++	4	4151

Tabelle 7.3.: Durchschnittlicher Energiebedarf aus je 100 generierten Haushalten.

Um den durchschnittlichen Energiebedarf der Haushalte in Abhängigkeit der Anzahl der Personen zu ermitteln wurde jeweils der Mittelwert der Verbrauche berechnet.

	Anteil Haushalte	kWh je Haushalt Statistik	kWh je Haushalt Modell	Abweichung in %
1 Person	32,3	1768	1614	-9
2 Personen	33,2	3090	2904	-6
3 Personen	16,8	3923	3694	-6
4 Personen	14,0	4431	4151	-6
5 und mehr	3,7	5328	-	-
Gesamt	96,3	2876	2687	-7

Tabelle 7.4.: Zu sehen sind der Anteil der jeweiligen Haushalte, der Jahresstromverbrauch nach Statistik und nach Monte Carlo Methode und die Abweichung beider Energien von einander. Da keine 5 Personenhaushalte modelliert wurden, wurden diese bei der Ermittlung des durchschnittlichen Energiebedarfs nicht berücksichtigt.

Die durchschnittliche Energienachfrage der simulierten Haushalte liegt jeweils geringfügig unter den

[5] $E_{\text{Tag}} * 365 \frac{\text{Tage}}{\text{Jahr}}$

statistischen Nachfragewerten. Geht man davon aus, dass am Wochenende der Haushaltssektor einen, gegenüber Werktagen erhöhten Strombedarf aufweist, kann diese Abweichung erklärt werden.

Neben der Energieaufnahme wurde ebenfalls untersucht, in wie weit der zeitliche Verlauf der Leistungsaufnahme mit realen Daten übereinstimmt. Dazu wurden jeweils die gemittelten Lastgänge der 100 simulierten Haushalte der sieben Haushaltstypen, nach ihrer Wahrscheinlichkeit [6] gewichtet, gemittelt (siehe Abbildung 7.8).

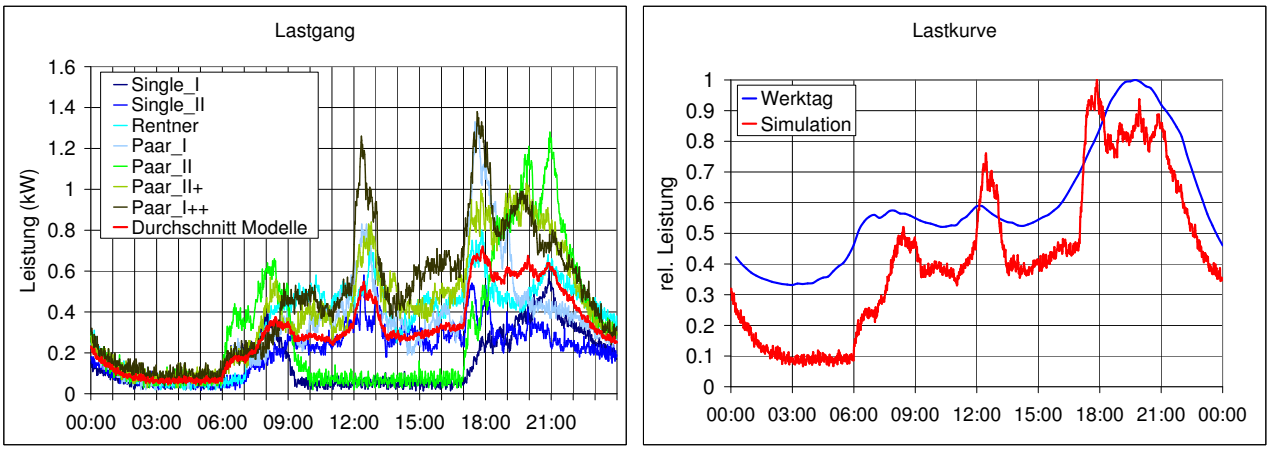


Abbildung 7.8.: *links:* Lastgänge der verschiedenen Haushaltstypen und der Mittelwert unter Berücksichtigung der Häufigkeit der jeweiligen Haushaltstypen; *rechts:* Vergleich der Modelldaten mit Lastkurven für Haushalte (siehe Abbildung 3.1).

Diese gemittelte Lastkurve wurde mit der gemittelten Lastkurve für Werktage von Haushalten aus den Daten der DREWAG verglichen (vergleiche Abbildung 3.1 *links*). Dazu wurden beide Lastgänge nach ihrem Maximum skaliert. Als Ergebnis zeigt sich, dass der zeitliche Verlauf der Stromnachfrage relativ gut reproduziert werden konnte. Die Spitzennachfragen morgens, mittags und abends werden durch die Simulation generiert. Jedoch sind diese Spitzen im Vergleich zu den Messdaten etwas zu stark ausgeprägt. Demgegenüber ist die nächtliche Stromnachfrage in den simulierten Daten als zu gering anzusehen.

Auslastung der Lastgänge

Aus den Abbildungen 7.6 und 7.7 wird deutlich, dass die Anzahl der betrachteten Haushalte eine entscheidende Auswirkung auf das Verhältnis zwischen nachgefragter Spitzenlast und nachgefragter Energie hat. Zur genaueren Bewertung dieses Umstandes wurde exemplarisch auf die Daten von 100 Tageslastgängen der Haushalte Single-I und Paar-I++ zurückgegriffen. Für jeden der Lastgänge der beiden Haushalte wurde sowohl der Energiebedarf, die Spitzenkapazität und das daraus resultierende Verhältnis zwischen Jahresenergiebedarf und Kapazität [7] errechtnet. Aus diesen Auslastungen wurde sowohl der Mittelwert als auch dessen Standartabweichung [8] bestimmt. Die Daten sind in Tabelle 7.5 zusammengefasst.

[6] siehe Tabelle 7.4

[7] entspricht Auslastung in Volllaststunden wobei 8760 h/a gleich einer Auslastung von 100 % ist.

[8] $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{100}(x_i-\overline{x_i})^2}{n}}$

Haushalt	mittlere Auslastung [h/a]	Auslastung max. [h/a]	Auslastung min. [h/a]	Standartabw. Auslastung [h/a]	relative Standartabw. [%]
Single I	654	970	315	149	23
Paar I++	989	1708	520	267	27

Tabelle 7.5.: Zu sehen ist die mittlere Auslastung von 100 Haushalten pro Haushaltstyp, sowie deren maximale und minimale Auslastung. Weiter sind die Standardabweichung und die relative Standardabweichung angegeben.

Es ergeben sich für beide Haushaltstypen relativ geringe Auslastungen im Größenordnungsbereich von 10 %, die darüber hinaus eine weite Streuung aufweisen. Die höhere Auslastung des Haushalts Paar-I++ ist darauf zurückzuführen, dass hier die Wahrscheinlichkeit für das Vorhanden sein einer Person im Haushalt und somit die Nutzung eines elektrischen Verbrauchers über den ganzen Tag höher ist als beim Haushalt Single-I [9].

Im Folgenden wurde die nachgefragte Energie und Spitzenleistung für n Haushalte und aus diesen die Auslastung bestimmt. Dabei ist zu sehen, dass die Auslastung mit steigender Anzahl n an Haushalten anfänglich steigt und ab einer bestimmten Anzahl n in eine Sättigung übergeht (siehe Abbildung 7.9).

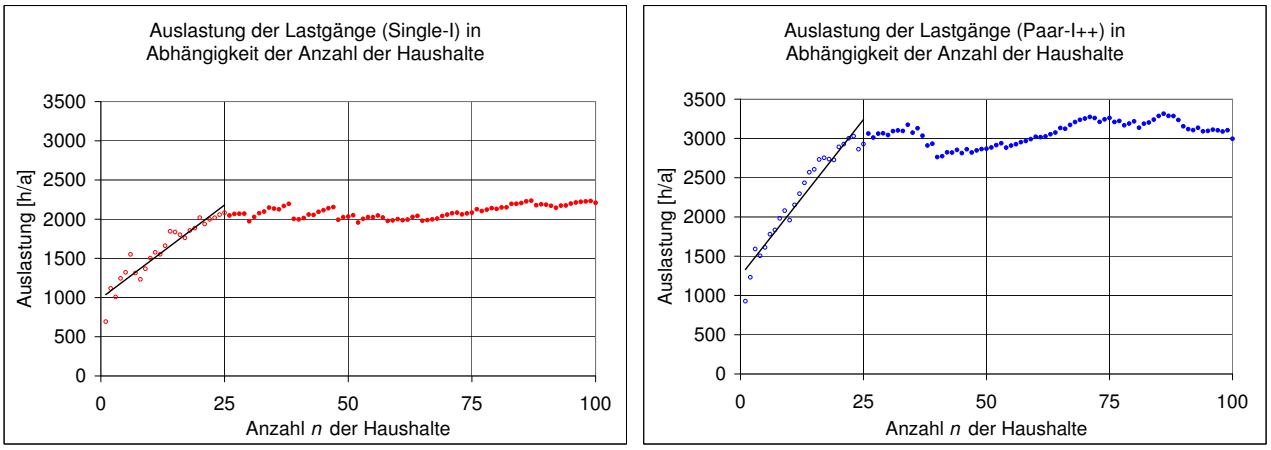


Abbildung 7.9.: Durchschnittliche Auslastung von je n Haushalten; *links:* Single-I (vgl. 654 h/a bei Einzelnem Haushalt); *rechts:* Paar-I++ (vgl. 989 h/a bei Einzelnem Haushalt).

Für die, in Abbildung 7.9 zugrunde gelegten Daten, wurde für die ersten 25 Haushalte ein linearer Trend bestimmt. Dabei ergab sich für den Single-Haushalt eine Steigerung der Auslastung von 48 Volllaststunden pro weiterem Haushalt [10]. Bei dem Vierpersonen-Haushalt beträgt die Steigerung der Auslastung 80 h/a pro n [11].

Daneben wurde die mittlere Auslastung und die Standardabweichung für $26 \leq n \leq 100$ Haushalte berechnet (siehe Tabelle 7.6).

[9] Arbeiter; Tagsüber nicht im Haushalt.
[10] Single-Haushalt: $A = 48\frac{\text{h}}{\text{a}} * n + 990\frac{\text{h}}{\text{a}}$ mit A:= Auslastung.
[11] Vierpersonen-Haushalt: $A = 80\frac{\text{h}}{\text{a}} * n + 1250\frac{\text{h}}{\text{a}}$.

Haushalt	mittlere Auslastung [h/a]	Standardabw. Auslastung [h/a]	relative Standardabw. [%]
Single I	2093	79	4
Paar I++	3068	145	5

Tabelle 7.6.: Zu sehen ist die mittlere Auslastung von $26 \leq n \leq 100$ Haushalten, sowie die Standardabweichung und die relative Standardabweichung.

Im Vergleich zu den Einzelhaushalten ist hier eine deutliche Steigerung (ca. Faktor 3) der Auslastung gegeben. Ebenso ist die Abweichung von den ermittelten durchschnittlichen Auslastungen erheblich niedriger.

7.1.2. Monte Carlo Simulation der Warmwassernachfrage

Die Warmwassernachfrage wurde sehr ähnlich der Stromnachfrage mittels einer Monte Carlo Simulation generiert. Dazu wurden personenbezogene, statistische Daten der Warmwassernachfrage [12] zu Grunde gelegt. Der mittlere Energieverbrauch für die Bereitstellung von warmem Wasser liegt bei 1,89 kWh pro Person und Tag. Im Durchschnitt werden für ein Wannenbad ca. 4,5 kWh, für das Duschen ca. 1,6 kWh und für eine sonstige Zapfung ca. 0,16 kWh benötigt. Aus diesen Daten konnte wiederum mittels Simulation eine minutenaufgelöst Nachfrage nach Wärmeenergie in Form von warmem Wasser erzeugt werden.

Die erzeugten Nachfragekurven für einzelne Tage unterscheiden sich stark von einander (siehe Abbildung 7.10 links). Es wurden Warmwassernachfrage für 2000 Personen generiert. Der mittlere Wärmebedarf liegt für diese bei 1,89 kWh pro Tag [13], der maximale bei 14,6 kWh pro Tag und der minimale bei 0 kWh pro Tag.

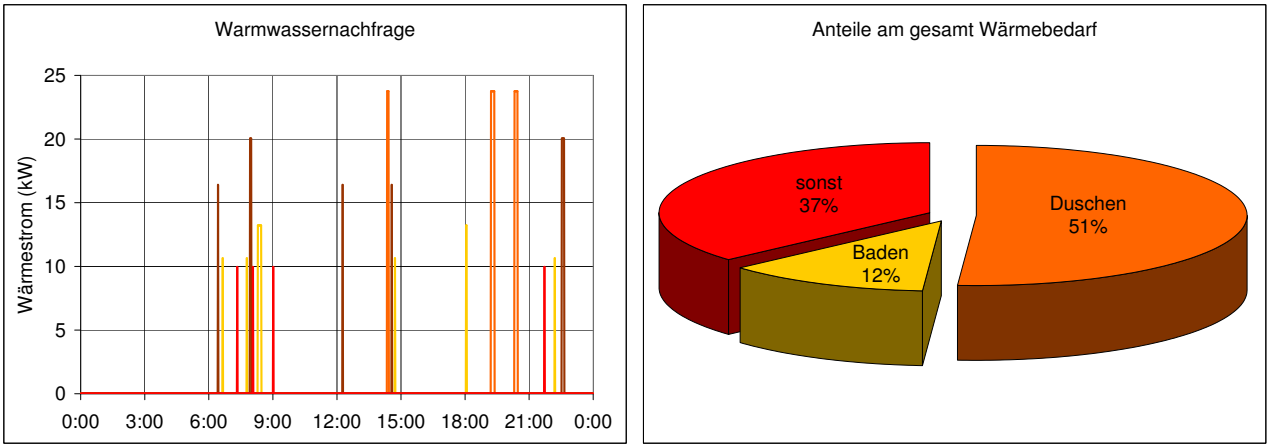


Abbildung 7.10.: *links:* vier unterschiedliche mögliche Warmwassernachfragen; *rechts:* Aufteilung der Warmwassernachfrage in Baden, Duschen und sonstige Verbrauche.

[12] *Quelle:* P. Loose (1991)
[13] vergl: 1,89 kWh pro Person und Tag nach Statistik P. Loose (1991)

7.1.3. Heizwärmebedarf

Um die Heizwärme von Modellgebäuden bestimmen zu können, musste sowohl der Raumwärmebedarf als auch die solaren- und internen Gewinne modelliert werden. Dazu wurden drei Modelle von thermischen Hüllen erstellt, um später Gebäude mit unterschiedlichen Dämmstandards erzeugen zu können. Modelle mit dem Dämmstandard (i) sind dabei mit gutem Transmissions- und Lüftungsverlustverhalten ausgestattet [14]. Modelle des Standards (ii) entsprechen in etwa dem Baustandard von vor 10 Jahren [15] und Modelle des Standards (iii) in etwa dem Baustandard von vor 20 Jahren [16].

Für die drei Standards liegen unterschiedliche thermischen Eigenschaften der Wände, des Dachs und der Bodenplatte vor. Diese sind in den Abbildungen 7.11, 7.12 und 7.13 zu sehen [17].

Die thermischen Eigenschaften der Fenster differieren ebenfalls zwischen den Standards (siehe Tabelle 7.7).

Standard	U-Wert Fenster ([$\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}$])
(i)	1,3
(ii)	1,8
(iii)	2,6

Tabelle 7.7.: U-Werte der Fenster einschließlich Rahmen. *Quelle:* K. Schneider (2002).

Aus den U-Werten der Einzelflächen und der Geometrie eines Modellgebäudes kann die spezifische **Transmissionswärmeverlustleistung** P_T, welche angibt, welche Leistung das Modellgebäude pro °C Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenraum abstrahlt, ermittelt werden.

$$P_\mathrm{T} = \sum_i U_i \; A_i \tag{7.2}$$

mit $i \in \{$ Wand, Dach, Bodenplatte, Fenster $\}$.

	(i)	(ii)	(iii)
Wand	0,235	0,872	1,435
Bodenplatte	0,395	0,562	1,727
Dach	0,179	0,231	0,509
Fenster	1,3	1,8	2,6

Tabelle 7.8.: U-Werte in $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}$ der verschiedenen Standards.

Für die **Lüftungswärmeverluste** der verschiedenen Gebäude wurden folgende Luftwechselraten angenommen.

[14] Energiebedarf im Größenordnungsbereich von 50 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2a}}$
[15] Energiebedarf im Größenordnungsbereich von 100 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2a}}$
[16] Energiebedarf im Größenordnungsbereich von 200 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2a}}$
[17] berechnet mit PHPP 2004. Feist (2004).

1	Wände

Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W] innen R_{si} : 0.13
außen R_{sa} : 0.04

	Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]
1.	Aussenputz	0.360					20
2.	Ziegel	0.090					360
3.	Innenputz	0.700					15
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							

Flächenanteil Teilfläche 2 | Flächenanteil Teilfläche 3 | Summe 39.5 cm

U-Wert: 0.235 W/(m²K)

2	Bodenplatte

Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W] innen R_{si} : 0.17
außen R_{sa} :

	Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]
1.	Polystyrol-Extr	0.040					30
2.	Polyurethan(PUR)	0.035					52
3.	PVC	0.230					1
4.	Normalbeton	2.100					250
5.							
6.							
7.							
8.							

Flächenanteil Teilfläche 2 | Flächenanteil Teilfläche 3 | Summe 33.3 cm

U-Wert: 0.395 W/(m²K)

3	Dach

Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W] innen R_{si} : 0.10
außen R_{sa} : 0.04

	Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]
1.	Gipskarton	0.250					12.5
2.	Faserdämmstoffe	0.040			Fichte	0.130	50
3.	PVC	0.230					1
4.	Faserdämmstoffe	0.040	Fichte	0.130			200
5.	Fichte	0.130					20
6.							
7.							
8.							

Flächenanteil Teilfläche 2: 12.0% | Flächenanteil Teilfläche 3: 5.0% | Summe 28.4 cm

U-Wert: 0.179 W/(m²K)

Abbildung 7.11.: Eigenschaften der thermischen Hülle von Gebäuden des Dämmstandards (i).

Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung
1	Wände

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W]: innen R_{si}: 0.13; außen R_{sa}: 0.04

	Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]
1.	Aussenputz	0.360					20
2.	Ziegel	0.400					360
3.	Innenputz	0.700					15
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							

Flächenanteil Teilfläche 2: | Flächenanteil Teilfläche 3: | Summe: 39.5 cm

U-Wert: 0.872 W/(m²K)

Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung
2	Bodenplatte

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W]: innen R_{si}: 0.17; außen R_{sa}:

	Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]
1.	Polyurethan(PUR)	0.035					52
2.	PVC	0.230					1
3.	Normalbeton	2.100					250
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							

Flächenanteil Teilfläche 2: | Flächenanteil Teilfläche 3: | Summe: 30.3 cm

U-Wert: 0.562 W/(m²K)

Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung
3	Dach

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W]: innen R_{si}: 0.10; außen R_{sa}: 0.04

	Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]
1.	Gipskarton	0.250					12.5
2.	PVC	0.230					1
3.	Faserdämmstoffe	0.040	Fichte	0.130			200
4.	Fichte	0.130					20
5.							
6.							
7.							
8.							

Flächenanteil Teilfläche 2: 12.0% | Flächenanteil Teilfläche 3: 5.0% | Summe: 23.4 cm

U-Wert: 0.231 W/(m²K)

Abbildung 7.12.: Eigenschaften der thermischen Hülle von Gebäuden des Dämmstandards (ii)

Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung
1	Wände

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W]: innen R_{si}: 0.13; außen R_{sa}: 0.04

	Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]
1.	Aussenputz	0.360					20
2.	Ziegel	0.800					360
3.	Innenputz	0.700					15
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							

Flächenanteil Teilfläche 2: | Flächenanteil Teilfläche 3: | Summe: 39.5 cm

U-Wert: 1.435 W/(m²K)

Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung
2	Bodenplatte

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W]: innen R_{si}: 0.17; außen R_{sa}:

	Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]
1.	Polyurethan(PUR)	0.035					10
2.	PVC	0.230					1
3.	Normalbeton	2.100					250
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							

Flächenanteil Teilfläche 2: | Flächenanteil Teilfläche 3: | Summe: 26.1 cm

U-Wert: 1.727 W/(m²K)

Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung
3	Dach

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W]: innen R_{si}: 0.10; außen R_{sa}: 0.04

	Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]
1.	Gipskarton	0.250					12.5
2.	PVC	0.230					1
3.	Faserdämmstoffe	0.040	Fichte	0.130			75
4.			Fichte	0.130			75
5.	Fichte	0.130					20
6.							
7.							
8.							

Flächenanteil Teilfläche 2: 12.0% | Flächenanteil Teilfläche 3: 5.0% | Summe: 18.4 cm

U-Wert: 0.509 W/(m²K)

Abbildung 7.13.: Eigenschaften der thermischen Hülle von Gebäuden des Dämmstandards (iii)

Standard	Luftwechselrate (h^{-1})
(i)	0,30
(ii)	0,35
(iii)	0,40

Tabelle 7.9.: Luftwechselraten der unterschiedlichen Gebäudestandards

Die spezifische Lüftungsverlustleistung [18] P_L pro °C ergibt sich aus dem Luftvolumen im Gebäude V_L, der spezifischen Wärme von Luft $c_{\text{spez. Luft}}$ von $0,33\frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}}$ und der Luftwechselrate n_L (siehe Tabelle 7.9).

$$P_L = n_L V_L c_{\text{spez. Luft}} \tag{7.3}$$

Zur Berechnung der **solaren Gewinne** durch die Fenster standen nicht richtungsaufgelöste Globalstrahlungsdaten zur Verfügung. Um diese statistisch auf die vier Himmelsrichtungen zu verteilen wurden die Globalstrahlungsdaten mit richtungsaufgelösten Standartwerten nach DIN 4108-6 nach der jeweiligen Richtung gewichtet.

Für alle Gebäudemodelle aus Kapitel 7.2 wird ein Fensteranteil an der gesamten Wandfläche von 12,5 % angenommen, wobei der Anteil der Fenster an Südfassaden doppelt so hoch ist, als in den anderen drei Richtungen. Horizontale Fenster werden nicht in den Modellen berücksichtigt.

Richtung	Jahres-globalstrahlung ($\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$)	Anteil an Jahres-globalstrahlung (%)	Anteil Fensterfläche (%)
Ost	155	17	20
Süd	270	30	40
West	155	17	20
Nord	100	11	20

Tabelle 7.10.: Richtungsaufgelöste DIN-Werte für die gesamte Jahresglobalstrahlung, deren Anteil an der Gesamtstrahlung (*Quelle:* K. Schneider (2002)) und der richtungsaufgelöste, angenommene Anteil der Fensterflächen an der Gesamtfensterfläche für die Gebäudemodelle.

Berücksichtigt man weiter einen g-Wert der Fenster [19] von 0,5 können die von einem Gebäude aufgenommenen solaren Gewinne in Abhängigkeit der (eindimensionalen) Globalstrahlungsdaten G'_S bestimmt werden.

Die spezifischen solaren Gewinne P_S je $\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ Globalstrahlung G'_S sind dementsprechend:

$$P_S = \frac{0,105\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} A_{\text{Fenster}}}{\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} \tag{7.4}$$

Der Anteil der Globalstrahlung je Richtung wird, zur Modellierung, als über die Zeit unveränderlich angesehen. Die Abhängigkeit von der Tages- und Jahreszeit wird in dieser Modellbetrachtung

[18] siehe Kapitel 3.2.1

[19] Die Verluste durch die Verringerung der Fensterfläche durch den Fensterrahmen sind im g-Wert enthalten.

Richtung	Wärme ($\frac{W}{m^2}/\frac{kW}{m^2}$)
Ost	17
Süd	60
West	17
Nord	11
Summe	105

Tabelle 7.11.: Die solaren Gewinne pro Quadratmeter Fensterfläche betragen 0,105 kW je kW eingestrahltes $\frac{kW}{m^2}$ Globalstrahlung.

vernachlässigt. Es gilt:

$$G_S = \int_{t0}^{t} G'_S(t')\mathrm{d}t' \tag{7.5}$$

Die spezifischen **internen Gewinne** P_I betragen 2,1 Wh pro Tag und pro Quadratmeter Wohnfläche A_N [20]:

$$P_I = 2,1\frac{\mathrm{Wh}}{\mathrm{m}^2}\mathrm{A_N} \tag{7.6}$$

Somit können die Wärmeverluste und -gewinne eines Modellgebäudes in Abhängigkeit der Heizgradstunden G_t und der Globalstrahlung G_S bestimmt werden.

$$Q_{\mathrm{Verlust}} = (P_T + P_L)G_t \tag{7.7}$$

$$Q_{\mathrm{Gewinn}} = P_S\ G_S + P_I \tag{7.8}$$

Aus den Verlusten und Gewinnen berechnet sich der **Heizwärmebedarf** wie folgt:

$$Q_{\mathrm{Heiz}} = (P_T + P_L)G_t - (P_S G_S + P_I) \text{ falls } (P_T + P_L)G_t > (P_S G_S + P_I) \tag{7.9}$$

bzw.

$$Q_{\mathrm{Heiz}} = 0 \text{ falls } (P_T + P_L)G_t < (P_S G_S + P_I). \tag{7.10}$$

Zur Berechnung des Raumwärmebedarfs der Modelle muss ein **Modellklima** geschaffen werden. Für die Berechnungen von G_t wurde die Sollinnentemperatur durchwegs als 20°C angenommen. Die Daten für die Außentemperaturen stammen von einer Messstation bei Augsburg [21] und liegen als Stundenwerte vor. Da eine stundengenaue Berechnung des Raumwärmebedarfs eines ganzen Jahres übermäßige Rechenkapazitäten benötigt, wurden 5 Typtagen bzw. Repräsentanten für den Temperaturverlauf ausgewählt. Zur Bestimmung der Repräsentanten wurden für jeden Tag zwischen dem 1.1.2002 und dem 31.12.2004 die Tagesdurchschnittstemperatur bestimmt und die Tage in 4 Temperaturgruppen eingeteilt. Diese sind die Gruppen Kaltwintertag (II) (Tagesdurchschnittstemp. unter -4 °C) (Abb. 7.14), Wintertag (III) (-4°C bis 4.6°C Durchschnittstemp.), Übergangstag (IV) (4.6 °C bis 12 °C) und die Gruppe Sommertag (V) (über 12 °C; kein Raumwärmebedarf). Für jede dieser Gruppen wurde dann

[20] *Quelle:* Feist (2004)
[21] Daten aus Wetterstation Gersthofen; Messpunkt liegt 2 m über dem Boden

ein mittlerer Temperatur- und Globalstrahlungstagesverlauf ermittelt [22]. Der 5. Repräsentant (I) ist der kälteste Tag seit 2002 (1.3.2005) [23]. Dieser wurde ausgewählt, um eine ausreichende Versorgung der Gebäude mit Wärme auch an Extremtagen zu gewährleisten. Allen Typtagen wurde nach der Anzahl der Mitglieder in ihrer Gruppe eine Gewichtung zugeordnet. Dadurch kann ein möglichst getreues Abbild des Jahrestemperaturverlaufs mit nur 5 verschiedenen Tagen generiert werden.

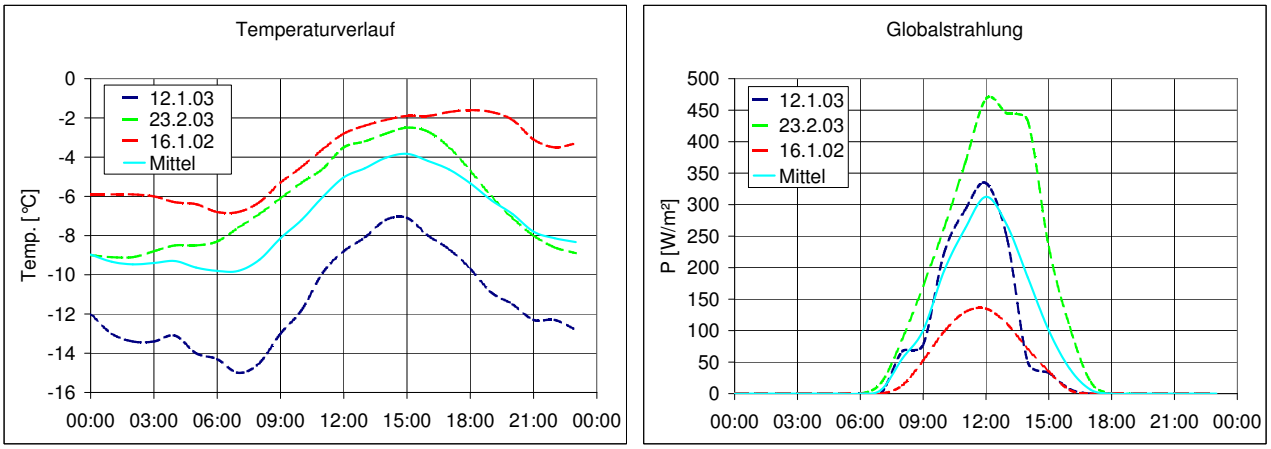


Abbildung 7.14.: *links:* Tagestemperaturverlauf für den Repräsentanten (II) (Kaltwintertag); berechnet aus dem Mittelwert aus je dem Mitglied der Gruppe (II) mit der niedrigsten, höchsten und mittleren Tagesdurchschnittstemperatur. *rechts:* Tagesverlauf der Globalstrahlung dieser Tage; gleiche Berechnungsweise.

Für die Repräsentanten wurden folgende Gewichte ermittelt (Tabelle 7.12):

Repräsentanten	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)
Durchschnittstemp. [°C]	-13,0	-6,4	1,1	8,2	18,8
Häufigkeit in 3 Jahren	1	56	305	289	426
relative Häufigkeit [%]	0,1	5,2	28,3	26,9	39,5
Häufigkeit pro Jahr	0,33	19	103	98	144

Tabelle 7.12.: Durchschnittstemperaturen, relative Häufigkeiten und Gewichte der 5 Repräsentanten

Berechnet man die Heizgradstunden des durch die Repräsentanten beschriebenen Jahres so erhält man den Wert $G_\mathrm{T} = 86,8$ kKh [24]

Für jeden der Repräsentanten kann nun ein zeitlicher Verlauf des Temperaturgefälles zwischen Innen- und Außenraum berechnet werden. Somit ist das Integral

$$G_\mathrm{T} = \int_{t_0}^{t} \Delta T(t')\mathrm{d}t' \tag{7.11}$$

für jeden Repräsentanten bestimmt.

[22] siehe Anhang Abbildungen A.2 bis A.5
[23] siehe Anhang Abbildung A.6
[24] Durchschnittlicher Heizgradstunden der letzten 4 Winter $G_\mathrm{T} = 85,6$ kKh (Abb.3.12)

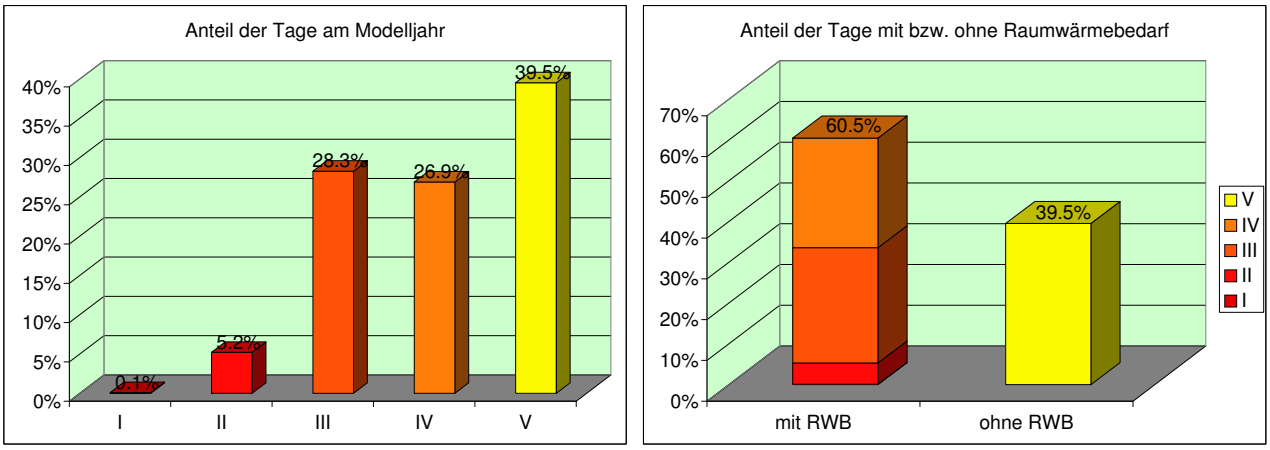


Abbildung 7.15.: *links:* relative Häufigkeit für das Vorkommen eines der fünf Typtage bzw. Repräsentanten; *rechts:* Aufteilung in Repräsentanten mit Raumwärmebedarf (I - IV) und in Repräsentanten ohne Raumwärmebedarf (V).

Für Tage an denen die durchschnittliche Tagestemperatur über 12°C liegt wird für den gesamten Tag das Integral $\int_{t_0}^{t} \Delta T \mathrm{d}t'$ als Null angenommen, da an diesen Tagen keine Beheizung der Gebäude von Nöten ist. Dies trifft für alle Tage der Gruppe (V), also auch für dessen Repräsentanten zu.

7.2. Modellierung von Gebäuden

Sämtliche Gebäudemodelle wurden nach dem gleichen Schema aufgebaut. Die Gebäude sind mit einem Satteldach mit 45 ° Dachneigung modelliert. Weiter wird keine Unterkellerung der Modelle berücksichtigt. Die Grundfläche ist rechteckig angenommen. Der Anteil der Fensterfläche an der gesamten Wandfläche [25] beträgt 12,5 %, der Anteil der Fensterfläche in Südrichtung ist doppelt so hoch wie der, in die anderen Himmelsrichtungen. Die thermische Hülle setzt sich somit aus den Wand- , Dach- und Fensterflächen und der Bodenplatte zusammen. Die Dicke der Bodenplatte beträgt bei allen Modellen 30 cm, die Raumhöhe 2,5 m und die Deckenstärke 20 cm. Sämtliche Modellgebäude sind so konstruiert, dass das oberste bewohnte Stockwerk einen Kniestock von 1,0 m aufweist. Der Anteil des Volumens der Wände am Gesamtvolumen innerhalb der thermischen Hülle wurde abgeschätzt und liegt zwischen 20 % für das Modell des Einfamilienhauses und 15 % für das größte Modellgebäude.

Aufgrund dieser Annahmen sind die Modellgebäude anhand der vier Größen Länge l, Breite b, Anzahl der bewohnten Stockwerke St und Wandanteil A_W eindeutig bestimmt [26].

Somit kann mit den Daten aus Tabelle 7.13 auf die Anzahl der Wohnungen und die Anzahl der Bewohner im Gebäude geschlossen werden.

Mit Hilfe der Annahmen aus Kapitel 7.1.3 kann aus den geometrischen Daten der Modelle, den Heizgradstunden G_t und der Globalstrahlung G_S ein Wärme- und Strombedarf der Modellgebäude er-

[25] Im Folgenden bezeichnet Wand das Mauerwerk der Wandfläche und Wand $_{\mathrm{ges}}$ die Wandfläche einschließlich Fensterfläche.

[26] siehe Anhang Kapitel A.2

Gebäudetyp	m^2 je Haushalt	Pers. je Wohnung	m^2 pro Person
Einfamilien	128,8	2,71	56,2
Zweifamilien	106,3	2,44	51,1
Drei- bis Vierfam.	83,2	2,02	49,5
Fünf- bis Zehnfam.	69,8	1,81	45,7
Elf- und mehr Fam.	63,7	1,68	44,0
Gesamt	97,2	2,24	50,5

Tabelle 7.13.: Statistische Werte für die Größe von Haushalten in Abhängigkeit der Gebäudegröße.

mittelt werden. Dabei werden für jeden Gebäudetyp die drei Wärmestandards ((i), (ii), und (iii)) berücksichtigt.

7.2.1. Einfamilienhaus

EFH	Einheit	Wert
Länge	m	10
Breite	m	9
Wandanteil		0,2
Stockwerke		2
Höhe	m	8,5
Energiebezugsfläche A_{N}	m^2	144
Grundfläche A_{Boden}	m^2	90
Wandfläche A_{Wand}	m^2	168
Fensterfläche A_{Fenster}	m^2	24
Dachfläche A_{Dach}	m^2	127
Luftvolumen V_{L}	m^3	360
solare Gewinne	$\frac{kW}{m^2}/\frac{kW}{m^2}$	2,5
Wohnungen im Haus		1
Personen im Haus		4

Tabelle 7.14.: Eigenschaften des Gebäudetyps Einfamilienhaus. Nach Tabelle 7.13 ergibt sich die Anzahl der Personen im Haus zu 3. Diese wurde allerdings als 4 angenommen, da in den späteren Modellierungen Einfamilienhäuser als Gebäude mit hohem spezifischen Stromverbrauch gelten sollen.

EFH	(i)	(ii)	(iii)
Boden	0,036	0,051	0,155
Wand	0,040	0,147	0,242
Fenster	0,031	0,043	0,063
Dach	0,023	0,029	0,065
Transmission	0,129	0,270	0,524
Lüftung	0,036	0,042	0,048
Summe	0,165	0,312	0,572

Tabelle 7.15.: Verlustleistung der einzelnen Komponenten des Gebäudetyps Einfamilienhaus für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii) in $\frac{kW}{K}$.

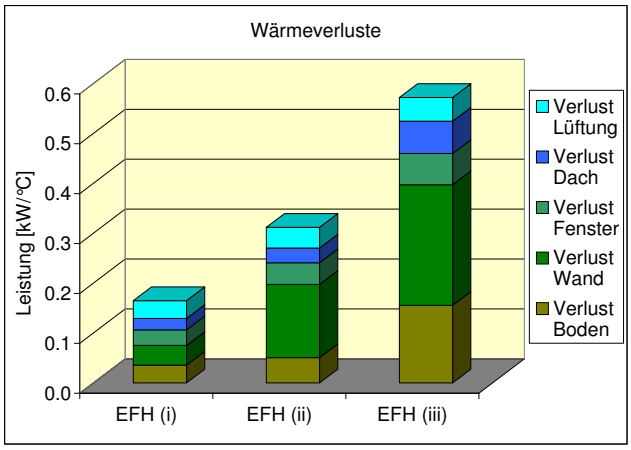


Abbildung 7.16.: Verlustleistung der einzelnen Komponenten des Gebäudetyps Einfamilienhaus für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii).

Haushaltstyp	Anzahl Personen pro Haushalt	Anzahl Haushalte im Haus
Paar-I++	4	1

Tabelle 7.16.: Anzahl der Personen und Haushaltstypen im Gebäude EFH.

7.2.2. Zweifamilienhaus

ZFH	Einheit	Wert
Länge	m	13
Breite	m	11
Wandanteil		0,18
Stockwerke		2
Höhe	m	9,5
Energiebezugsfläche A_{N}	m^2	235
Grundfläche A_{Boden}	m^2	143
Wandfläche A_{Wand}	m^2	221
Fensterfläche A_{Fenster}	m^2	32
Dachfläche A_{Dach}	m^2	202
Luftvolumen V_{L}	m^3	586
solare Gewinne	$\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m}^2}/\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m}^2}$	3,31
Wohnungen im Haus		2
Personen im Haus		5

Tabelle 7.17.: Eigenschaften des Gebäudetyps Zweifamilienhaus.

ZFH	(i)	(ii)	(iii)
Summe	0,244	0,444	0,826

Tabelle 7.18.: Verlustleistung des Gebäudetyps Zweifamilienhaus für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii) in $\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{K}}$.

Haushaltstyp	Anzahl Personen pro Haushalt	Anzahl Haushalte im Haus
Rentner	2	1
Paar-II+	3	1
Summe	5	2

Tabelle 7.19.: Anzahl der Personen und Haushaltstypen im Gebäude ZFH.

7.2.3. Mehrfamilienhaus 3

MFH 3	Einheit	Wert
Länge	m	12
Breite	m	9
Wandanteil		0,17
Stockwerke		3
Höhe	m	11,2
Energiebezugsfläche A_{N}	m^2	269
Grundfläche A_{Boden}	m^2	108
Wandfläche A_{Wand}	m^2	282
Fensterfläche A_{Fenster}	m^2	40
Dachfläche A_{Dach}	m^2	153
Luftvolumen V_{L}	m^3	672
solare Gewinne	$\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m}^2}/\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m}^2}$	4,22
Wohnungen im Haus		3
Personen im Haus		7

Tabelle 7.20.: Eigenschaften des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 3.

MFH 3	(i)	(ii)	(iii)
Summe	0,255	0,492	0,862

Tabelle 7.21.: Verlustleistung des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 3 für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii) in $\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{K}}$.

Haushaltstyp	Anzahl Personen pro Haushalt	Anzahl Haushalte im Haus
Single-I	1	1
Paar-II	2	1
Paar-I++	4	1
Summe	7	3

Tabelle 7.22.: Anzahl der Personen und Haushaltstypen im Gebäude MFH 3.

7.2.4. Mehrfamilienhaus 6

MFH 6	Einheit	Wert
Länge	m	15
Breite	m	11
Wandanteil		0,16
Stockwerke		3
Höhe	m	12,2
Energiebezugsfläche A_{N}	m^2	416
Grundfläche A_{Boden}	m^2	165
Wandfläche A_{Wand}	m^2	358
Fensterfläche A_{Fenster}	m^2	51
Dachfläche A_{Dach}	m^2	233
Luftvolumen V_{L}	m^3	1040
solare Gewinne	$\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m}^2}/\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m}^2}$	5,37
Wohnungen im Haus		6
Personen im Haus		11

Tabelle 7.23.: Eigenschaften des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 6.

MFH 6	(i)	(ii)	(iii)
Summe	0,360	0,671	1,187

Tabelle 7.24.: Verlustleistung des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 6 für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii) in $\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{K}}$.

Haushaltstyp	Anzahl Personen pro Haushalt	Anzahl Haushalte im Haus
Single-I	1	1
Single-II	1	1
Rentner	2	1
Paar-I	2	1
Paar-II	2	1
Paar-II+	3	1
Summe	11	6

Tabelle 7.25.: Anzahl der Personen und Haushaltstypen im Gebäude MFH 6.

7.2.5. Mehrfamilienhaus 12

MFH 12	Einheit	Wert
Länge	m	25
Breite	m	12
Wandanteil		0,15
Stockwerke		3
Höhe	m	12,7
Energiebezugsfläche A_{N}	m^2	765
Grundfläche A_{Boden}	m^2	300
Wandfläche A_{Wand}	m^2	497
Fensterfläche A_{Fenster}	m^2	71
Dachfläche A_{Dach}	m^2	424
Luftvolumen V_{L}	m^3	1913
solare Gewinne	$\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m}^2}/\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m}^2}$	7,45
Wohnungen im Haus		12
Personen im Haus		20

Tabelle 7.26.: Eigenschaften des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 12.

MFH 12	(i)	(ii)	(iii)
Summe	0,593	1,048	1,884

Tabelle 7.27.: Verlustleistung des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 12 für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii) in $\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{K}}$.

Haushaltstyp	Anzahl Personen pro Haushalt	Anzahl Haushalte im Haus
Single-I	1	4
Single-II	1	3
Rentner	2	1
Paar-I	2	1
Paar-II	2	1
Paar-II+	3	1
Paar-I++	4	1
Summe	20	12

Tabelle 7.28.: Anzahl der Personen und Haushaltstypen im Gebäude MFH12.

7.2.6. Mehrfamilienhaus 26

MFH 26	Einheit	Wert
Länge	m	40
Breite	m	12
Wandanteil		0,15
Stockwerke		4
Höhe	m	15,4
Energiebezugsfläche A_{N}	m^2	1632
Grundfläche A_{Boden}	m^2	480
Wandfläche A_{Wand}	m^2	918
Fensterfläche A_{Fenster}	m^2	131
Dachfläche A_{Dach}	m^2	679
Luftvolumen V_{L}	m^3	4080
solare Gewinne	$\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m}^2}/\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m}^2}$	13,78
Wohnungen im Haus		26
Personen im Haus		43

Tabelle 7.29.: Eigenschaften des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 26.

MFH 26	(i)	(ii)	(iii)
Summe	1,101	1,935	3,372

Tabelle 7.30.: Verlustleistung Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 26 für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii) in $\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{K}}$.

Haushaltstyp	Anzahl Personen pro Haushalt	Anzahl Haushalte im Haus
Single-I	1	7
Single-II	1	6
Rentner	2	3
Paar-I	2	3
Paar-II	2	4
Paar-II+	3	2
Paar-I++	4	1
Summe	43	26

Tabelle 7.31.: Anzahl der Personen und Haushaltstypen im Gebäude MFH26.

7.2.7. Zusammenfassung

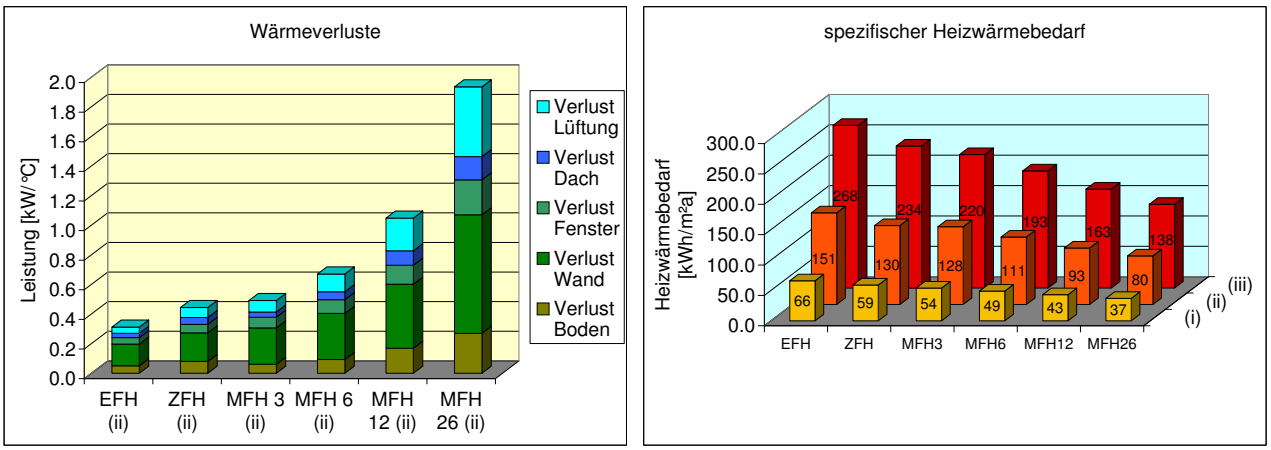


Abbildung 7.17.: *links:* Verlustleistung der einzelnen Komponenten aller Gebäudetypen für den Dämmstandard (ii); *rechts:* spezifischer Jahresheizwärmebedarf aller Gebäudetypen.

Wie in Abbildung 7.17 zu sehen ist, ist sowohl der Heizenergiebedarf, als auch der spezifische Heizwärmebedarf von Gebäuden stark von der Gebäudegröße abhängig. Größere Gebäude weisen einen deutlich niedrigeren spezifischen Heizwärmebedarf auf. Dies resultiert aus einem günstigerem Verhältnis von Innenvolumen zu thermischer Hülle. Trotz gleichem Dämmstandart ist der Heizenergiebedarf pro Quadratmeter und Jahr beim Einfamilienhaus fast doppelt so hoch wie beim Mehrfamilienhaus mit 26 Haushalten.

8. Optimierung ausgesuchter Modelle

Ziel dieses Kapitels ist es, die Verwendung von Blockheizkraftwerken in verschiedenen Modellszenarien bei möglichst wirklichkeitsgetreuer Abbildung der Nachfragen nach Strom, Warmwasser und Raumwärme zu bewerten. Dazu wurden sowohl die Nachfragen als auch die Kombination der Versorgungsprozesse variiert.

Für jeden der drei Dämmstandards der sechs modellierten Gebäude wurde der zeitliche Verlauf des Raumwärmebedarfs der Typtage I bis IV ermittelt. Typtag V entspricht einem Tag ohne Raumwärmebedarf (siehe Kapitel 7.1.3). Jedem dieser fünf Typtage wurde die gleiche Strom- bzw. Warmwassernachfrage zugewiesen. Die Stromnachfrage eines Gebäudes hängt dabei sowohl von der Anzahl der Haushalte (siehe z.B. Tabelle 7.31), als auch von der Art des jeweiligen Haushaltstyps (siehe Tabelle 7.3) ab. Die Warmwassernachfrage der Szenarien ist anhand der Anzahl der Personen (siehe z.B. Tabelle 7.31) in einem Gebäude bestimmt worden. Für die zeitliche Auflösung der Modelle wurden 15 Minuten Schritte gewählt.

Um die Nachfragen zu decken wurden verschiedene Prozesse berücksichtigt.

Zur Erzeugung von Wärme wurden folgende Prozesse vorgesehen. Gasheizung (Gasheiz) [1], Pelletheizung (Pellet), und Solarkollektor (Solarkollekt). Alle diese Prozesse wandeln die jeweilige genutzte Energie mit den Wirkungsgraden und zu den Kosten aus Tabelle 5.12 in die Energieform Wärme (Prozesswärme) [PrW] um. Diese Wärme kann entweder im Warmwasserspeicher (WWasserSp) zwischengespeichert, oder mittels den Prozessen Heizkörper (Heizkoerper) oder Warmwassernetz (WW-Netz) in nachgefragte Raumwärme [RaumW] bzw. Warmwasser [WWasser] umgewandelt werden.

Der Prozess Netzanschluss (Netzan) wandelt Strom aus dem Stromnetz [StromNet] in Prozessstrom [PrStromAC] um. Dieser Prozessstrom ist die Quelle für den Prozess Elektroinstallation (ElInstall) der die Nachfrage nach Strom [Strom] deckt. Dem System ist die Möglichkeit gegeben Prozessstrom in Akkumulatoren (Batterie) zu speichern. Durch eine Photovoltaikanlage (Photovoltaik) und einen Wechselrichter (DC-ACWandler) kann entweder ebenso Prozessstrom bereitgestellt oder Strom an das öffentliche Netz verkauft werden.

Bei allen oben beschriebenen Prozessen besteht keine Verbindung zwischen dem elektrischen und dem thermischer Strang. Eine Kopplung beider Systeme ist zum Einen durch die Wärmepumpe (Waermepump) und zum Anderen durch das BHKW (GasBHKW) gegeben. Eine Wärmepumpe nutzt Prozessstrom um Prozesswärme zu erzeugen. Im Gegensatz dazu wandelt ein Blockheizkraftwerk Gas aus dem Gasnetz [GasNet] in Prozessstrom und Prozesswärme.

[1] Angaben in runden Klammern (...) bezeichnen Prozesse, während in eckigen Klammern [...] Güter wiedergegeben werden.

In den unterschiedlichen Szenarien werden unterschiedliche Kombinationen der möglichen Prozesse erlaubt. Das Energieflussdiagramm, wie in Abbildung 8.1 dargestellt, zeigt die maximal mögliche Ausstattung der Szenarien mit Prozessen.

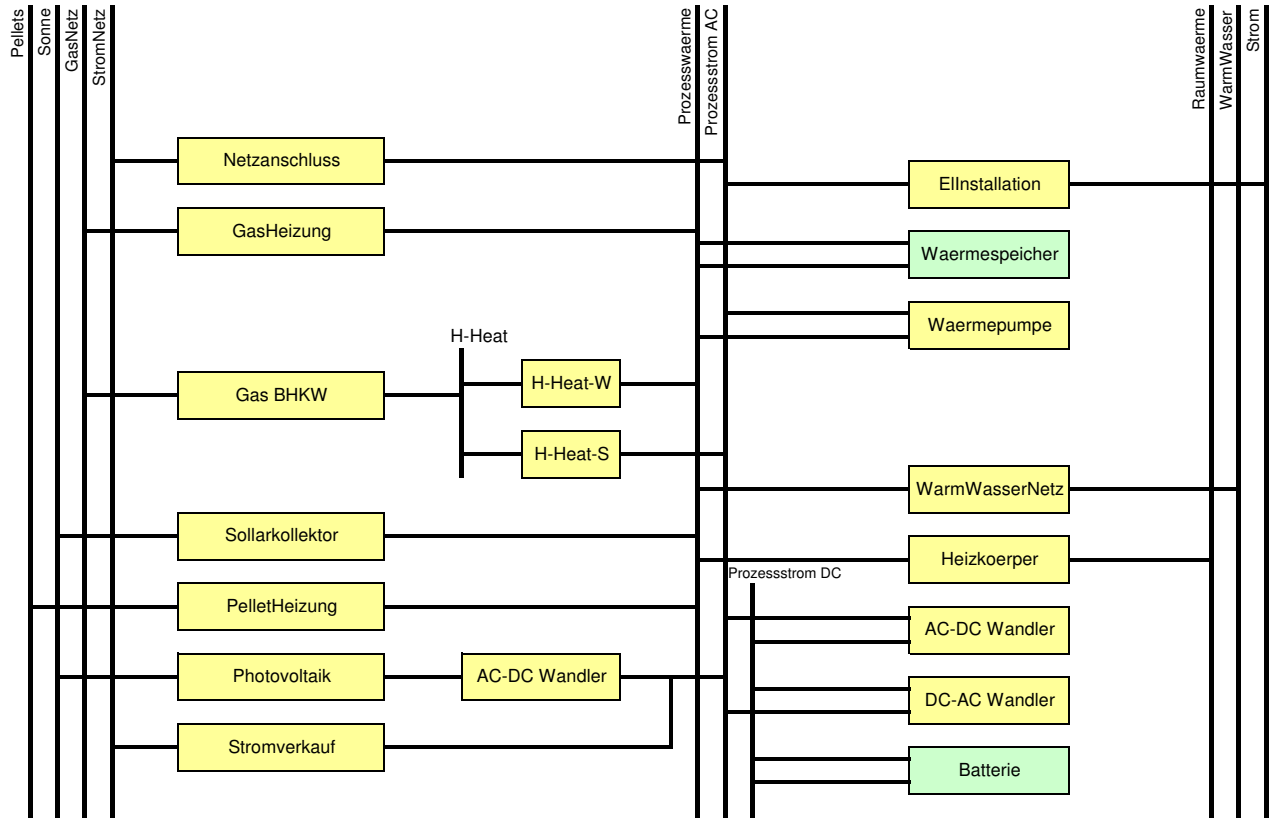


Abbildung 8.1.: Energiediagramm der maximal möglichen Prozesse der Modelle.

Die Energiebezugskosten für die einzelnen Nachfragegüter sind durch dieses Modell bestimmt. Sie ergeben sich aus den Kosten für die verbrauchten Energieträger und den Wirkungsgraden der benutzten Prozesse. Somit betragen beispielsweise die Energiebezugskosten für, durch eine Gasheizung erzeugte Raumwärme 7,2 Cent/kWh [2].

Zur Vergleichbarkeit der Modelle wurde aus den Typtagen ein Modelljahr erzeugt. Dazu wurde der Energiebedarf jedes Typtags mit der Häufigkeit seines Vorkommens pro Jahr multipliziert (siehe Abbildung 7.15). Als Ergebnis ergibt sich die Jahresenergienachfrage der Bewohner des jeweiligen Gebäudes an Strom, Warmwasser und Raumwärme. Anhand des Typtages Repräsentant I ergibt sich ein Kriterium für die mindestens zu installierende Kapazität der erlaubten, Wärme liefernden Prozesse [3].

In dem aufgestellten Modell sind die annuitätischen Installationspreise und die Energiepreise linear mit der Kapazität der Prozesse bzw. der Energiemenge verknüpft. Anhand der Nachfragekurven der

[2] berechnet aus Kosten Gas $/(\eta_{\text{GasHeiz}} * \eta_{\text{Heizkoerper}})$
[3] Repräsentant mit maximalem Raumwärmebedarf.

Prozess	Raumwärme [Cent/kWh]	Warmwasser [Cent/kWh]	Strom [Cent/kWh]
Netzan	-	-	17,09
GasHeiz	7,2	8,0	-
Pelletheizung	4,5	5,0	-
GasBHKW			
nur Kosten für Wärme	12,5	14,1	0
nur Kosten für Strom	0	0	22,8
Wärmekosten gleich wie bei Gasheizung	7,2	8,0	9,8
Stromkosten wie bei Netzanschluss	3,1	3,5	17,1

Tabelle 8.1.: Energiebezugskosten der verschiedenen Nachfragekurven in Abhhängigkeit des Prozesses und der Fahrweise.

Typtage und dem installierten Prozesspark können somit die jährlichen Gesamtkosten, die durch die Energieversorgung entstehen, berechnet werden.

Das jeweilige Modell konnte mittels NEW-URBS [4] optimiert werden. Als Ergebnis dieser Optimierung wird die, mit minimalen Gesamtkosten belegte Installation von Kapazitäten und Fahrweise der zur Verfügung stehenden Prozesse ermittelt und ausgegeben.

Im Folgenden wurde eine Vielzahl an Szenarien vorgegeben, optimiert und verglichen, um die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken am Modell zu untersuchen. Für jedes Szenario wurden dabei drei verschiedene Strom- und Warmwassernachfragen generiert und benutzt [5].

8.1. Blockheizkraftwerke in Einfamilienhäusern

In den ersten Szenarien wurden Einfamilienhäuser untersucht. In den Abbildungen 8.2 bis 8.4 sind die Nachfragen nach Strom und Wärme für die fünf Typtage (Wetterrepräsentanten) aus den Nachfragekurven 1 abgebildet. Für den Raumwärmebedarf wurde der Dämmstandard (ii) zugrunde gelegt.

Dabei ergibt sich für den Raumwärmebedarf bei Dämmstandard (ii) eine jährliche Wärmenachfrage nach 25721 kWh. Für den Strom- und Warmwasserbedarf ergeben sich folgende Jahresenergienachfragen (siehe Tabelle 8.2):

Nachfrage-variante	Strom Nach-frage [kWh]	Warmwasser Nachfrage [kWh]
1	5450	3213
2	7260	1128
3	3034	1903

Tabelle 8.2.: Jahresenergiebedarf für Strom und Warmwasser in Abhängigkeit der drei Nachfragekurven.

[4] ein in GAMS implementiertes Modell, welches ermöglicht Energiemodelle unter verschiedenen Restriktionen nach den entstehenden Gesamtkosten zu minimieren.

[5] Die drei Nachfragevarianten heißen Nachfrage 1, Nachfrage 2 und Nachfrage 3.

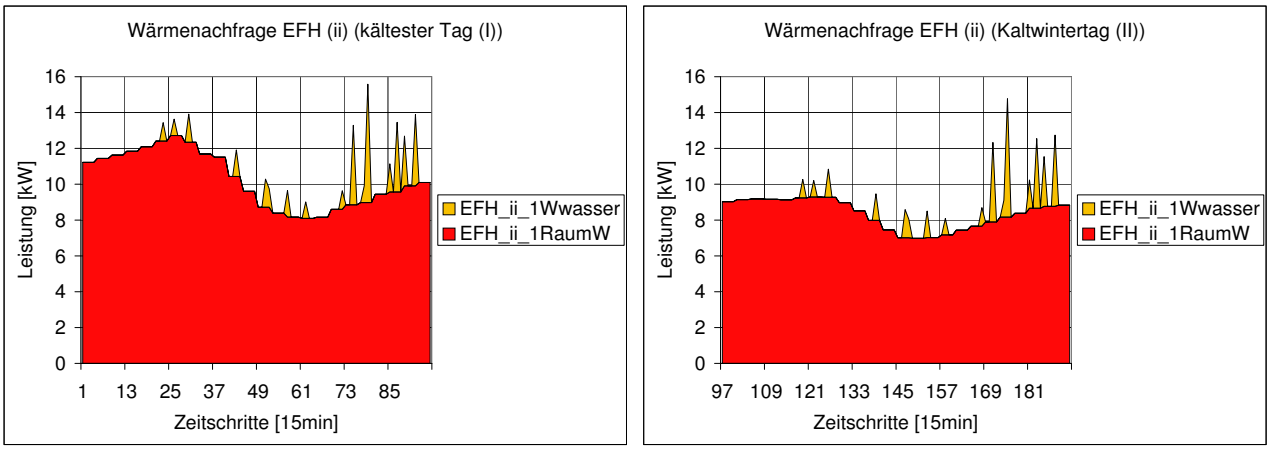


Abbildung 8.2.: *links:* Verlauf der Wärmenachfrage (Nachfrage 1) am Repräsentanten I (Gewichtung des Tages: 0,33). Die Skalierung der Abszisse erfolgt in Zeiteinheiten, wobei eine Zeiteinheit 15 Minuten entspricht. Ein Tag besteht somit aus 96 Zeiteinheiten; *rechts:* Verlauf der Wärmenachfrage (Nachfrage 1) am Repräsentanten II (Gewichtung 19).

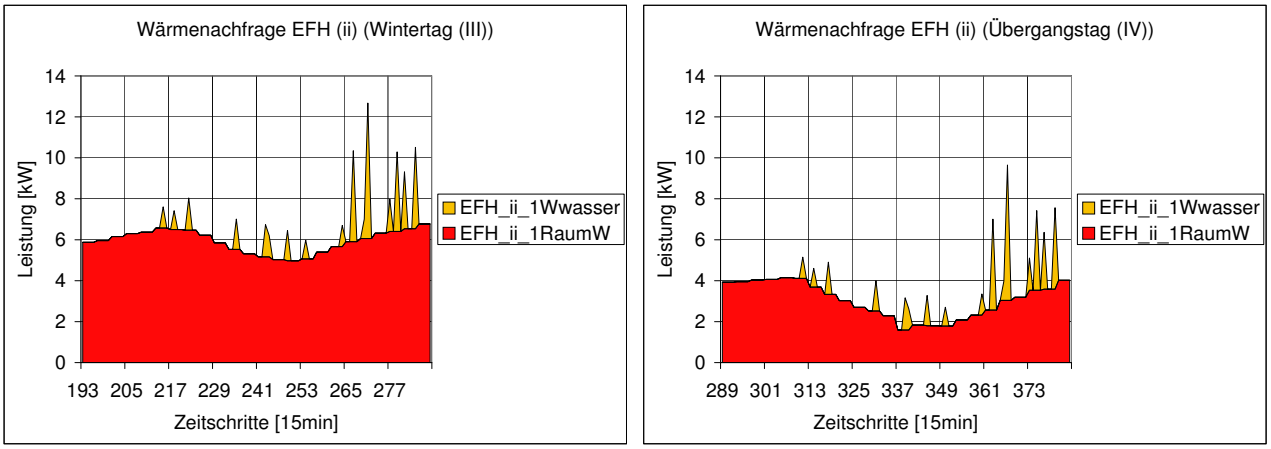


Abbildung 8.3.: *links:* Verlauf der Wärmenachfrage (Nachfrage 1) am Repräsentanten III (Gewichtung 103); *rechts:* Verlauf der Wärmenachfrage (Nachfrage 1) am Repräsentanten IV (Gewichtung 98).

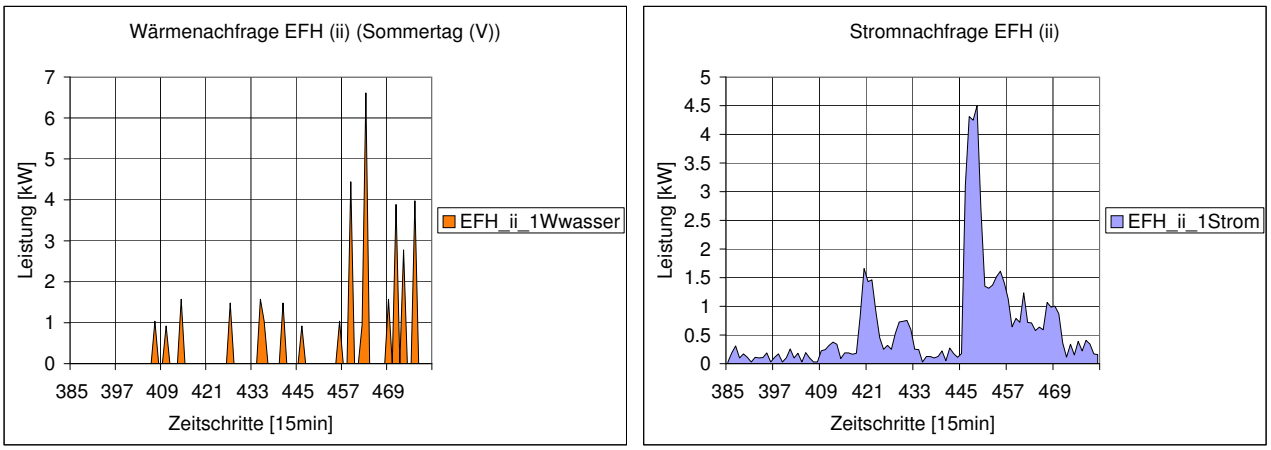


Abbildung 8.4.: *links:* Verlauf der Wärmenachfrage (Nachfrage 1) am Repräsentanten V (Gewichtung 144); *rechts:* Verlauf der Stromnachfrage (Nachfrage 1) für alle Repräsentanten.

Szenario G+N

Als erstes Szenario **G+N** [6] wurde der Optimierung die Möglichkeit gegeben die Nachfrage nach Wärme und Strom mit den Prozessen Gasheizung und Netzanschluss zu stillen. Die durchschnittlichen Kosten für die drei Nachfragevarianten lagen bei 3114 € bei einer CO_2-Emission von 9185 kg pro Jahr. Zur Deckung der Nachfrage wurden Kapazitäten mit der Auslastung wie in Abbildung 8.5 zu sehen, installiert.

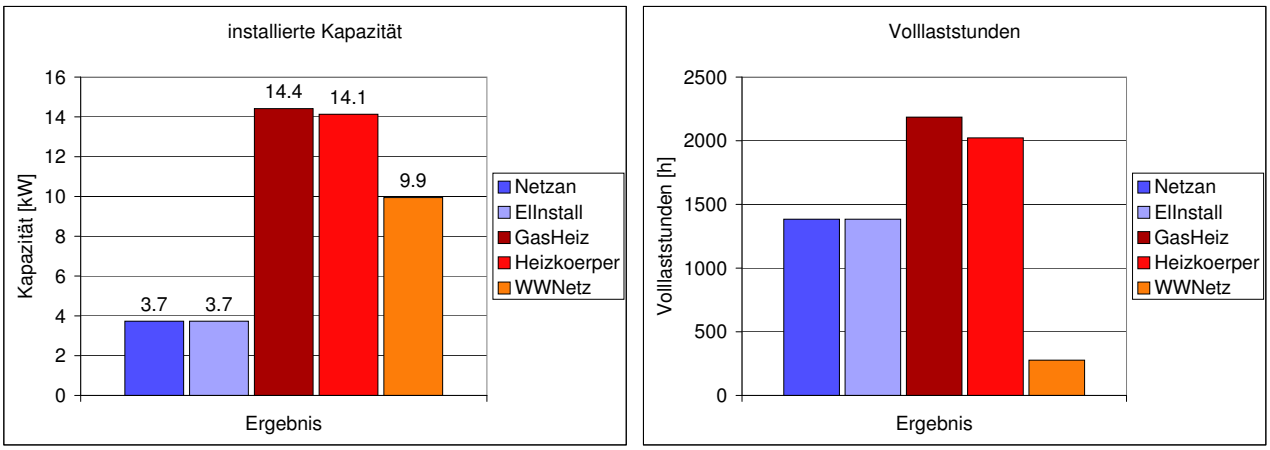


Abbildung 8.5.: *links:* Kapazität der installierten Prozesse; *rechts:* Volllaststunden der Prozesse

Für die marginalen Kosten der Stromnachfrage ergeben sich die Stromkosten von 17,09 Cent/kWh (siehe Abbildung 8.6). Dabei sind marginale Kosten, jene Kosten, die für eine zusätzliche Nachfrage des entsprechenden Gutes aufgebracht werden müssen. Die marginalen Kosten für die Deckung einer Nachfrage setzen sich zusammen aus den Energiebezugskosten und den Installationskosten. Die Energiebezugskosten sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst. Zu Zeiten, in denen die Kapazität eines Prozesses voll ausgelastet ist, muss zur Deckung einer zusätzlichen Nachfrage weitere Kapazität installiert werden, wodurch auch Installationskosten anfallen (siehe Abbildung 8.7 *links*).

Anschließend wurden die selben Nachfragen nur mittels eines Blockheizkraftwerks (Szenario **BHKW**), eines Netzanschlusses und eines BHKW's (**N+BHKW**), einer Gasheizung und eines BHKW's (**G+BHKW**) und eines Netzanschlusses, einer Gasheizung und eines BHKW's (**N+G+BHKW**) gedeckt. Die anfallenden jährlichen Kosten für die drei Nachfragen dieser Varianten so wie die dabei verursachten CO_2-Emissionen sind in Tabelle 8.3 zusammengetragen.

Die durch die Optimierung installierten Prozesskapazitäten der verschiedenen Szenarien sind in Abbildung 8.8 *links* dargestellt.

[6] **G** := Gasheizung; **N** := Netzanschluss; **BHKW** := GasBHKW

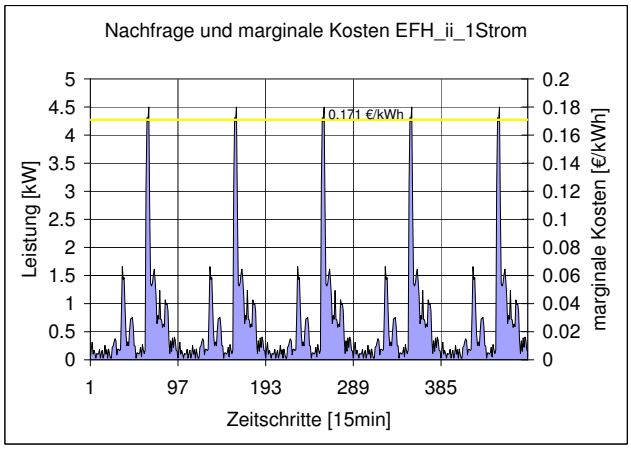


Abbildung 8.6.: Stromnachfrage und marginale Kosten des EFH (ii) für die Nachfrage 1 (Szenario **G+N**). Dabei wurden die fünf Repräsentanten in der Reihenfolge I, II, III, IV und V aneinander gereiht (Gewichtung der Tage wie in Abbildung 7.15 gezeigt).

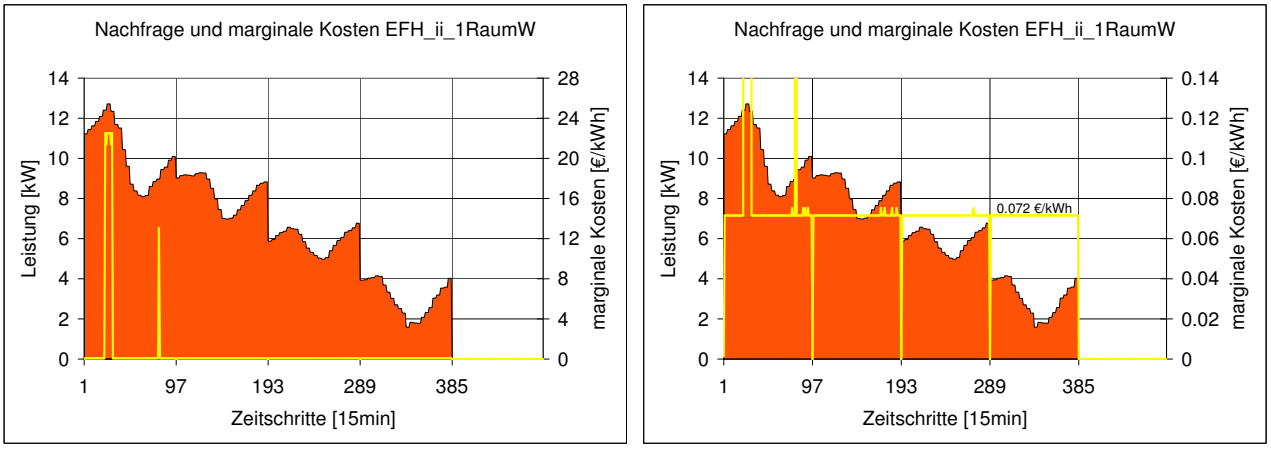


Abbildung 8.7.: Raumwärmenachfrage und marginale Kosten des EFH (ii) für zwei verschiedene Skalenbereiche der marginalen Kosten (Nachfrage 1, Szenario **G+N**). Dabei sind die fünf Typtage aneinander gereiht.

Szenario	EFH 1 [€/a]	EFH 2 [€/a]	EFH 3 [€/a]	Mittelwert [€/a]	CO_2-Emission [kg/a]
G+N	3220	3380	2742	3114	9185
BHKW	5413	5421	5118	5317	11572
N+BHKW	4730	4760	4421	4637	5000
G+BHKW	3904	3996	3062	3654	8457
N+G+BHKW	3158	3315	2694	3056	8709

Tabelle 8.3.: jährliche Kosten der verschiedenen Szenarien in Abhängigkeit der Nachfragekurven 1, 2 und 3 und durchschnittliche Kosten und CO_2-Emissionen der drei Nachfragen

Es zeigt sich, dass die installierte Kapazität des BHKW sehr stark von der Wahl der zur Verfügung stehenden Prozesse ab hängt. Bei den beiden Szenarien bei denen keine Gasheizung als Prozess erlaubt ist (**BHKW** und **N+BHKW**) wird eine BHKW Kapazität von 23,23 kW installiert [7]. Diese muss

[7] entspricht ca. 7 kW_{el}

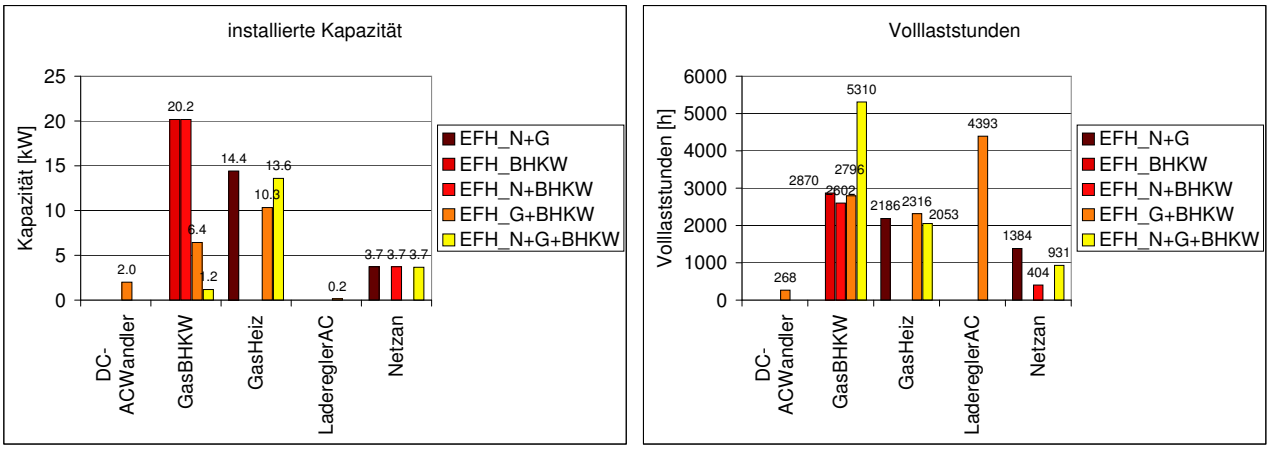


Abbildung 8.8.: *links:* durch die Optimierung durchschnittlich installierte Prozesskapazitäten (aufgenommene Leistung) der verschiedenen Szenarien; *rechts:* Volllaststunden der Prozesse in Abhängigkeit des Szenarios.

in beiden Fällen den gesamten Wärmebedarf stillen. Die Auslastung des BHKW beträgt dabei im Schnitt ca. 2700 Volllaststunden.

Szenario BHKW

Im Szenario **BHKW** wird nur das Blockheizkraftwerk so verwendet, um den Wärme- bzw. Strombedarf zu decken. Somit wird das BHKW bei großer Wärmenachfage wärmegeführt und bei großer Stromnachfrage stromgeführt betrieben. Anfallende überschüssige Wärme und Strom bleiben ungenutzt. Zur Deckung der Jahresnachfrage nach Wärme und Strom werden vom BHKW im Schnitt der drei Nachfragevarianten 57,9 MWh an Gas eingesetzt. Daraus werden 33,6 MWh Wärme und 16,8 MWh Strom produziert. Dadurch wird mehr als drei mal so viel Strom produziert, wie abgenommen wird. Wärme wird in diesen Szenarien 8 % zuviel erzeugt. Durch Nutzung eines BHKW's anstatt der Gasheizung und eines Netzanschlusses erhöhen sich die jährlichen Kosten im Schnitt der drei Nachfragekurven um ca. 70 % auf 5317 €. Ebenso steigt die CO_2-Emission um ein Virtel an (siehe Tabelle 8.3).

Die marginalen Kosten für Raumwärme, Warmwasser und Strom sind in diesem Szenario stark voneinander abhängig. Zu Zeiten, in denen das BHKW wärmegeführt betrieben wird, sind die marginalen Kosten der Raumwärmenachfrage 12,5 Cent/kWh, die der Warmwassernachfrage [8] 14,1 Cent/kWh. Dabei wird mehr Strom produziert als nachgefragt wird. Dementsprechend sind die marginalen Kosten für Strom Null. Am Sommertag wird, aufgrund des im Verhältnis geringen Wärmebedarfs das BHKW stromgeführt betrieben. Dadurch ergeben sich dann für die Stromnachfrage marginale Kosten. Diese liegen bei 22,8 Cent/kWh. Zusätzliche Wärme ist hierbei nicht mit Kosten beaufschlagt, da diese im Sommer im Überfluss vom BHKW produziert wird. In Zeitperioden, in denen weder überschüssiger Strom noch Wärme erzeugt wird, teilen sich die marginalen Kosten auf Strom und Wärme auf (siehe Abbildung 8.9 *links* Repräsentant IV; Stromkosten 0,011 €/kWh, Wärmekosten 0,119 €/kWh).

[8] aufgrund des schlechteren Wirkungsgrades des Warmwassernetzes von 80 %

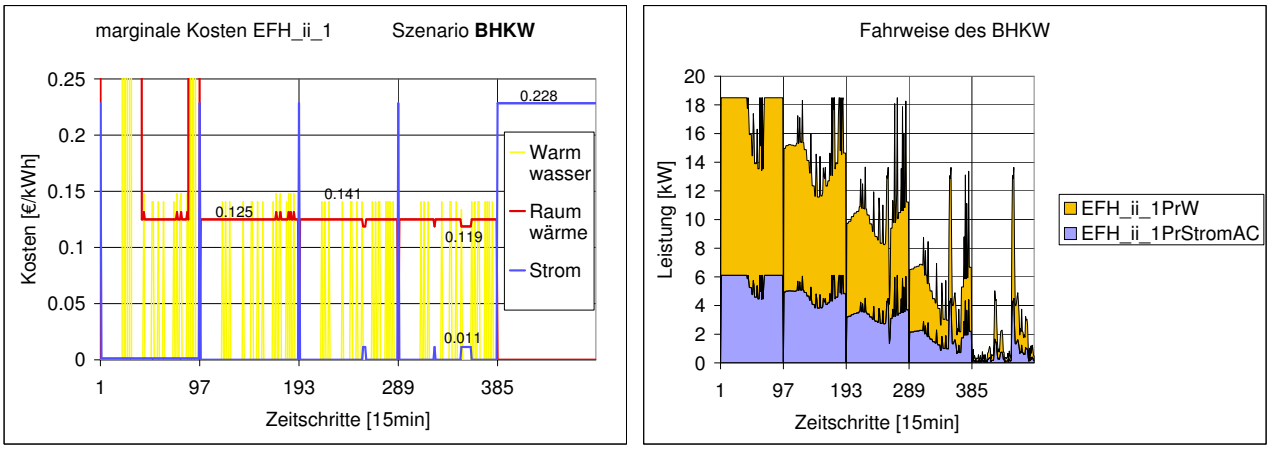


Abbildung 8.9.: *links:* marginale Kosten für Strom, Raumwärme und warmes Wasser für Nachfragekurve 1 (Szenario **BHKW**); *rechts:* Fahrweise des BHKW.

Szenario N+BHKW

Um den im letzten Szenario zuviel produzierten Strom nutzen zu können, wurde in diesem der Optimierung gestattet neben dem BHKW den Prozess Netzanschluss zu installieren (**N+BHKW**). Dadurch kann zum Einen Strom aus dem Netz bezogen werden, zum Anderen kann BHKW-Strom an den Netzbetreiber zu einem Preise von 5,11 Cent/kWh verkauft werden. In dieser Ausstattungsvariante fährt das BHKW zu allen Zeiten wärmegeführt (unter Berücksichtigung der Zwischenspeicherung von Wärme zu Zeiten großer Stromnachfrage, siehe Abbildung 8.10 *rechts*, z.B. Spannungsspitze am Abend des Repräsentanten IV spiegelt sich im Energieinhalt des Wärmespeichers nieder). Es wird gerade soviel an Wärme produziert, wie nachgefragt wird. Dabei wird eine Strommenge von 15,2 MWh generiert. Diese wird im Mittel knapp zu einem Viertel zur Deckung der eigenen Stromnachfrage genutzt. Der Rest des Stromes wird in den Szenarien für 590 € pro Jahr verkauft. Somit deckt das BHKW 70 % des jährlichen Strombedarfs. Die restliche Stromnachfrage wird durch das Stromnetz gedeckt.

Die durchschnittlichen Gesamtkosten betragen 4637 €/a und liegen weit über den Energiekosten die aus einer Gasheizung und einem Netzanschluss resultieren. Die jährliche Produktion von CO_2 hingegen verringert sich um 45 % zu diesem Szenario. Dies liegt an der Verrechnung von CO_2-Emissionen für eingespeisten Strom von 6355 kg CO_2 pro Jahr [9].

Die Auslastung des Blockheizkraftwerks liegt bei 2600 Volllaststunden pro Jahr, die des Netzanschlusses verringert sich im Vergleich zu **N+G** von 1380 h/a auf 400 h/a [10].

Für die ersten vier Typtage [11] verringern sich die marginalen Kosten für Wärme gegenüber dem Szenario **BHKW** aufgrund der Möglichkeit den dabei erzeugten Strom zu verkaufen. Dagegen steigen die marginalen Kosten für Strom in diesem Zeitraum an, da eine Erhöhung der Stromnachfrage zur Folge hat, dass weniger Strom an den Netzbetreiber verkauft werden kann. An Sommertagen wird

[9] CO_2-Emissionen für Netzstrom liegt bei 0,55 kg/kWh.
[10] entspricht 4,6 %
[11] Wetterrepräsentanten mit Raumwärmebedarf

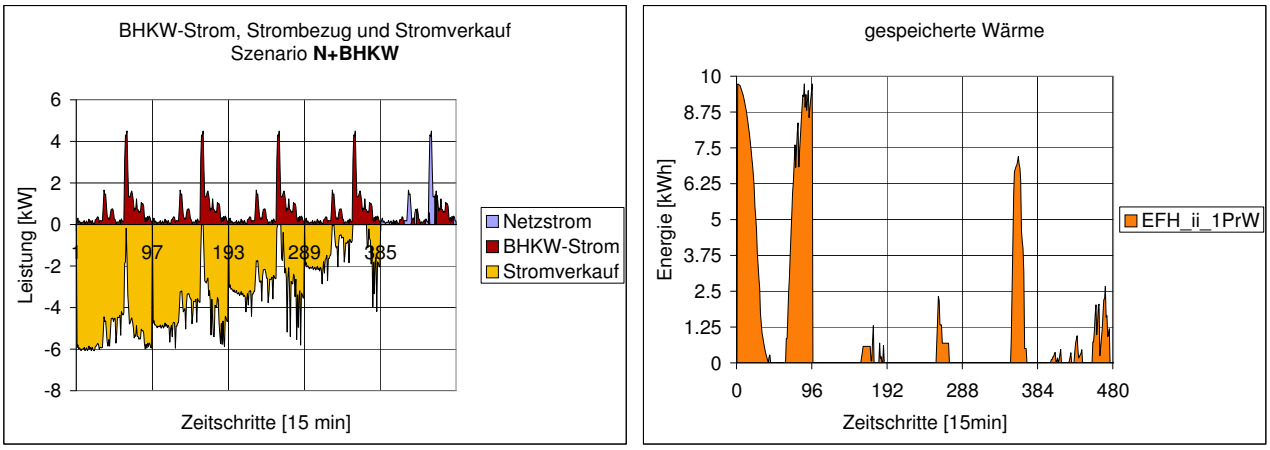


Abbildung 8.10.: *links:* Strombezug, selbst nachgefragter BHKW-Strom und Stromverkauf des überschüssig produzierten Stromes (Szenario **N+BHKW** Nachfrage 1); *rechts:* Speicherinhalt im Warmwasserspeicher (Szenario **N+BHKW**).

eine weitere Stromnachfrage am kostengünstigsten aus dem Stromnetz gestillt. Daraus resultiert der Netzstrompreis als marginale Kosten. Eine zusätzliche Wärmenachfrage müsste im Sommerfall durch das BHKW gestillt werden. Dementsprechend müsste ein größerer Teil der Stromnachfrage durch den teureren Prozess BHKW gedeckt werden. Die dabei anfallenden Mehrkosten werden den marginalen Kosten der Wärmenachfrage (Warmwassernachfrage) auferlegt.

Legt man sämtliche anfallenden variablen Kosten des Blockheizkraftwerks nur auf die Stromproduktion um, dann ergibt sich daraus ein Strompreis von 0,228 €/kWh (bei einer Wärmeproduktion von 2 kWh). Veranschlagt man für diese Wärme Gestehungskosten wie bei der Gasheizung von 0,0715 €/kWh (siehe Szenario **G+N**) und geht man davon aus, dass die gesamte vom BHKW produzierte Wärme genutzt werden kann, so ergeben sich daraus minimale Gestehungskosten für vom BHKW erzeugten Strom von 0,085 €/kWh. Dementsprechend fallen, bei einem Erlös von 0,051 €/kWh für jede an den Netzbetreiber verkauften kWh Strom 3,4 Cent an Kosten an.

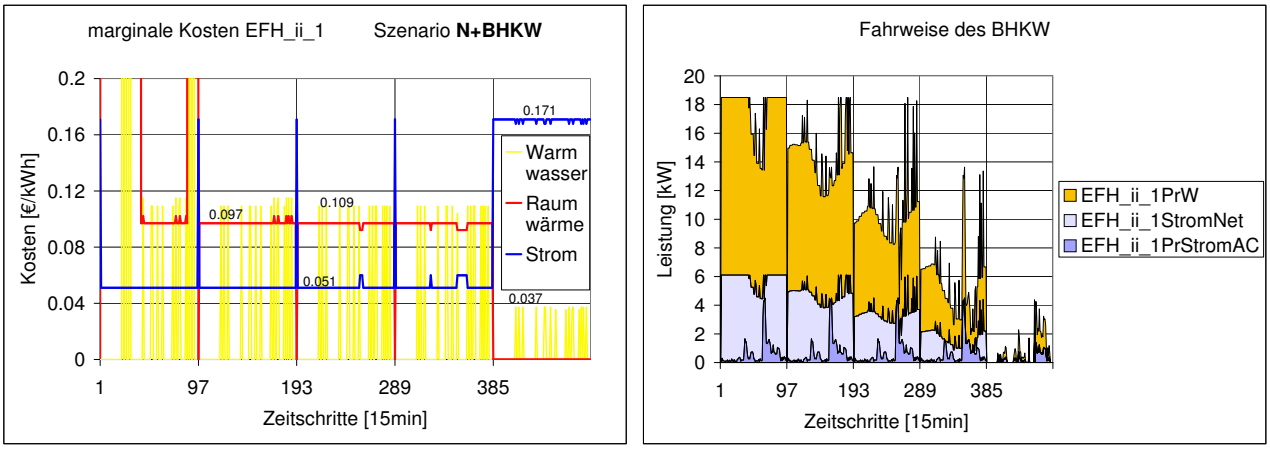


Abbildung 8.11.: *links:* marginale Kosten Nachfragekurve 1 (Szenario **N+BHKW**); *rechts:* Fahrweise des BHKW.

Szenario G+BHKW

Hier waren die Prozesse Gasheizung und BHKW erlaubt. Es wurde eine wesentlich geringere Kapazität des BHKW von 6,4 kW [12] installiert. Es zeigt sich eine deutlich andere Fahrweise des BHKW wie in den vorangegangenen Fällen. Das BHKW wird in erster Linie zur Deckung der Stromnachfrage betrieben (siehe Abbildung 8.12 *rechts*). Fehlende Wärme wird durch die Gasheizung erbracht, wobei vom BHKW 31 % zum Wärmebedarf beigesteuert werden. Zu Zeiten größter Wärmenachfrage fährt das BHKW nicht strom-, sondern wärmegeführt und somit wird vom BHKW mehr Strom erzeugt als nachgefragt wird (Abbildung 8.12 *rechts* kältester Tag). Dieser Strom bleibt ungenutzt. Diese Energiemenge ist vernachlässigbar gering.

In dem Szenario wird von der Optimierung ein Speicher für elektrischen Strom installiert um teure Prozesskapazität des Blockheizkraftwerks durch günstigere Speicherkapazität zu ersetzen. Die Speichergröße hängt dabei stark von der Stromnachfrage ab (siehe Tabelle 8.4).

	EFH 1 [kWh]	EFH 2 [kWh]	EFH 3 [kWh]
Kapazität Akku	2,7	0,7	0,4

Tabelle 8.4.: Installierte Kapazität der Batterien in Abhängigkeit der Nachfragekurve im Szenario **G+BHKW**

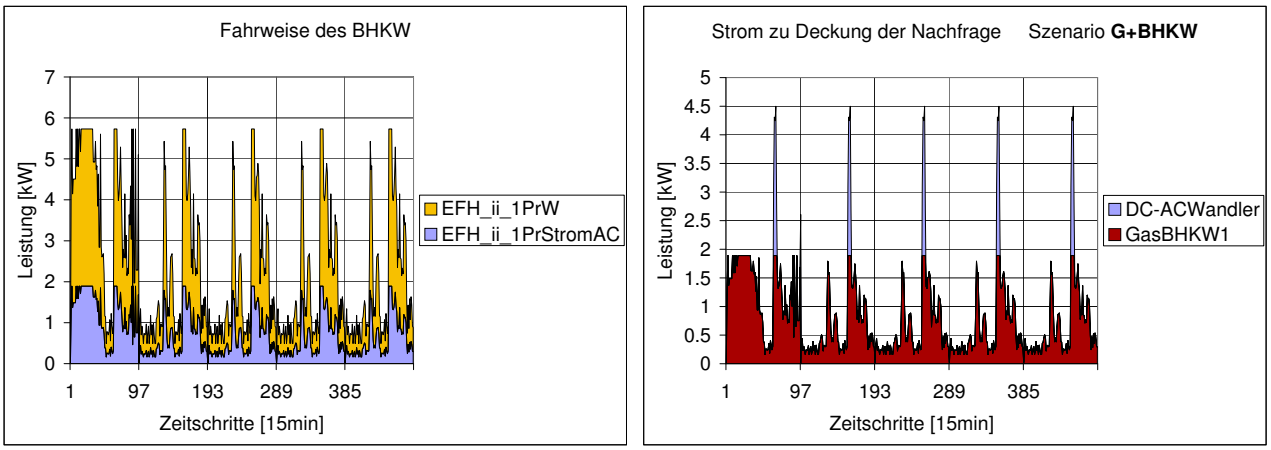


Abbildung 8.12.: *links:* Fahrweise des BHKW Nachfrage 1 (Szenario **G+BHKW**); *rechts:* Stromangebot aus BHKW und Batterie.

Die marginalen Kosten der Nachfragen sind sehr stark von den Konstellationen der Nachfragen abhängig. Für den Fall, dass soviel Wärme nachgefragt wird, dass das BHKW mehr Strom produziert, als nachgefragt wird, schlagen sich sämtliche variablen Kosten auf die Wärmenachfrage nieder (Abbildung 8.14 morgens und abends des kältesten Tages, 12,5 Cent/kWh Raumwärme). Wird sämtliche Wärme und Strom des Blockheizkraftwerks verwendet verteilen sich die marginalen Kosten zu 9,8 Cent/kWh für Strom und 7,2 Cent/kWh für Raumwärme. Zu Zeiten sehr hoher Stromnachfrage wird Strom aus den Akkumulatoren verwendet um diese Spitzennachfrage zu decken. Durch die

[12] entspricht ca. 1,9 kW elektrisch

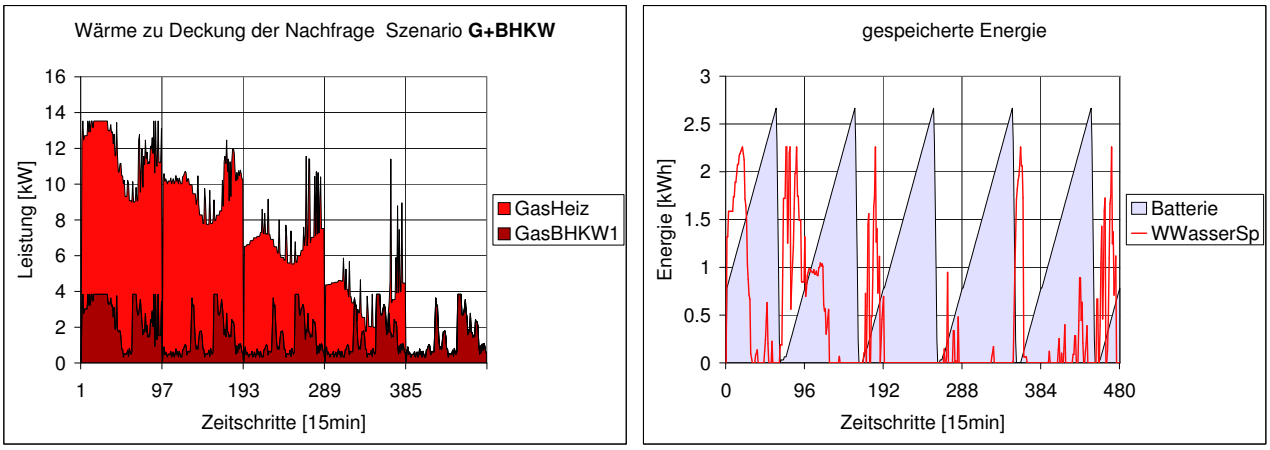


Abbildung 8.13.: *links:* Wärmeangebot aus BHKW und Gasheizung Nachfragekurve 1; *rechts:* Speicherinhalt Akkus und Warmwasserspeicher.

Speicherverluste verteuert sich diese Energie (Abbildung 8.14 Repräsentant III). Wird vom BHKW aufgrund der Stromproduktion mehr Wärme zur Verfügung gestellt, als abgenommen wird, schlagen die marginalen Kosten voll der Stromnachfrage zu Buche (Sommertag (V)).

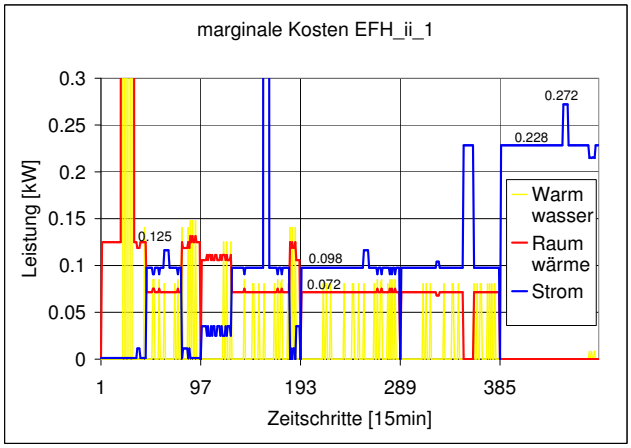


Abbildung 8.14.: *links:* marginale Kosten Nachfragekurve 1 (Szenario **G+BHKW**).

Szenario N+G+BHKW

Bei der Variante, in der der Optimierung erlaubt wird, zusätzlich zum Netzanschluss und einer Gasheizung ein BHKW zu installieren wird nur eine sehr kleine BHKW-Kapazität von 1,2 kW [13] installiert. Dabei leistet das BHKW im Mittelwert über die drei Nachfrageszenarien einen jährlichen Anteil zum Strombedarf von 33,5 %. Der Anteil am Wärmebedarf liegt bei 11,3 %.

Die Fahrweisen für die Prozesse sind in den Abbildungen 8.15 bis 8.17 wieder gegeben. Dabei zeigt sich, dass das BHKW in erster Linie dazu benutzt wird um einen Grundlastanteil der Stromnachfrage zu decken. Die Spitzenlast wird weiter vom Netzanschluss erbracht. Dadurch ergibt sich eine hohe Auslastung des BHKW (ca. 4500 Volllaststunden, siehe Abbildung 8.8). Die Wärme des Blockheizkraftwerks

[13] entsricht ca. 0,35 kW elektrisch

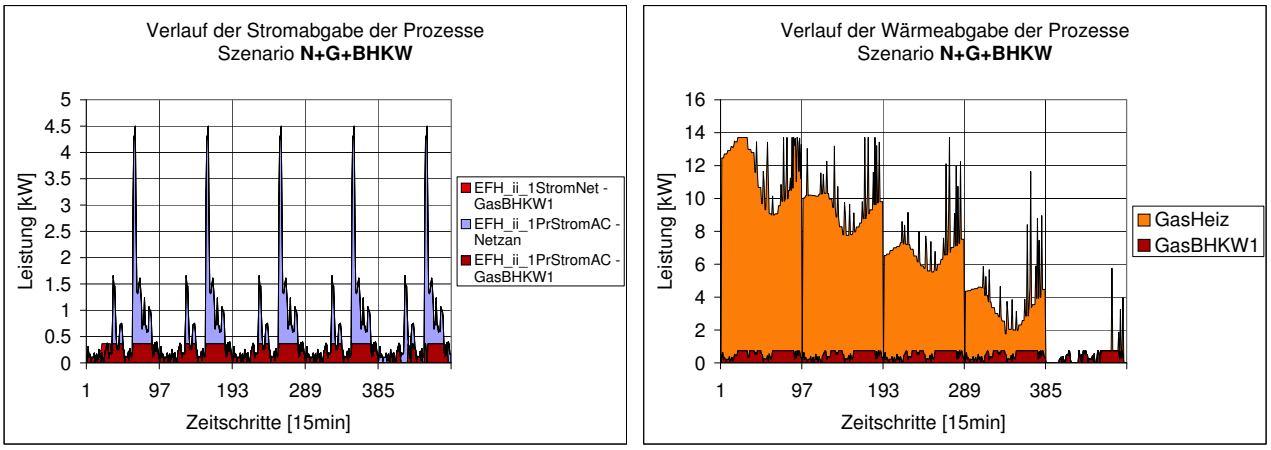


Abbildung 8.15.: *links:* Stromproduktion des BHKW (Stromverkauf ist in weinroter Farbe dargestellt) und Strombezug aus dem Netz (Szenario **N+G+BHKW**); *rechts:* Wärmebereitstellung (Szenario **N+G+BHKW**).

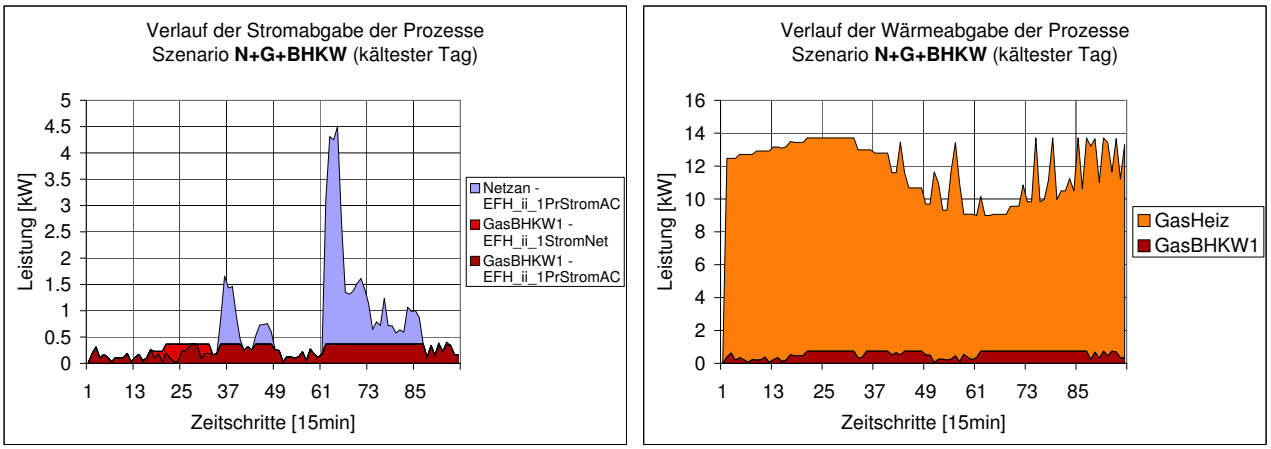


Abbildung 8.16.: *links:* Stromproduktion des BHKW (Stromverkauf ist in weinroter Farbe dargestellt) und Strombezug aus dem Netz für den Repräsentanten I (kältester Tag); *rechts:* Wärmebereitstellung Repräsentant I.

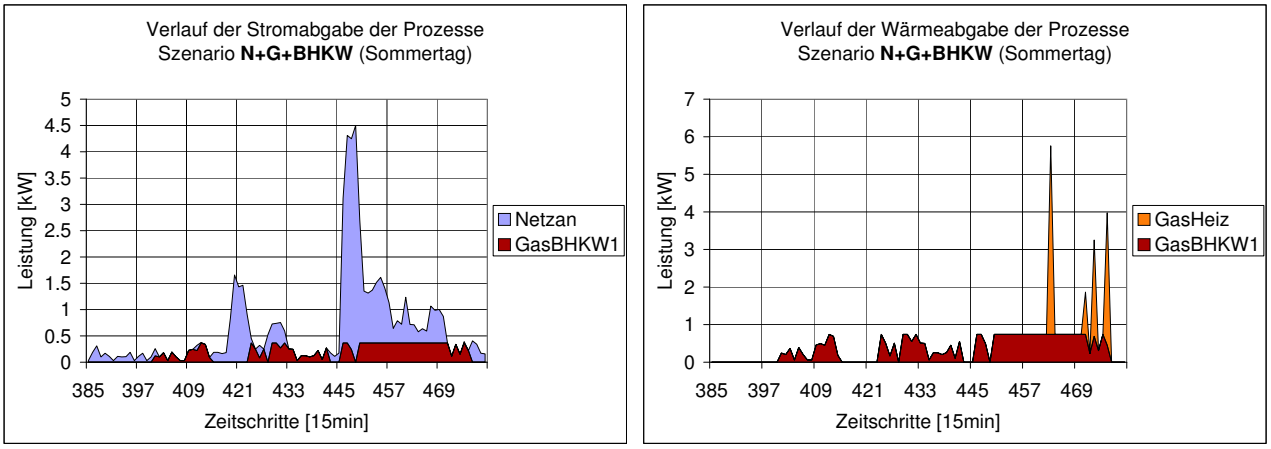


Abbildung 8.17.: *links:* Stromproduktion des BHKW und Strombezug aus dem Netz (Repräsentant V); *rechts:* Wärmebereitstellung (Repräsentant V).

trägt einen geringen Teil zur Wärmebedarfsdeckung bei. An Sommertagen (siehe Abbildung 8.17) wird das BHKW nur soweit zur Deckung der Stromnachfrage benutzt, wie Wärme in Form von warmem Wasser verbraucht wird. Es wird kein Strom erzeugt, dessen Wärme nicht verbraucht wird. Spitzen der Warmwassernachfrage werden teilweise durch die Gasheizung abgefangen. Am kältesten Tag (Repräsentant I) wird das BHKW zum Teil zur Abdeckung der maximalen Wärmenachfrage gefahren, obwohl der dabei erzeugte Strom nicht vollständig selbst genutzt werden kann. Dieser überschüssige Strom wird trotz der dadurch entstehenden Kosten [14] produziert und an den Netzbetreiber verkauft, da diese Variante kostengünstiger ist als weitere Prozesskapazität der Gasheizung zu erschaffen (siehe Abbildung 8.19).

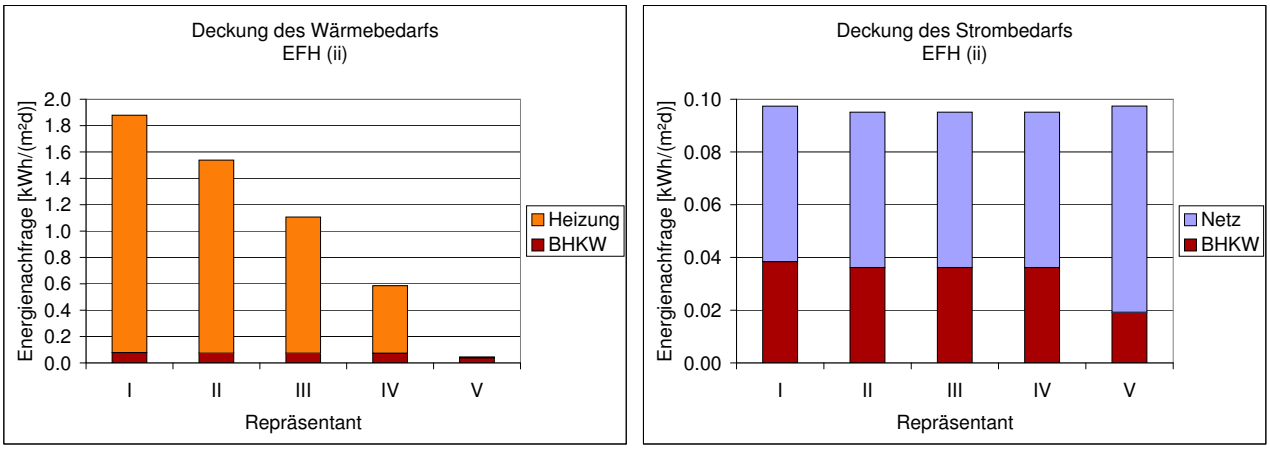


Abbildung 8.18.: *links:* Anteil der von der Gasheizung und vom BHKW erbrachten Wärmemenge pro Tag in Abhängigkeit des Typtags (vergleiche Abbildung 6.18 *links*); *rechts:* Anteil der vom Netzanschluss und vom BHKW erbrachten Strommenge pro Tag in Abhängigkeit des Typtags (vergleiche Abbildung 6.18 *rechts*).

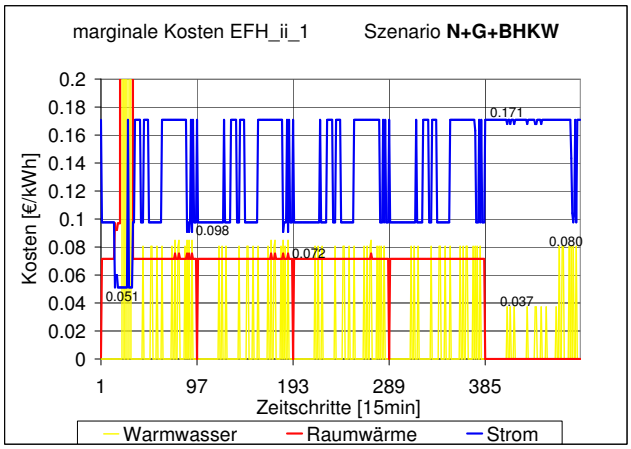


Abbildung 8.19.: marginale Kosten für Strom, Raumwärme und Warmwasser.

Aufgrund der Abdeckung einer Grundlast durch das BHKW verringert sich die Auslastung des Stromnetzes [15].

[14] siehe Szenario **N+BHKW**

[15] entspricht der Auslastung des Netzanschlusses (siehe Abbildung 8.8).

Diese Variante stellt das einzige optimierte Szenario dar, bei dem die Energienachfrage unter Installation eines Blockheizkraftwerks Kostenvorteile gegenüber einer Variante mit Gasheizung und Netzanschluss generiert. Die jährlichen Kosten verringern sich im Schnitt zu dem Szenario **N+G** um 58 € [16]. Die Emission von CO_2 verringert sich durch die Nutzung des BHKW um knapp 5 %. Somit stellt die Variante mit BHKW nur eine geringere Verbesserung der Energieversorgung dar.

8.2. Einfluss der Gebäudegröße

In diesem Abschnitt wurde untersucht, welchen Einfluss die Gebäudegröße auf die Energieversorgung von Gebäuden mit den erlaubten Prozessen Netzanschluss, Gasheizung und Blockheizkraftwerk hat. Dazu wurden die sechs, in Kapitel 7.2 vorgestellten Gebäude mit dem Dämmstandard (ii) in NEWURBS optimiert [17]. Zusätzlich wurden mehrere Gebäude zu zwei Gebäudegruppen [18] zusammengefasst [19]. Straße 1 besteht aus neun Häusern (3 * EFH, 3 * ZFH und 3 * MFH3) mit je unterschiedlichen Nachfragekurven. Somit befinden sich in dieser Straße 18 Partein mit insgesamt 58 Bewohnern. Straße 2 wird aus 3 * MFH12 und 3 * MFH26 zusammengestellt und beinhaltet 114 Wohnungen mit gesamt 189 Personen. Bei beiden Straßen wurde der Optimierung die Möglichkeit gegeben in einem Gebäude die Prozesse Gasheizung, Netzanschluss und BHKW zu installieren. Alle anderen Gebäude der jeweiligen Straße werden durch ein Nahversorgungs- Wärme- bzw. Stromnetz versorgt. Dem Wärmenetz wurde ein Wirkungsgrad von 99 % und dem Stromnetz von 100 % zugeordnet, wobei keine zusätzlichen Kosten durch die Nahversorgungsnetze berücksichtigt wurden.

Die hinter diesem Ansatz steckende Idee war, die Auslastung der Nachfragekurven, durch die Erhöhung der zu versorgenden Parteien zu steigern (vergleiche Abbildung 7.9) um dementsprechend eine bessere Auslastung der Prozesse zu erreichen.

Um die Auswirkungen dieser Maßnahme überprüfen zu können wurden weiter die Straßen 1a und 2a Modelliert. Diese bestehen aus denselben Gebäuden mit denselben Nachfragekurven wie Straße 1 bzw. Straße 2. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass hier jedes Gebäude mit den Versorgungsprozessen ausgestattet wird, ohne die Möglichkeit zusätzlich ein Nahversorgungssystem für Wärme- und Stromaustausch zwischen den Gebäuden zu installieren. In diesem Fall ergeben sich die Volllaststunden der Nachfrage aus dem Quotienten zwischen der Summe der nachgefragten Maximallasten der einzelnen Gebäude und der Summe der nachgefragten Energiemenge an Wärme und Strom.

An den, in Abbildung 8.20 dargestellten Auslastungen der verschiedenen Szenarien bestätigt sich, dass die Auslastung der Nachfrage im Allgemeinen mit der Anzahl der zu versorgenden Parteien steigt (dies trifft nicht für die Straßen 1a und 2a zu, da hier die Summe der Maximalleistung und nicht, wie im Szenario Straße 1 und 2 die Maximalleistung der Summe der Einzelleistungen ausschlaggebend ist. Es gilt: $\max[\sum_{n=1}^{N} P_n(t)] \leq \sum_{n=1}^{N} \max(n)[P_n(t)]$ mit $P_n(t)$ gleich der Leistung des Haushalts n zur Zeit t).

[16] um ca. 2 %
[17] Es wurde jedes Gebäude mit drei verschiedenen Nachfragekurven optimiert und jeweils der Mittelwert bestimmt.
[18] Straße 1 und Straße 2
[19] Diese wurde jeweils nur einmal Optimiert.

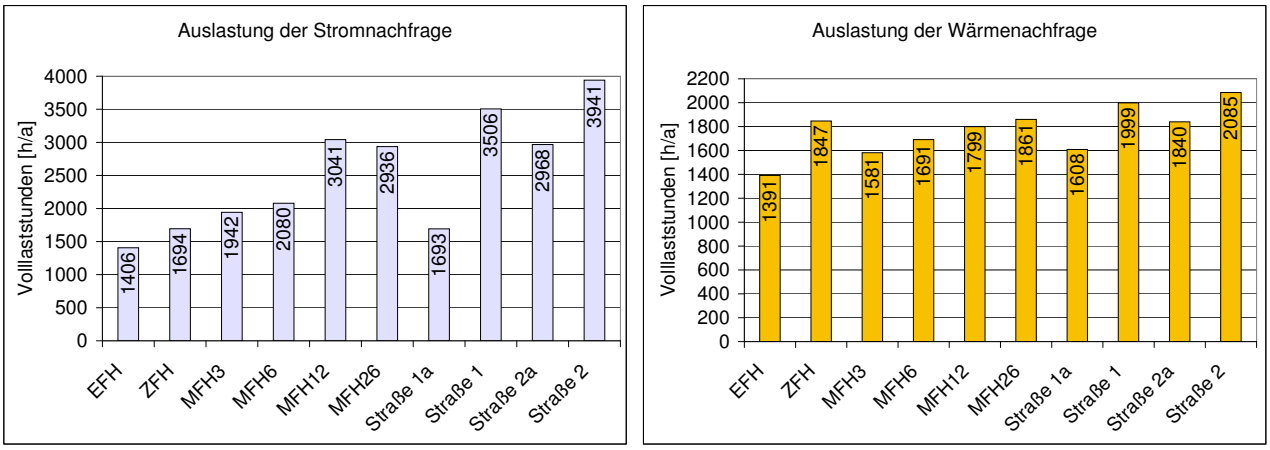


Abbildung 8.20.: *links:* durchschnittliche Auslastung der Nachfrage nach elektrischer Energie der verschiedenen Gebäude bzw. Straßen; *rechts:* Auslastung der Wärmenachfrage für die Gebäude bzw. für die Straßen.

Durch die Installation der Nahversorgungsnetze kann somit die Auslastung der Stromnachfrage von Szenario 1a zu 1 mehr als verdoppelt werden (siehe Abbildung 8.20 *links*). Bei Straße 2 wird durch die Zusammenlegung der Einzelnachfragen die Auslastung der Stromnachfrage um ca. ein viertel erhöht. Auch die Auslastung der Wärmenachfrage der beiden Straßen erhöht sich, wie zu erwarten in beiden Straßen durch die Kopplung der Nachfragen durch das Wärmeverteilsystem (siehe Abbildung 8.20 *rechts*).

In den Abbildungen 8.21 und 8.22 sind die kostenoptimalen Kapazitäten und Energiedurchsätze für die verschiedenen Prozesse und die sich dadurch ergebenden Volllaststunden der Szenarien dargestellt.

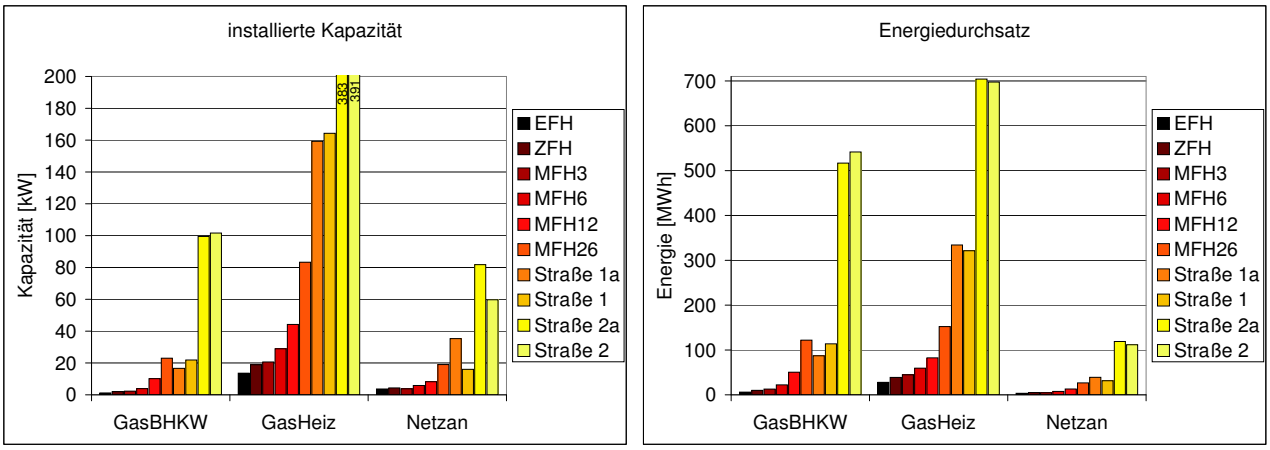


Abbildung 8.21.: *links:* von der Optimierung installierte Kapazitäten der Leistungsaufnahme der Prozesse bei verschiedenen Szenariengrößen (Kapazität der Gasheizung im Szenario Straße 2 beträgt 391 kW, Straße 2a 383 kW); *rechts:* Energiedurchsatz pro Jahr der Prozesse bei verschiedenen Szenariengrößen.

Dabei zeigt sich, dass die Kapazität des Blockheizkraftwerks jeweils so groß installiert wird, dass sie mit ca. 5000 Volllaststunden genutzt werden kann. Die Auslastung der Gasheizung nimmt dabei mit steigender Versorgungsgröße im Trend geringfügig ab, wohingegen die Auslastung der Stromversorgung durch das Stromnetz mit steigender Größe des Szenarios ebenso steigt.

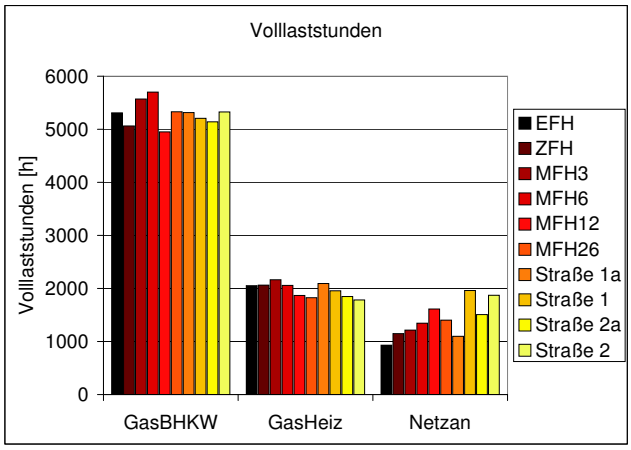


Abbildung 8.22.: Volllaststunden der Prozesse bei verschiedenen Szenariengrößen.

Für die Fahrweise der Prozesse ergeben sich folgende Diagramme (siehe Abbildung 8.23 für den Gebäudetyp MFH26 im Vergleich mit Abbildung 8.15 (Gebäude EFH)).

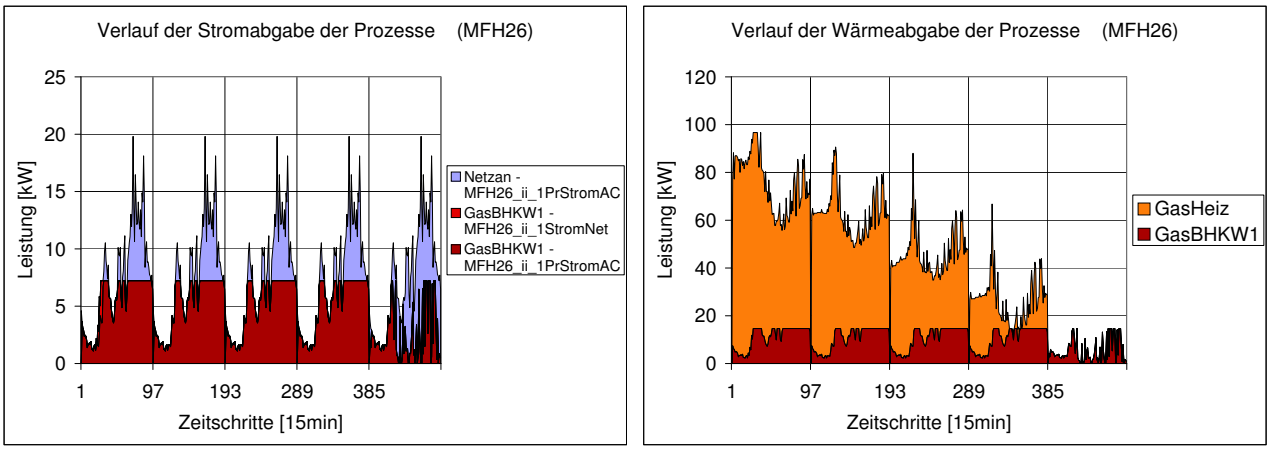


Abbildung 8.23.: *links:* Verlauf der durch das BHKW und durch den Netzanschluss bereitgestellter elektrischer Energie (weinroter Anteil an Tag I entspricht Stromverkauf an das Netz); *rechts:* Verlauf der Wärmebereitstellung.

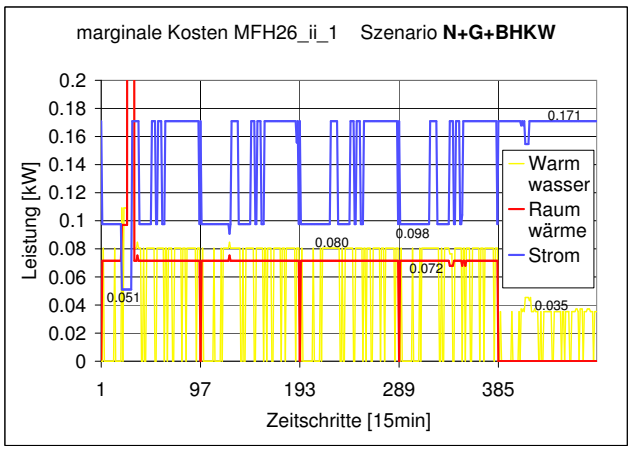


Abbildung 8.24.: Verlauf der marginalen Kosten für das Gebäude MFH26, Szenario **N+G+BHKW**.

Als Referenz wurden die selben Varianten [20] ohne die Möglichkeit der Installation eines BHKW optimiert. Die Kosten für beide Versorgungsvarianten sind in Tabelle 8.5 zusammengefasst.

Szenario	**N+G** [€ / a]	**N+G+BHKW** [€ / a]	Kap. BHKW [kW_{el}]	Kostenreduktion [€ / a]	Kostenreduktion [%]
EFH	3114	3056	0.35	58	1.9
ZFH	4484	4389	0.6	95	2.1
MFH3	5062	4928	0.7	134	2.7
MFH6	7485	7241	1.1	244	3.3
MFH12	12600	12113	3.0	487	3.9
MFH26	26310	25039	6.7	1270	4.8
Straße 1a	37980	37116	5.0	863	2.3
Straße 2a	116729	111458	29.1	5271	4.5
Straße 1	-	36987	6.4	993	2.6
Straße 2	-	111524	29.5	5205	4.5

Tabelle 8.5.: Gesamtkosten für die sechs Häuser und zwei Straßen für die beiden Versorgungsvarianten **N+G** und **N+G+BHKW**, installierte BHKW-Kapazitäten in elektrischer Leistung und Kostenersparnis pro Jahr unter Benutzung des Blockheizkraftwerks.

Es zeigt sich, dass das Kosten-Einsparpotential der optimierten Gebäude unter Nutzung eines BHKW mit der Gebäudegröße steigt.

Gestattet man Straße 1a **N+G** die zusätzliche Installation von Blockheizkraftwerken (zu Straße 1a **N+G+BHKW**) verringern sich die jährlichen Gesamtkosten um 2,3 %. Geht man zu Szenario Straße 1 **N+G+BHKW** (mit Energietransport zwischen den Gebäuden) über, können die Kosteneinsparungen insgesamt auf 2,6 % erhöht werden. In diesem Fall ist die Kosteneinsparung durch die höhere Auslastung der Nachfragen (mehr als Verdopplung der Auslastung der Stromnachfrage) größer als die Kosten, die durch die Transportverluste der Wärmeleitung im Nahversorgungsnetz anfallen (ca. 250 €/a für Straße 1 bzw. ca. 630 €/a für Straße 2). Bei Straße 2 lassen sich die Volllaststunden der Stromnachfrage von Straße 2a auf 2 von ca. 3000 h/a auf 4000 h/a steigern. Die Kapazität des installierten BHKW erhöht sich dadurch von 99,4 kWh [21] für die Summe aller in Szenario Straße 2a installierten BHKW-Kapazitäten geringfügig auf 101,6 kW [22] bei Szenario Straße 2. Die durch das BHKW erzeugte elektrische Energie erhöht sich von 150 MWh_{el} auf 157 MWh_{el} für das simulierte Jahr. Die generierten Kosteneinsparungen, durch die größere vom BHKW bereitgestellte Energiemenge wird in etwa durch die Verluste der Wärmeverteilung im Szenario Straße 2 wieder egalisiert.

Dabei wurde jedoch in der Optimierung zwei Effekten nicht Rechnung getragen. Zum einen wurde nicht berücksichtigt, dass für die größeren BHKW-Kapazitäten im Allgemeinen die angenommenen Installationskosten als zu groß anzusehen sind. Demgegenüber sind keine Installationskosten für die Nahversorgungsnetze berücksichtigt worden.

[20] ausschließlich der Szenarien Straße 1a und 2a, da im Allgemeinen jedes Einzelgebäude mit einem Netzanschluss ausgestattet ist und dieses auch für den Prozess Gasheizung vorausgesetzt wurde

[21] entspricht 28,9 kW_{el}

[22] entspricht 29,5 kW_{el}

Die Erhöhung der Auslastung, vor allem der Stromnachfragen hat zur Folge, dass ein größerer Anteil der Wärme- und Stromnachfrage vom BHKW gedeckt werden kann (siehe Tabelle 8.6 und Abbildung 8.25).

Szenario	Auslastung der Stromnachfrage [h/a]	Anteil Wärme [%]	Anteil Strom [%]
EFH	1406	11.3	33.5
ZFH	1694	13.3	37.1
MFH3	1942	14.6	44.9
MFH6	2080	18.0	45.7
MFH12	3041	26.5	52.8
MFH26	2936	32.1	57.1
Straße 1	3506	17.3	51.3
Straße 2	3941	31.4	58.5

Tabelle 8.6.: Auslastung der Stromnachfrage und Anteil der vom BHKW erzeugten Wärme und Strom am Jahreswärme- bzw. Jahresstrombedarf.

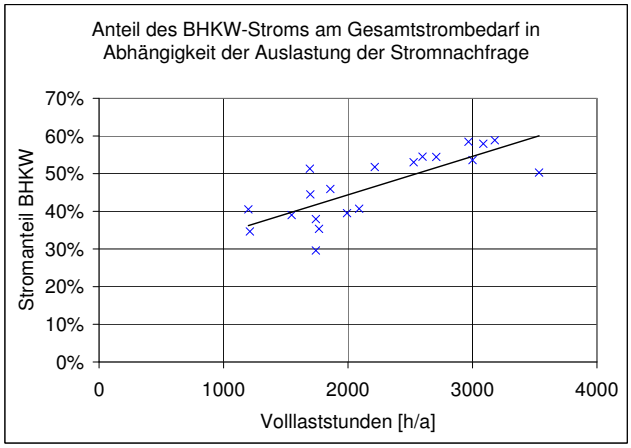


Abbildung 8.25.: vom BHKW erbrachter Anteil zum gesamten Strombedarf der einzelnen Nachfragen in Abhängigkeit der Auslastung der Nachfragekurven nach Strom und linearer Trend.

Um die installierte Kapazität der verschiedenen Gebäudegrößen deuten zu können wurde diese zum Einen mit der Anzahl der im Gebäude (der Straße) lebenden Personen und zum Anderen mit der Wohnfläche der Gebäude skaliert. Dabei ergeben sich für kleine Gebäude (EFH, ZFH, MFH3 und MFH6) und auch für Straße 1, welche aus neun kleinen Gebäuden besteht, BHKW-Kapazitäten von ca. 0,10 kW_{el} pro Bewohner. Demgegenüber liegt diese bei ca. 0,15 kW_{el} pro Bewohner für die Gebäude MFH12, MFH26 und Straße 2. Dies kann auf das günstigere Verhältnis von Wärme- zu Stromnachfrage der größeren Gebäudetypen zurückgeführt werden (vergleiche Tabelle 6.1).

Betrachtet man die Kapazität pro Wohnfläche ist der gleiche Effekt zu erkennen. Auch hier steigt die spezifische BHKW-Kapazität mit der Gebäudegröße von ca. 2,5 W_{el}/m^2 für kleine Gebäude auf ca. 4 W_{el}/m^2 an (siehe Abbildung 8.26). Im Vergleich dazu beträgt die Obergrenze für die Installation von Blockheizkraftwerken aus Kapitel 6.3 ca. 10 W_{el}/m^2.

Des Weiteren wurde für jeden der Repräsentanten einzeln errechnet welchen Anteil das BHKW zum Strom- bzw. Wärmebedarf leistet. Dabei fällt auf, dass der Anteil des BHKW-Stroms am Strom-

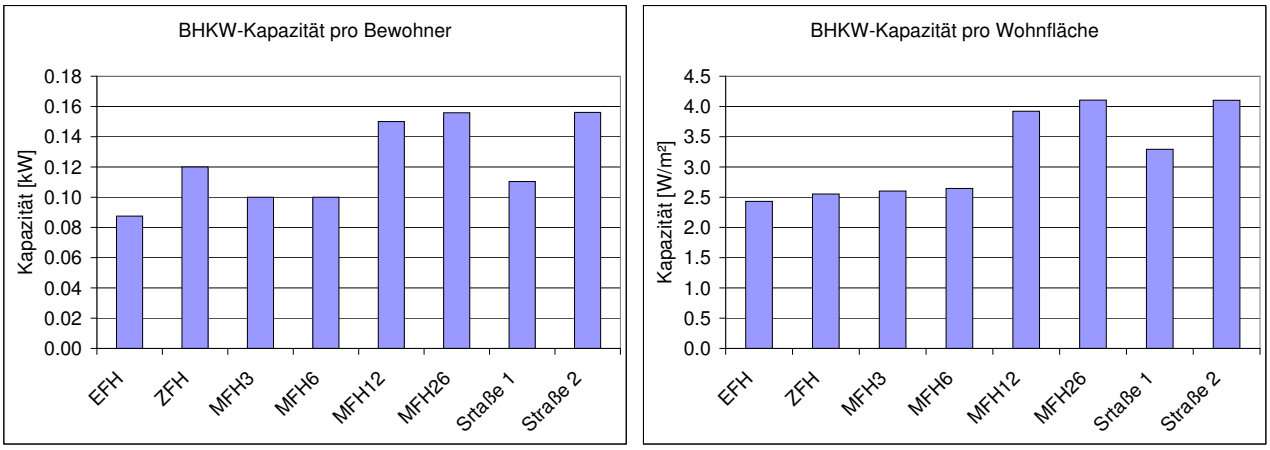


Abbildung 8.26.: spezifische Kapazität bezogen auf die Anzahl der Bewohner und die Wohnfläche.

bedarf an Sommertagen deutlich geringer ist als an Tagen mit Raumwärmebedarf (siehe Abbildung 8.27 *links*). Selbes gilt für die Auslastung der Blockheizkraftwerke (siehe Abbildung 8.28). Vergleicht man den Anteil der BHKW-Wärme am gesamten Wärmebedarf des jeweiligen Tages zeigt sich ein starker Anstieg dieser für Sommertage (siehe Abbildung 8.27 *rechts*). An diesen wird in den größeren Szenarien sämtliche Wärme durch das BHKW erbracht [23]. Dies lässt den Schluss zu, dass der sommerliche Wärmeverbrauch eine obere Schranke für den wirtschaftlichen Einsatz von Blockheizkraftwerken darstellt. Es wird aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten aufgrund einer Stromnachfrage keine Wärme produziert, die nicht verbraucht werden kann (vergleiche Tabelle 8.1).

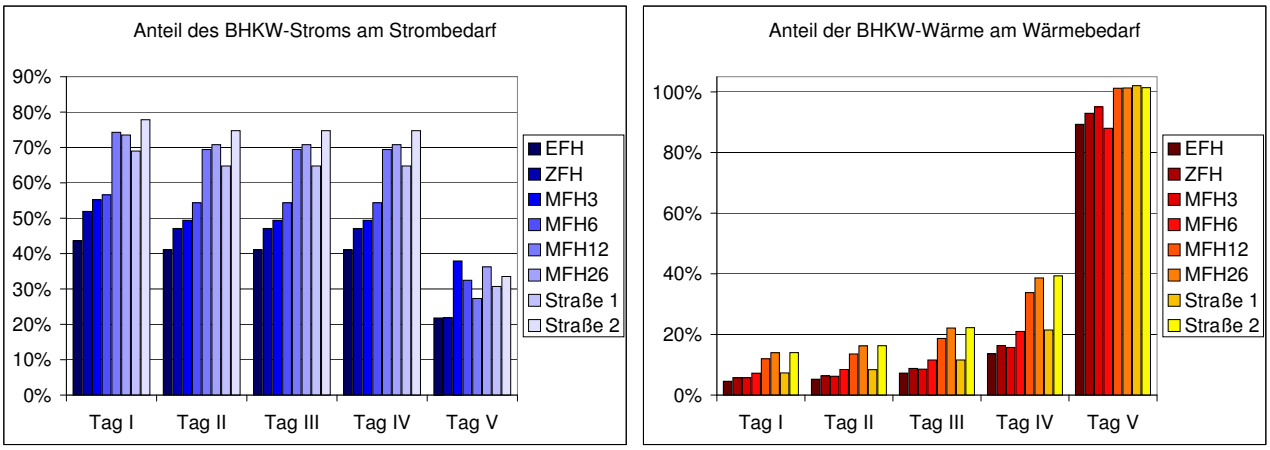


Abbildung 8.27.: *links:* Anteil des BHKW-Stroms am Strombedarf für jeden Typtag für die acht Szenarien; *rechts*: Anteil der BHKW-Wärme am Wärmebedarf.

Die höhere Auslastung des BHKW am Repräsentanten "kältester Tag" kommt durch den hohen Wärmebedarf an diesem Tag zustande (siehe z.B. Abbildung 8.16). Diesbezüglich ist die Nutzung von vorhandener BHKW-Kapazität bei Verkauf von überschüssig produziertem Strom kostengünstiger als die Installation zusätzlicher Gasheizungskapazität (vergleiche Abbildung 8.24).

Durch die Ersetzung von Strom aus einem Netzanschluss und Wärme aus einer Gasheizung durch

[23] Dabei kommen Anteile von über 100 % am Wärmebedarf aufgrund von Energieverlusten von Wärmespeicherung und -transport zustande.

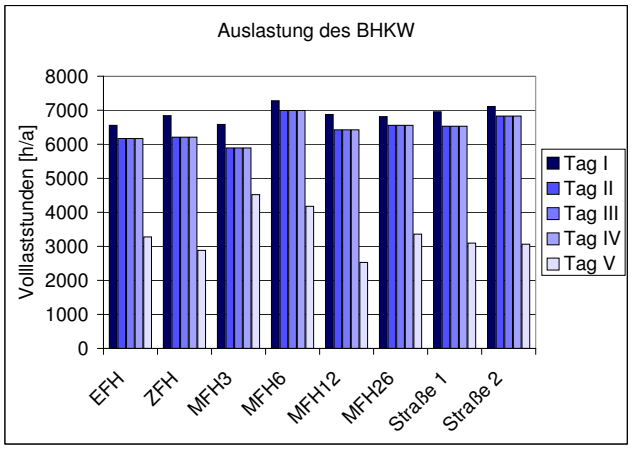


Abbildung 8.28.: Auslastung der BHKW's an den verschiedenen Tagen. Dabei wird auch hier die Auslastung zu einer besseren Vergleichbarkeit der Werte in Volllaststunden angegeben.

BHKW-Strom und -Wärme können, wie in Kapitel 6 gezeigt neben Kosten auch CO_2-Emissionen eingespart werden. Die Einsparungen für die kostenoptimierten Szenarien sind in Tabelle 8.7 zusammengetragen. Hier gilt ebenso, dass mit steigender Gebäudegröße auch die relative Emissionseinsparung ansteigt.

Szenario	N+G [kg CO_2 / a]	N+G+BHKW [kg CO_2 / a]	CO_2-Minderung [kg CO_2 / a]	CO_2-Minderung [%]
EFH	9185	8709	476	5.2
ZFH	13336	12535	800	6.0
MFH3	15027	14014	1014	6.7
MFH6	22325	20565	1760	7.9
MFH12	37788	33775	4013	10.6
MFH26	79132	69423	9708	12.3
Straße 1	113342	104268	9073	8.0
Straße 2	352574	309297	43278	12.3
Straße 1a	113342	104268	9073	8.0
Straße 2a	352574	309297	43278	12.3

Tabelle 8.7.: CO_2-Emission der verschiedenen Szenarien mit den Versorgungsvarianten **N+G** und **N+G+BHKW** im Vergleich.

Insgesamt ist ein deutlicher Einfluss der Gebäudegröße auf die installierte Kapazität eines BHKW zu erkennen. Mit steigender Größe der Gebäude nimmt sowohl das Potential zur Kosten- wie auch zur CO_2-Einsparung zu. Dies erklärt sich durch die Erhöhung der Auslastung der Strom- und Wärmenachfrage (siehe Abbildung 8.20 und Kapitel 7.1.1), da bei gleicher Auslastung des BHKW ein höherer Anteil am Energiebedarf der Gebäude gedeckt werden kann.

Der Zusammenschluss von mehreren großen Gebäuden zu Straßen [24] bringt (aus Sicht der linearen Optimierung die mit konstanten Installationskosten pro Prozesskapazität arbeitet) keine nennenswerten Vorteile. Die Deckung von Nachfragen mehrerer kleiner Gebäude [25] birgt aufgrund der Erhöhung der

[24] Straße 2
[25] Straße 1

Auslastung der Nachfragen Vorteile zu den Einzelszenarien. Jedoch ergeben sich hier andere Nachteile, wie beispielsweise die Aufteilung der Kosten auf die Nachfrager. Darüber hinaus wurden in den obigen Berechnungen keine Installations- und Instandhaltungskosten der Nahversorgungsnetze veranschlagt. Aus diesen Gründen wurden im weiteren Verlauf auf eine Optimierung von Straßen verzichtet.

8.3. Einfluss des Dämmstandards der Gebäude

Bisher wurde in sämtlichen Modellen vom Dämmstandard (ii) ausgegangen. Der daraus resultierende spezifische Raumwärmebedarf für die Gebäude ist in Abbildung 7.17 *rechts* zu sehen. In diesem Kapitel soll veranschaulicht werden, welchen Einfluss dieser Raumwärmebedarf auf die Kapazität und die Auslastung von Blockheizkraftwerken hat. Dazu wurden die Modelle EFH, MFH6 und MFH26 mit der Möglichkeit zur Ausstattung mit den Prozessen Gasheizung, Netzanschluss und BHKW und den Dämmstandard (i0), (i), (ii) und (iii) versehen und anschließend optimiert [26].

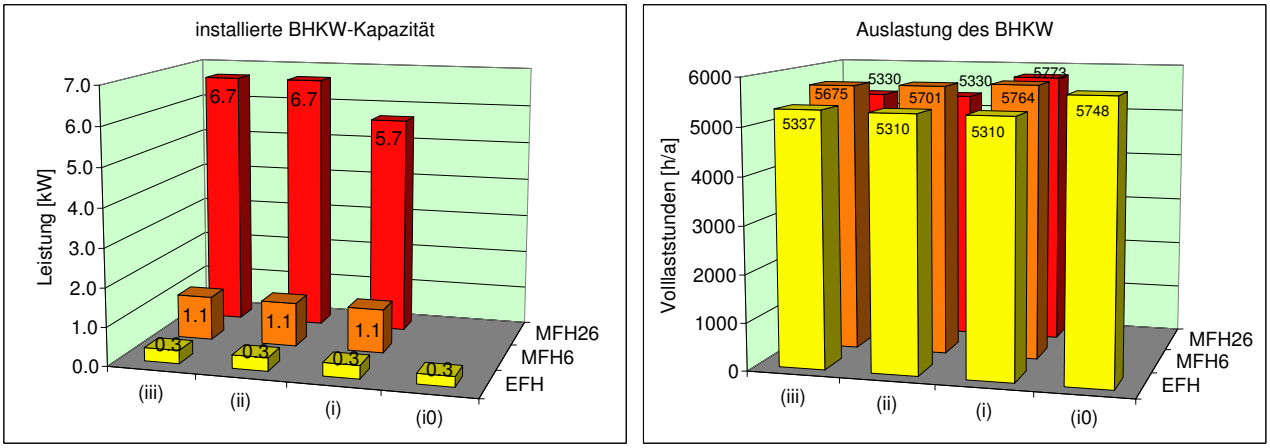


Abbildung 8.29.: *links:* installierte BHKW-Kapazität in kW_{el} (elektrischer Leistung) für die Gebäude EFH, MFH6 und MFH26 in Abhängigkeit vom Dämmstandard; *rechts:* Auslastung des Blockheizkraftwerks für die verschiedenen Dämmstandards.

Hier ergibt sich für die Gebäude EFH und MFH6 nur eine sehr geringe Abhängigkeit der installierten BHKW-Kapazität vom Raumwärmebedarf (siehe Abbildung 8.29 *links* und Tabelle 8.8). Für das Gebäude MFH26 wird bei hohem Dämmstandard (i) und dementsprechend niedrigem Raumwärmebedarf eine geringere BHKW-Kapazität installiert als bei geringeren Dämmstandards. Dabei ist zu beobachten, dass bei den drei Gebäudemodellen jeweils bei der Variante mit dem geringsten Raumwärmebedarf das BHKW die größte Auslastung erreicht (siehe Abbildung 8.29 *rechts*).

Der Anteil der vom BHKW zum Strombedarf eines Jahres beigesteuerten elektrischen Energie sinkt anhand der Modellrechnungen mit steigendem Dämmstandard geringfügig ab (siehe Tabelle 8.8). Der Anteil der BHKW-Wärme erhöht sich dagegen stark mit steigendem Dämmstandard. Dies ist durch den größeren Raumwärmebedarf bei gleich bleibender BHKW-Kapazität begründet. Die verstärkte

[26] für Dämmstandard (i0) wurde die Raumwärmenachfrage für das Gebäude EFH bei Dämmstandard (i) um den Faktor 4 verringert. Dadurch wurde für das Einfamilienhaus der Passivhausstandard für den Heizwärmebedarf erreicht.

Szenario	Kapazität BHKW [kW_{el}]	Kapazität Gas-heizung [kW]	Anteil am Wärmebedarf [%]	Anteil am Strombedarf [%]
EFH (i0)	0.27	0.6	49.6	29.2
EFH (i)	0.34	2.3	21.0	33.5
EFH (ii)	0.34	4.5	11.5	33.5
EFH (iii)	0.34	8.5	6.5	33.6
MFH6 (i)	1.1	4.9	31.5	46.1
MFH6 (ii)	1.1	9.6	18.4	45.7
MFH6 (iii)	1.1	17.5	10.9	45.6
MFH26 (i)	5.7	15.5	46.6	52.7
MFH26 (ii)	6.7	27.8	32.5	57.1
MFH26 (iii)	6.7	49.6	20.1	57.1

Tabelle 8.8.: Kapazitäten des BHKW und der Gasheizung und der Anteil der vom BHKW erbrachten Wärme und des Stroms am Wärme- bzw. Strombedarf der Gebäude

Raumwärmenachfrage bei geringerem Dämmstandard der Gebäude wird vorwiegend durch eine höhere Gasheizungskapazität abgefangen (vergleiche Abbildung 8.32 und Tabelle 8.8).

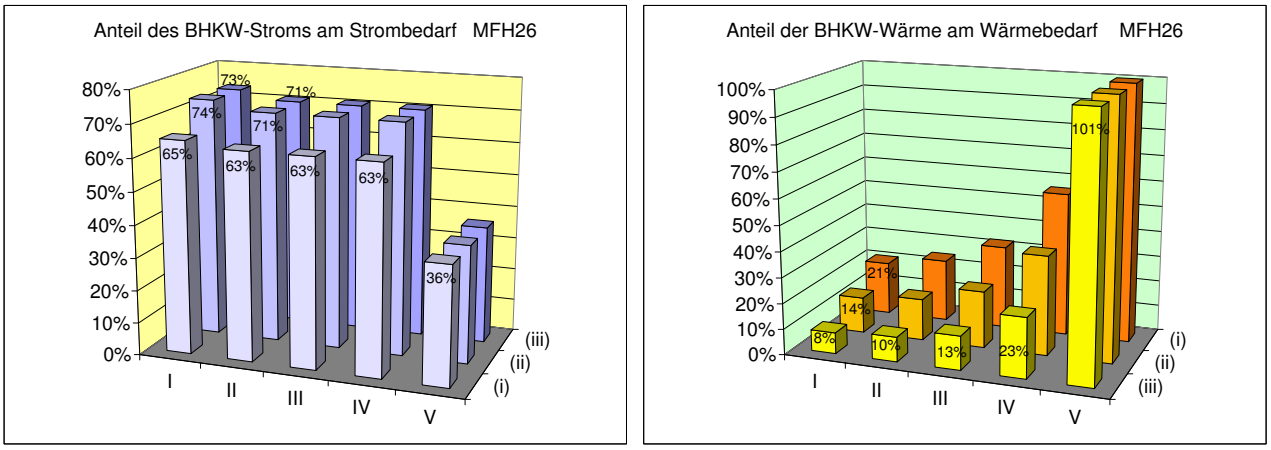


Abbildung 8.30.: *links:* Anteil des BHKW-Stroms am gesamten Strombedarf für die fünf Repräsentanten am Beispiel des Gebäudes MFH26 in Abhängigkeit des Dämmstandards; *rechts:* Anteil der BHKW-Wärme am gesamten Wärmebedarf für die fünf Repräsentanten am Beispiel des Gebäudes MFH26 in Abhängigkeit des Dämmstandards.

Am Typtag „Sommertag“ wird der gesamte Wärmebedarf nur durch die Warmwassernachfrage bestimmt und im Falle des MFH26 vollständig vom BHKW gedeckt (siehe Abbildung 8.29, vergleiche Abbildung 8.27). Dadurch ist der Anteil des vom BHKW erzeugten Stroms am gesamten Strombedarf dieses Tages durch die nachgefragte Warmwasserwärme bestimmt und somit vom Dämmstandard unbeeinflusst [27]. Der Anteil des BHKW-Stroms an Tagen mit Raumwärmenachfrage ist im Wesentlichen durch die BHKW-Kapazität beschränkt. Diesbezüglich kann aufgrund der geringeren installierten BHKW-Kapazität für Modellgebäude mit besserer Wärmedämmung ein kleinerer Anteil des Strombedarfs durch das BHKW erbracht werden (siehe Abbildung 8.31).

Selbes gilt für das Einfamiliengebäude (siehe Abbildung 8.33). Allerdings ist hier die BHKW-Kapazität

[27] da kein Strom produziert wird dessen Wärme nicht verbraucht wird.

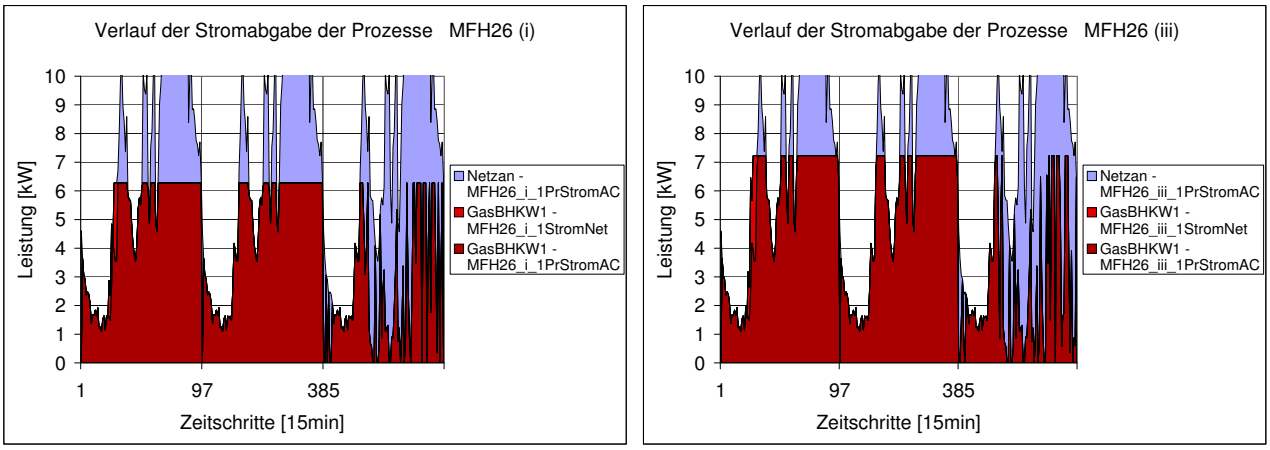


Abbildung 8.31.: links: Verlauf der Stromabgabe des BHKW und des Strombezugs aus dem Netz für das Gebäude MFH26 für Dämmstandard (i) (Nachfragevariante 1); rechts: Verlauf der Stromabgabe des BHKW und des Strombezugs aus dem Netz für das Gebäude MFH26 für Dämmstandard (iii) (Nachfragevariante 1)

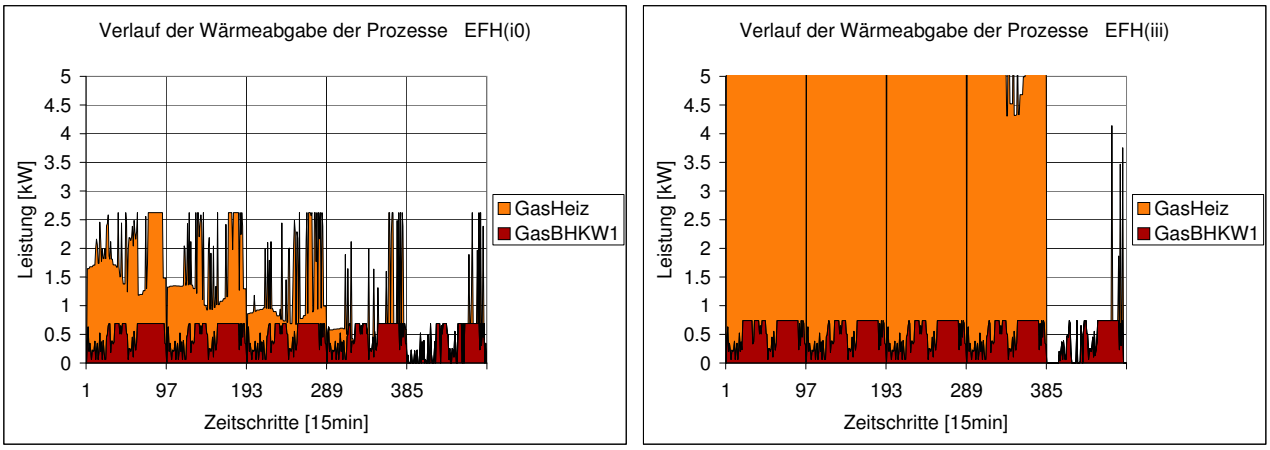


Abbildung 8.32.: *links:* Verlauf des Wärmeangebots des BHKW und der Gasheizung für das Einfamilienhaus der Nachfragevariante 1 bei bestem Dämmstandard (Passivhausstandard) für die fünf Repräsentanten ; *rechts:* Dämmstandard (iii).

für die Variante mit kleinstem Raumwärmebedarf nur geringfügig niedriger. Die Fahrweise für die Deckung der Wärmenachfrage ist in Abbildung 8.32 zu sehen. Dabei wird die sommerliche Wärmenachfrage vom BHKW zu einem Anteil von ca. 90 % gedeckt. Der Raumwärmebedarf der Repräsentanten I bis IV wird zu einem großen Teil von einer Gasheizung erbracht.

Geht man davon aus, dass die, von einem BHKW erzeugte Wärme in erster Linie zur Deckung der Warmwassernachfrage genutzt wird und die übrige Wärme einen Teil zum Raumwärmebedarf beiträgt kann bestimmt werden, zu welchen Teilen die BHKW-Wärme zur Bereitstellung der Warmwasserwärme verbraucht wird. Diese Anteile sind in Tabelle 8.9 zusammengefasst.

Es zeigt sich, dass die BHKW-Wärme einen, vom Dämmstandard nahezu unabhängigen Teil zur Warmwasseraufbereitung beiträgt. Berechnet man den Anteil der Raumwärme, die von der Gasheizung zur Verfügung gestellt wird, zeigt sich, dass der Großteil der Raumwärme von dieser erbracht wird (siehe Tabelle 8.10).

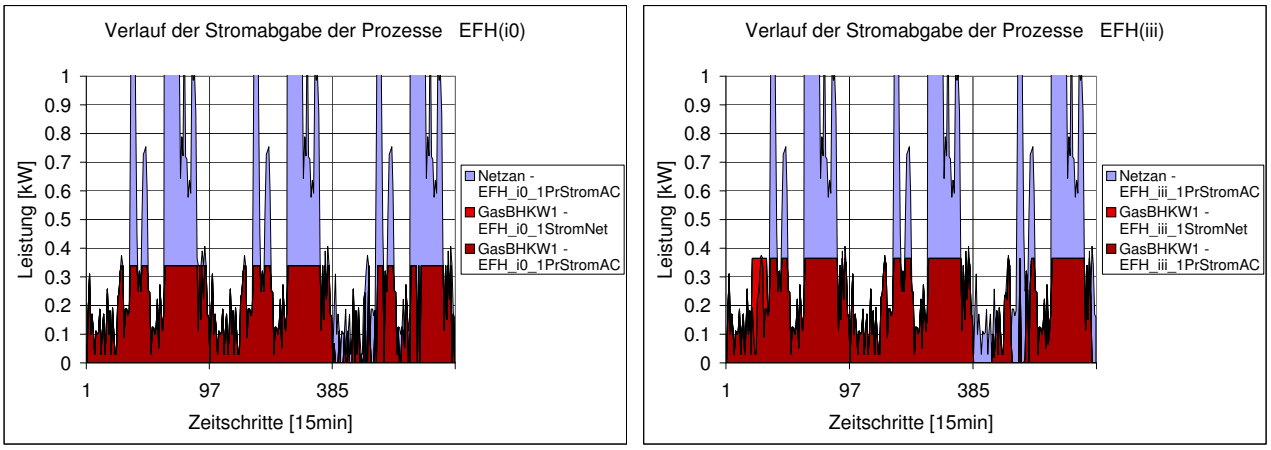


Abbildung 8.33.: *links:* Verlauf des BHKW- und Netzstroms des Einfamilienhauses der Nachfragevariante 1 bei bestem Dämmstandard (Passivhausstandard) für die drei Repräsentanten I, II und V (kältester Tag, Kaltwintertag und Sommertag). Für die Repräsentantern III und IV (Wintertag und Übergangstag) ergab sich die gleiche Fahrweise wie für Repräsentant II; *rechts:* Dämmstandard (iii).

	EFH	MFH6	MFH26
(i0)	83.6	-	-
(i)	73.0	80.0	67.9
(ii)	73.0	80.7	62.6
(iii)	72.6	80.9	62.6

Tabelle 8.9.: jährlicher Anteil der Wärmemenge des BHKW die zur Warmwasseraufbereitung genutzt wird.

Dämmstandard	EFH	MFH6	MFH26
(i0)	87.1	-	-
(i)	92.6	90.9	77.5
(ii)	95.7	94.9	83.9
(iii)	97.1	96.7	90.5

Tabelle 8.10.: jährlicher Anteil der Wärmemenge der Gasheizung am Raumwärmebedarf.

Insgesamt lässt sich nur ein untergeordneter Einfluss der Raumwärmenachfrage auf die Größe der installierten BHKW-Kapazität und dem, vom BHKW beigesteuerten Strom am Strombedarf erkennen. Dabei verringert sich die kostenoptimale Kapazität des Blockheizkraftwerks für Gebäude mit sehr gutem Dämmstandard geringfügig. Allerdings erhöht sich die Auslastung der Blockheizkraftwerke in diesem Fall. Weiter zeigt sich, dass die BHKW-Wärme in den optimierten Szenarien im Größenordnungsbereich des Jahresbedarfs an Wärme für die Aufbereitung des warmen Wassers liegt [28]. Der Raumwärmebedarf wird zum größten Teil durch die Gasheizung gestillt.

[28] BHKW-Wärme entspricht in etwa 1,5 mal der Warmwassernachfrage.

8.4. Einfluss der Warmwassernachfrage

Durch die Erkenntnis, dass die Raumwärmenachfrage nur eine untergeordnete Rolle für die kostenoptimale BHKW-Kapazität und -Auslastung spielt, wurde, anhand der Gebäudemodelle EFH (i), MFH6 (i), MFH26 (i) und MFH26 (ii) untersucht, in wie weit die Warmwassernachfrage einen Einfluss auf die, von der Optimierung installierte Kapazität eines Blockheizkraftwerks hat. Dazu wurden für die Gebäude die Warmwassernachfragen zu den ursprünglichen „normalen“ Nachfragen aus Kapitel 8.2 je um 33 % bzw. um 100 % erhöht.

Der durchschnittliche Anteil des Energiebedarfs zur Warmwassererzeugung am gesamten Wärmebedarf erhöhte sich bei den gerechneten Szenarien für doppelten Warmwasserbedarf für das Einfamilienhaus auf 26 %, für das Mehrfamilienhaus 26 auf bis zu 48 % (siehe Tabelle 8.11). Dabei zeigt sich grob der Trend, dass mit steigender Warmwassernachfrage auch die Produktion von BHKW-Strom ansteigt (siehe Abbildung 8.34).

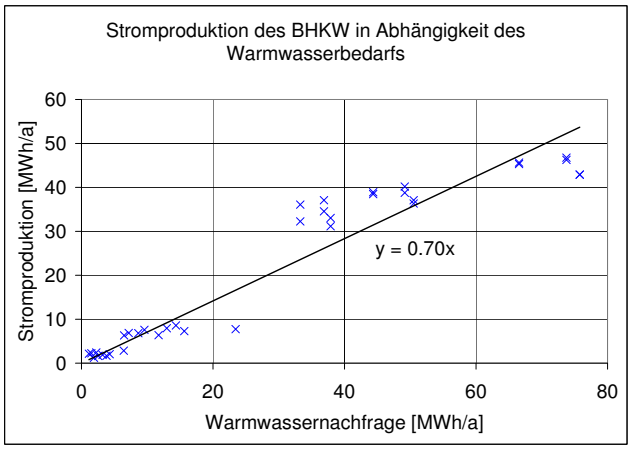


Abbildung 8.34.: kostenoptimale Stromproduktion des BHKW der gerechneten Szenarien in Abhängigkeit der Warmwassernachfrage der Bewohner. Als linearer Trend lässt sich eine Stromproduktion von 0,7 kWh pro nachgefragter kWh warmes Wasser erkennen.

Für den Anteil des Strombedarfs am Gesamtenergiebedarf ergeben sich die Werte wie in Tabelle 8.12 dargestellt. Dabei wurde der Sommerfall gesondert berücksichtigt. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen dem Sommerfall und den Tagen mit Raumwärmebedarf (I - IV). Am Sommertag ist die Nachfrage nach elektrischer Energie größer als nach Wärme [29]. Im Gegensatz dominiert an den anderen Tagen der Wärmebedarf. Für steigenden Warmwasserbedarf und sinkenden Raumwärmebedarf verringern sich diese Unterschiede.

Es konnte sowohl beim Ein-, als auch bei den Mehrfamilienhäusern der Effekt beobachtet werden, dass sich die Steigerung der Warmwassernachfrage günstig auf den, von einem BHKW bereitgestellten Anteil an Strom und Wärme auswirkt. Beim Einfamilienhaus erhöht sich der Anteil des vom BHKW erzeugten Stromes bei Verdopplung der Warmwassernachfrage von 33,5 % auf 44,1 %. Beim Mehrfamilienhaus (MFH26 (i)) kann dieser Anteil von 53 % auf bis zu 72 % bei doppelter Warm-

[29] in Form von warmem Wasser.

Szenario	Anteil Warmwasser am Wärmebedarf [%]	Anteil BHKW am Wärmebedarf [%]	Anteil BHKW am Strombedarf [%]
EFH (i)			
„normal“	15.2	18.4	33.5
WW +33 %	19.3	19.7	37.7
WW +100 %	26.4	21.0	44.1
MFH6 (i)			
„normal“	25.1	27.6	46.1
WW +33 %	30.8	28.2	51.2
WW +100 %	40.1	27.4	57.3
MFH26 (i)			
„normal“	31.5	40.8	52.7
WW +33 %	38.0	42.8	61.1
WW +100 %	47.9	42.6	72.4
MFH26 (ii)			
„normal“	20.2	28.4	57.1
WW +33 %	25.2	29.1	62.5
WW +100 %	33.6	30.1	72.8

Tabelle 8.11.: Anteil des Warmwasserbedarf und der vom BHKW zur Verfügung gestellten Wärme am gesamten Wärmebedarf, sowie der Anteil des BHKW-Stroms am gesamten Strombedarf.

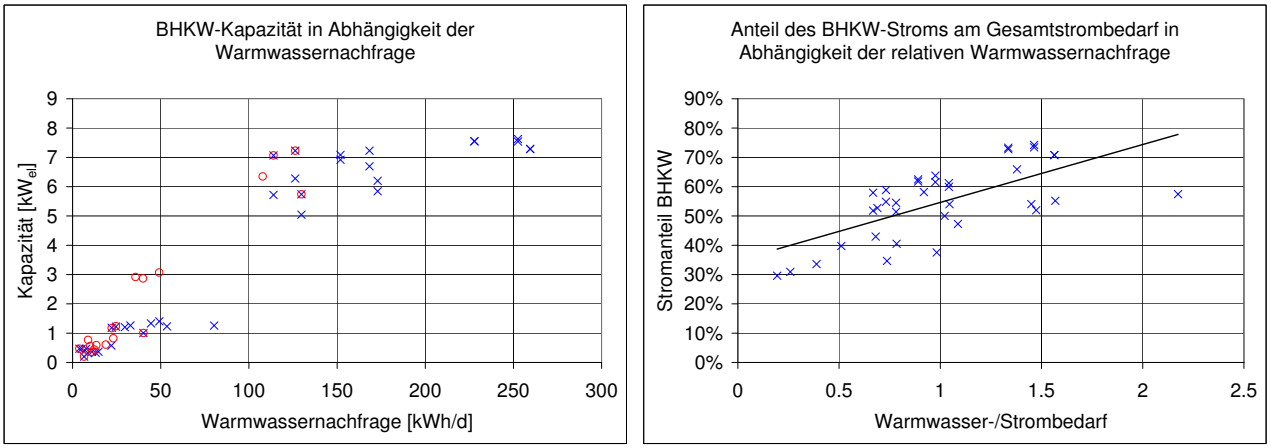


Abbildung 8.35.: *links:* installierte BHKW-Kapazität (elektrisch) in Abhängigkeit der Warmwassernachfrage in kWh pro Tag. Dabei sind sowohl die Daten dieses Kapitels (blaue Kreuze) als auch die des Kapitels über die Gebäudegröße (rote Kreise) verwendet worden; *rechts:* Anteil des vom BHKW erzeugten Stromes am Gesamtstrombedarf in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Warmwasser- und Stromnachfrage.

wassernachfrage [30] gesteigert werden. Der Anteil der BHKW-Wärme nimmt ebenfalls mit steigender Warmwassernachfrage für alle Szenarien zu, allerdings nur in sehr viel geringerem Maßstab wie bei der Stromversorgung (siehe Tabelle 8.11).

Bei höherer Warmwassernachfrage erhöht sich die von der Optimierung installierte Kapazität des BHKW (siehe Abbildung 8.36). Dabei ergibt sich für die Blockheizkraftwerke der Mehrfamilienhäuser mit steigender Warmwassernachfrage eine Steigerung der Auslastung. Für das Einfamilienhaus hinge-

[30] 61 % bei um 33 % erhöhter Warmwassernachfrage

Anteil Strom an Gesamtenergie [%]	„normal“	WW + 33 %	WW + 100 %
EFH (i)			
Tag I - IV	18.0	17.5	16.5
Tag V	66.9	60.2	50.2
MFH6 (i)			
Tag I - IV	19.7	18.7	17.0
Tag V	57.2	50.0	40.0
MFH26 (i)			
Tag I - IV	24.3	22.9	20.5
Tag V	57.9	50.8	40.8
MFH26 (ii)			
Tag I - IV	16.5	15.9	14.7
Tag V	57.9	50.8	40.8

Tabelle 8.12.: Anteil des Strombedarfs am Gesamtenergiebedarf für die Tage mit Raumwärmebedarf (Repräsentanten I - IV) und für den Sommertag (Repräsentant V) in Prozent.

gen verringert sich die Auslastung des BHKW mit steigender Warmwassernachfrage (siehe Abbildung 8.37 *links*).

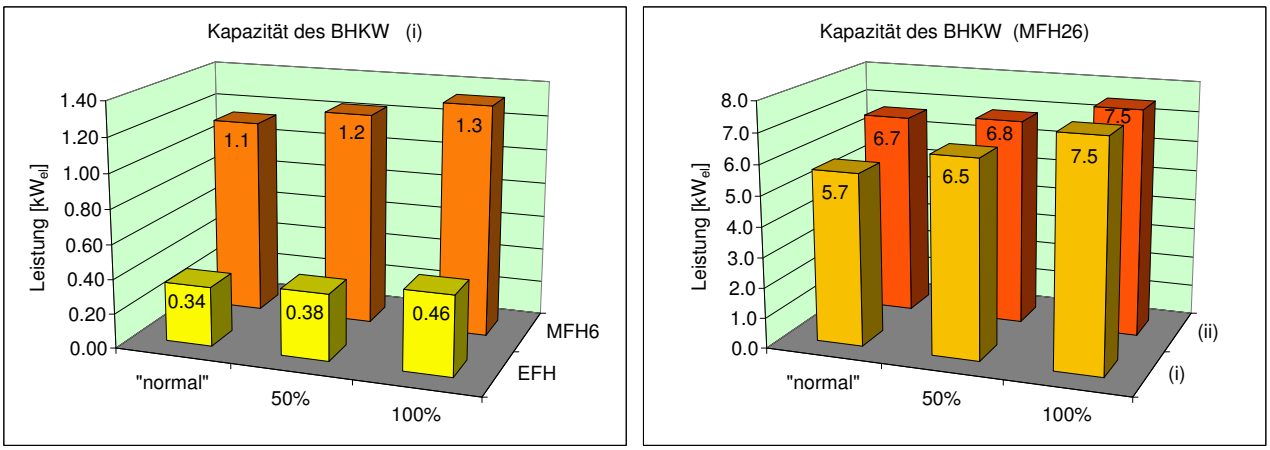


Abbildung 8.36.: *links:* Kapazitäten in elektrischer Leistung der Blockheizkraftwerkinstallation für eine „normale“, um 33 % und um 100 % erhöhte Warmwassernachfrage für die Gebäude EFH und MFH6 für den Dämmstandard (i); *rechts:* BHKW-Kapazität [kW_{el}] für das Mehrfamilienhaus 26 mit Dämmstandard (i) bzw. (ii).

Durch die Erhöhung der Warmwassernachfrage kann im Sommerfall mehr Strom durch das BHKW bereitgestellt werden, da dessen Wärme verbraucht wird. Dadurch erhöht sich bei gleich bleibender Kapazität die Auslastung des Blockheizkraftwerks am Sommertag (Typtag V) und somit über das ganze Modelljahr. Durch diese veränderte Deckung der Nachfrage im Sommerfall verringert sich die Auslastung der Rest-Stromnachfrage die durch den Netzanschluss gedeckt werden müsste [31]. Von dieser Restnachfrage wird jedoch durch die Optimierung in den meisten Modellrechnungen ein weiterer Teil kostengünstiger durch eine zusätzliche BHKW-Kapazität gedeckt als durch den Netzanschluss (und einer Gasheizung). Durch diese zusätzliche Kapazität verringert sich die Auslastung des BHKW wieder.

[31] da durch das BHKW aufgrund dessen hoher Installationskosten die Grundlast der Stromnachfrage gedeckt wird

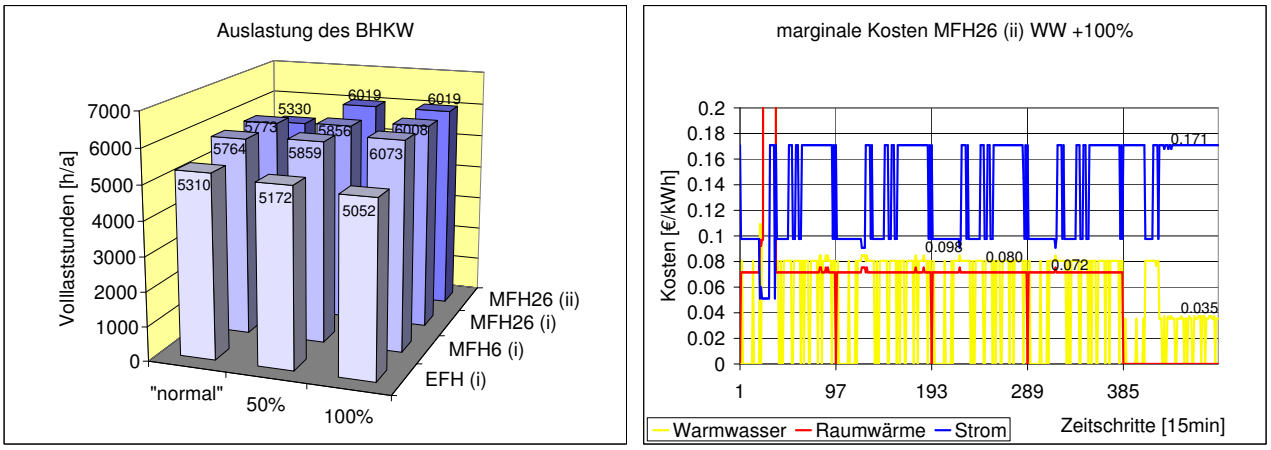


Abbildung 8.37.: *links:* Auslastung der installierten Blockheizkraftwerke für die drei Warmwassernachfragen; *rechts:* marginale Kosten für Strom-, Raumwärme- und Warmwassernachfrage für das Gebäude MFH26 (ii) bei um 100 % erhöhter Warmwassernachfrage.

Aufgrund der schlechter werdenden Auslastung der Rest-Stromnachfrage ist der kostenoptimalen BHKW-Kapazität eine obere Schranke gegeben (vergleiche Kapitel 6).

Für das Mehrfamilienhaus 26 nähert sich der Anteil der vom BHKW erbrachten elektrischen Energie des Typtags V aus oben genannten Gründen [32] dem der anderen Tage an (siehe Tabelle 8.13 und Abbildung 8.39).

MFH26 (ii)	„normal“	WW + 33 %	WW + 100 %
I	73.5	75.2	80.5
II	70.8	71.9	75.8
III	70.8	71.9	75.8
IV	70.8	71.9	75.8
V	36.2	48.2	68.2

Tabelle 8.13.: durchschnittlicher Anteil des BHKW-Stroms am Strombedarf des Modellgebäudes MFH26 (ii) für die fünf Repräsentanten in Abhängigkeit der Warmwassernachfrage.

Beim Modell des Einfamilienhauses zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der installierten Kapazitäten und Fahrweisen von den drei generierten Nachfragekurven. In Tabelle 8.14 sind die durchschnittlichen Anteile des BHKW-Stroms am Strombedarf für die fünf Typtage zusammengefasst. Es zeigt sich auch hier, wie beim MFH26, dass sich der sommerliche Anteil des BHKW an der Stromnachfrage dem Anteil der anderen Repräsentanten annähert. Jedoch ergeben sich für die unterschiedlichen Nachfragekurven sehr unterschiedliche Fahrweisen (siehe Abbildung 8.41). Es ergibt sich für die Nachfrage 1, dass das BHKW an allen Tagen den gleichen Anteil zum Strombedarf beiträgt. Im Gegensatz wird bei Nachfrage 2 ein deutlich geringerer Anteil des sommerlichen Stromes vom BHKW erzeugt. Dies resultiert aus der geringen Warmwassernachfrage für diese Nachfragevariante (siehe Tabelle 8.2).

Da der Optimierung kein Anreiz gegeben wird die Kapazität des Netzanschluss zu verringern [33], verschlechtert sich die Auslastung des Netzanschlusses in den Modellen mit steigender Warmwasser-

[32] wegen der deutlich veränderten Wärmenachfrage im Sommerfall (siehe Abbildung 8.38)
[33] keine Installationskosten des Netzanschlusses

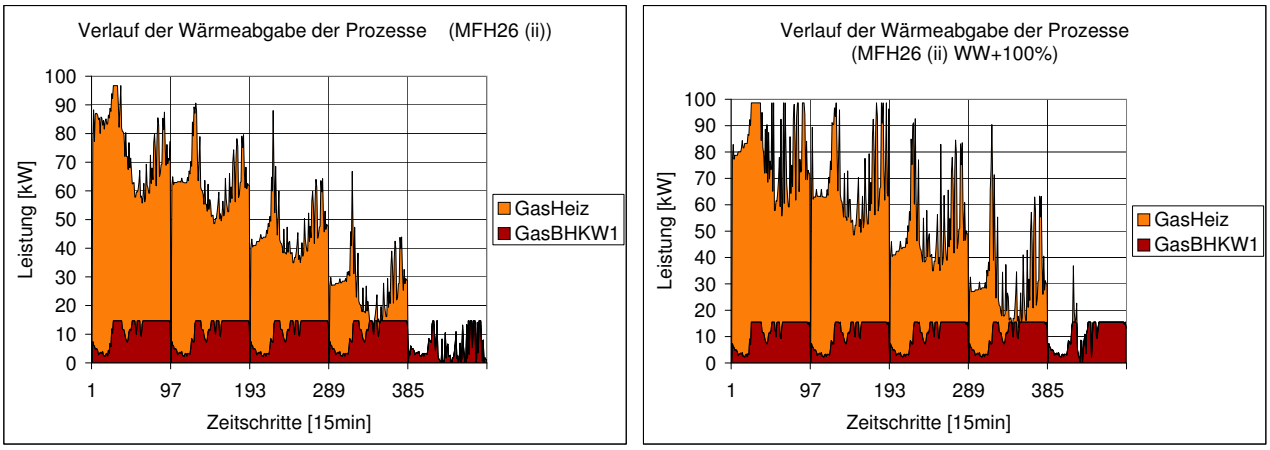


Abbildung 8.38.: *links:* Bereitstellung der nachgefragten Wärme durch die Prozesse Gasheizung und BHKW des MFH26 (Nachfrage 1) mit Dämmstandard (ii) bei der Warmwassernachfrage wie in Kapitel 8.2; *rechts:* Bereitstellung der Wärme bei verdoppelter Warmwassernachfrage.

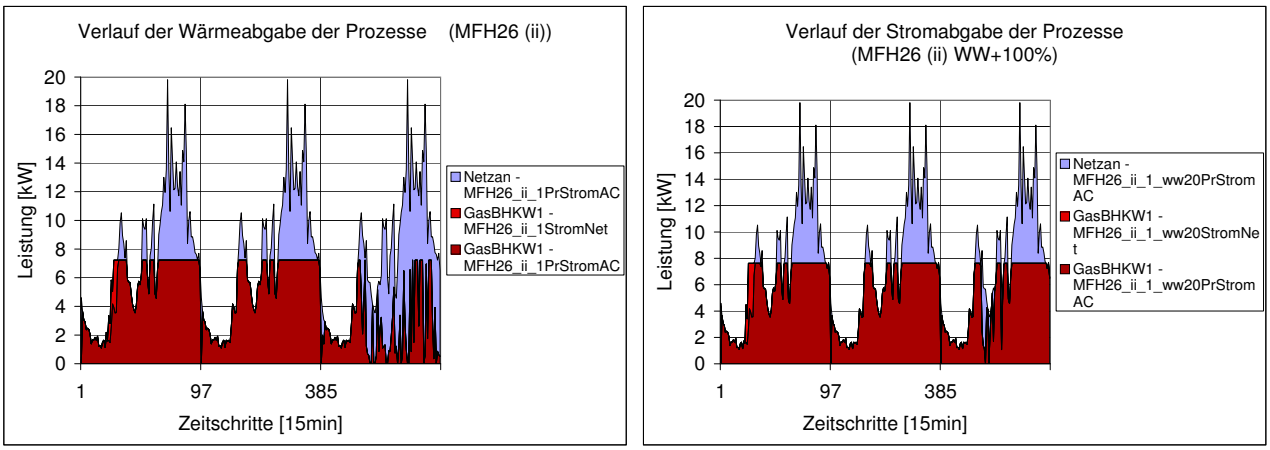


Abbildung 8.39.: *links:* Bereitstellung des nachgefragten elektrischen Stroms für die Repräsentanten I, II und V (III und IV entsprechen dem Verlauf von II) durch die Prozesse Netzanschluss und BHKW des MFH26 (Nachfrage 1) mit Dämmstandard (ii) bei der Warmwassernachfrage wie in Kapitel 8.2; *rechts:* Bereitstellung des Stroms bei verdoppelter Warmwassernachfrage (weinroter Anteil entspricht Stromverkauf).

EFH (i)	„normal“	WW + 33 %	WW + 100 %
I	45.4	48.5	51.2
II	41.1	43.7	48.2
III	41.1	43.7	48.2
IV	41.1	43.7	48.2
V	21.8	28.5	37.8

Tabelle 8.14.: Anteil des BHKW-Stroms am Strombedarf des Modellgebäudes EFH (i) für die fünf Repräsentanten in Abhängigkeit der Warmwassernachfrage.

nachfrage aufgrund der geringeren nachgefragten Menge an Netzstrom bei nahezu gleicher Kapazität (siehe Tabelle 8.15).

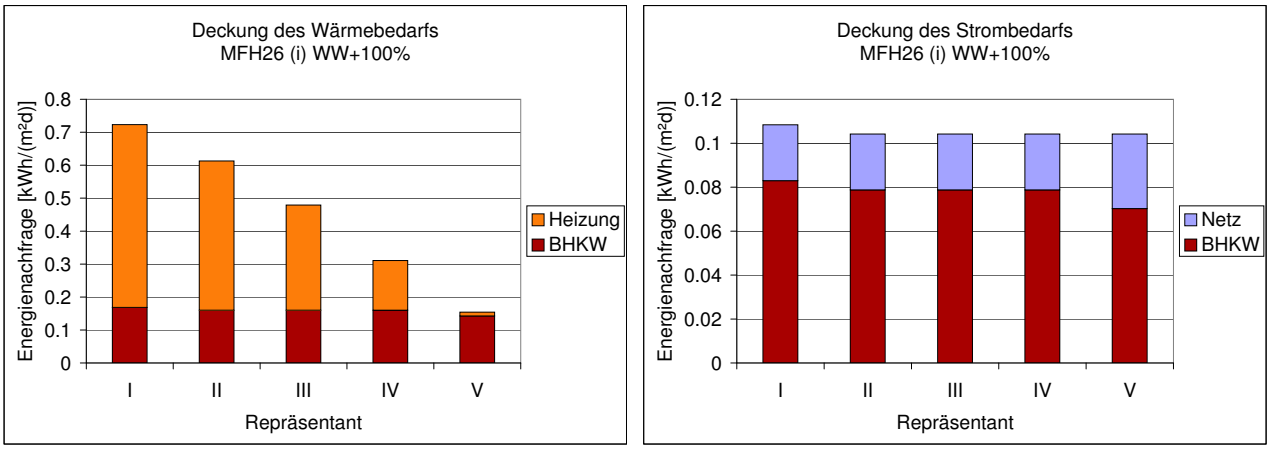


Abbildung 8.40.: *links:* Anteil der von der Gasheizung und vom BHKW erbrachten Wärmemenge pro Tag in Abhängigkeit des Typtags (vergleiche Abbildungen 6.18 *links* und 8.18 *links*); *rechts:* Anteil der vom Netzanschluss und vom BHKW erbrachten Strommenge pro Tag in Abhängigkeit des Typtags (vergleiche Abbildungen 6.18 *rechts* und 8.18 *rechts*).

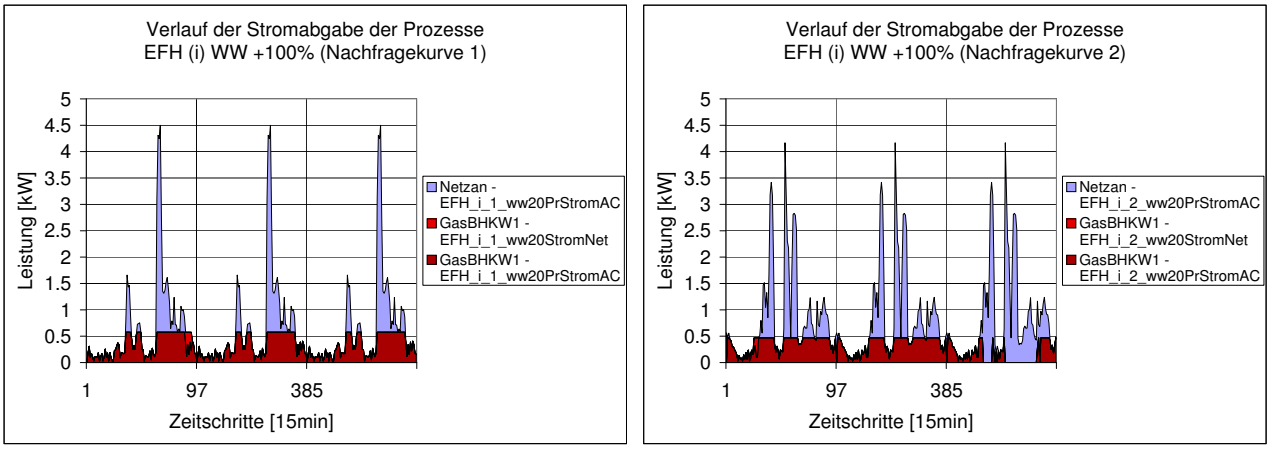


Abbildung 8.41.: *links:* Bereitstellung des nachgefragten Stroms für die Nachfragevariante 1 durch die Prozesse Netzanschluss und BHKW des EFH mit Dämmstandard (i) und einer doppelten Warmwassernachfrage wie in Kapitel 8.2; *rechts:* Bereitstellung des nachgefragten Stromes für Nachfragevariante 2 (Verkauf an den Netzbetreiber, weinroter Anteil).

Auslastung in [h/a]	EFH (i)	MFH6 (i)	MFH26 (ii)	MFH26 (i)
„normal“	946	1330	1403	1708
WW +33 %	886	1221	1457	1278
WW +100 %	814	1112	1251	1119

Tabelle 8.15.: Auslastung des elektrischen Netzanschlusses in Volllaststunden für die unterschiedlichen Warmwassernachfragen.

Der netto Strombezug aus dem Netz und der Strombedarf der Bewohner für die Gebäude MFH26 (ii) mit ursprünglichem und verdoppelten Warmwasserbedarf ist in Abbildung 8.42 zu sehen.

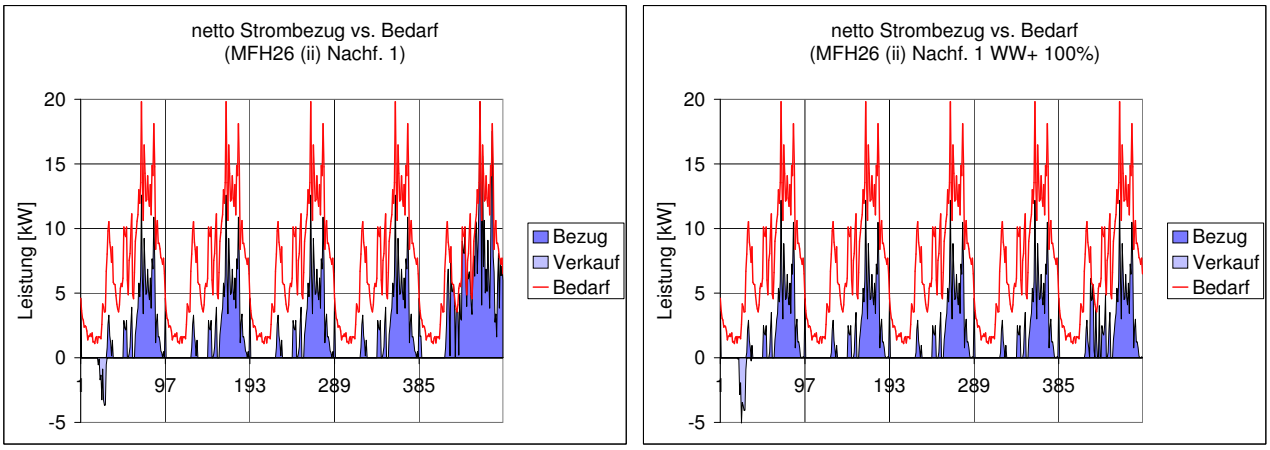


Abbildung 8.42.: *links:* Strombedarf der Bewohner und netto Strombezug aus dem Netz für das Gebäude MFH26 Dämmstandard (ii) und „normalen“ Warmwasserverbrauch (Nachfragekurve 1); *rechts:* Strombedarf und netto Strombezug für das Gebäude MFH26 Dämmstandard (ii) mit doppeltem Warmwasserverbrauch (Nachfragekurve 1).

Durch den zusätzlichen Energiebedarf für die gesteigerte Warmwassernachfrage fallen Mehrkosten an. Bezieht man diese Mehrkosten auf die zusätzliche Energiemenge ergeben sich deren spezifische Kosten (siehe Tabelle 8.16). Im Vergleich dazu liegen die Energiekosten der Warmwassernachfrage bei der Deckung mittels Gasheizung bei 8,0 Cent/kWh. Es zeigt sich, dass mit der Steigerung der Warmwassernachfrage die spezifischen Warmwasserkosten geringer werden.

Kosten Warmwasser [€/kWh]	EFH (i)	MFH6 (i)	MFH26 (ii)	MFH26 (i)
WW +33 %	7.2	6.4	5.8	5.8
WW +100 %	5.1	4.5	4.1	4.1

Tabelle 8.16.: spezifische Kosten der Szenarien pro kWh Warmwasser in Cent/kWh.

Ebenso wie die Gesamtkosten nehmen die CO_2-Emissionen der Szenarien mit der Erhöhung des Warmwasserverbrauchs zu (siehe Tabelle 8.17). Berechnet man die spezifische CO_2-Emission pro kWh Warmwassernachfrage ergeben sich für die Szenarien Werte, die gegenüber einer Emission von 0,26 kg CO_2/kWh von, mittels einer Gasheizung bereitgestelltem warmem Wasser, verringert sind (siehe Tabelle 8.18).

CO_2-Emission in [t/a]	EFH (i)	MFH6 (i)	MFH26 (ii)	MFH26 (i)
„normal“	17,6	43,6	208,3	162,2
WW +33 %	18,0	45,2	214,8	167,3
WW +100 %	18,8	48,9	228,2	180,2

Tabelle 8.17.: CO_2-Emission der Szenarien in t/a in Abhängigkeit der Warmwassernachfrage.

Insgesamt zeigt sich, dass aus wirtschaftlicher und ökologischer Sichtweise Blockheizkraftwerke in Gebäuden mit relativ hohem Warmwasserbedarf besser zur Deckung der Nachfrage eignen. Dies ist vor allem durch das, besser vom BHKW abzudeckende Verhältnis zwischen Strom- und Wärmenach-

CO_2-Emission in [kg/kWh]	EFH (i)	MFH6 (i)	MFH26 (ii)	MFH26 (i)
WW +33 %	0.14	0.15	0.15	0.11
WW +100 %	0.10	0.12	0.10	0.10

Tabelle 8.18.: spezifische CO_2-Emission für die zusätzliche Warmwassernachfrage.

frage im Sommerfall begründet. Jedoch verringert sich dadurch bei kostenoptimaler Fahrweise des Prozessparks die Auslastung der Netzanschlusses.

8.5. Einfluss eines Leistungspreises für Netzstrom

In den vorangegangenen Szenarien wurde durch die Optimierung stets ein Teil der Stromnachfrage durch das BHKW gedeckt. Aufgrund der hohen Installationskosten von Blockheizkraftwerken wird dieses bei möglichst hoher Auslastung betrieben. Somit wurde in allen Varianten ein Grundlastteil der Stromnachfrage durch das BHKW erbracht. Die Auslastung des Netzanschluss verringert sich dementsprechend.

Um dem entgegen zu wirken wurde im Folgenden versucht, anhand eines modifizierten Strompreises die Auslastung des Stromnetzes zu erhöhen. Aus diesem Grund wurden den Strompreisen, welche bis dato nur mit variablen Kosten belegt waren, Fixkosten zugewiesen. Dabei wurde so vorgegangen, dass die jährlichen Gesamtkosten bei einer Auslastung des Stromnetzes von 50 % (entspricht 4380 Volllaststunden) unverändert zum jetzigen Stromtarif sind. Weiter sollen sich bei dieser Auslastung die jährlichen Stromkosten zur Hälfte aus Energie- und zur Hälfte aus Fixkosten zusammensetzen. Dementsprechend ergeben sich Energiekosten von 0.085 €/kWh und Installationskosten von 374 €/kW.

Einheit	η %	$K_{Inst.Ges.}$ $\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$	t_L a	K_{Inst} $\frac{\text{Euro}}{\text{kW a}}$	K_{Var} $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$	CO_2 $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Netzanschluss 1	100	-	∞	374	0,085	0,55

Tabelle 8.19.: Stromkosten für die folgenden Szenarien.

Der Einfluss der Stromkosten wurde in diesem Kapitel anhand der Modellszenarien EFH (ii), MFH6 (ii) und MFH26 (ii) untersucht. Dabei wurden die Gebäude zunächst nur mit den Prozessen Netzanschluss 1 (siehe Tabelle 8.19) und einer Gasheizung ausgestattet (**N1+G**). Später wurde zusätzlich gestattet ein Blockheizkraftwerk zu installieren (**N1+G+BHKW**). Als Alternative wurde ebenso eine Variante optimiert, bei der statt dem BHKW ein Speicher für elektrische Energie (Bat) installiert werden kann (**N1+G+Bat**). Als letzte Ausstattungsvariante wurden sowohl die Installation des Blockheizkraftwerks als auch der Batterie ermöglicht (**N1+G+BHKW+Bat**). Die berechneten Kosten sind in Tabelle 8.20 aufgelistet, wobei das Szenario **N+G** mit den herkömmlichen Strompreisen als Referenz gegeben ist.

Die Gesamtkosten für die Deckung der Strom- und Wärmenachfrage steigen aufgrund der schlechten Auslastung der Stromnachfrage beim Wechsel zu den neuen Strompreisen deutlich an (siehe Tabelle

Szenario	EFH (ii)	MFH6 (ii)	MFH26 (ii)
N+G	3114	7485	26310
N1+G	4059	8812	28880
N1+G+BHKW	3618	8018	26613
N1+G+Bat	3624	8177	27415
N1+G+BHKW+Bat	3532	7915	26329

Tabelle 8.20.: durchschnittliche jährliche Gesamtkosten der Szenarien in €/a in Abhängigkeit der installierten Prozesse.

Szenario	EFH (ii)	MFH6 (ii)	MFH26 (ii)
N+G	1384	2126	2955
N1+G	1384	2126	2955
N1+G+BHKW	4987	6420	6804
N1+G+Bat	5551	5553	4886
N1+G+BHKW+Bat	6733	7637	7162

Tabelle 8.21.: durchschnittliche Auslastung des Netzanschlusses der Gebäude bei den unterschiedlichen Szenarien.

8.20). Am größten ist dieser Effekt für das EFH, da dieses die geringste Auslastung der Stromnachfrage aufweist (siehe Tabelle 8.21). Bietet man der Optimierung die Möglichkeit ein BHKW oder eine Batterie zu installieren, werden diese Prozesse zur Abdeckung der Spitzenlast-Stromnachfrage verwendet. Dadurch kann die Auslastung des Netzanschlusses deutlich gesteigert werden.

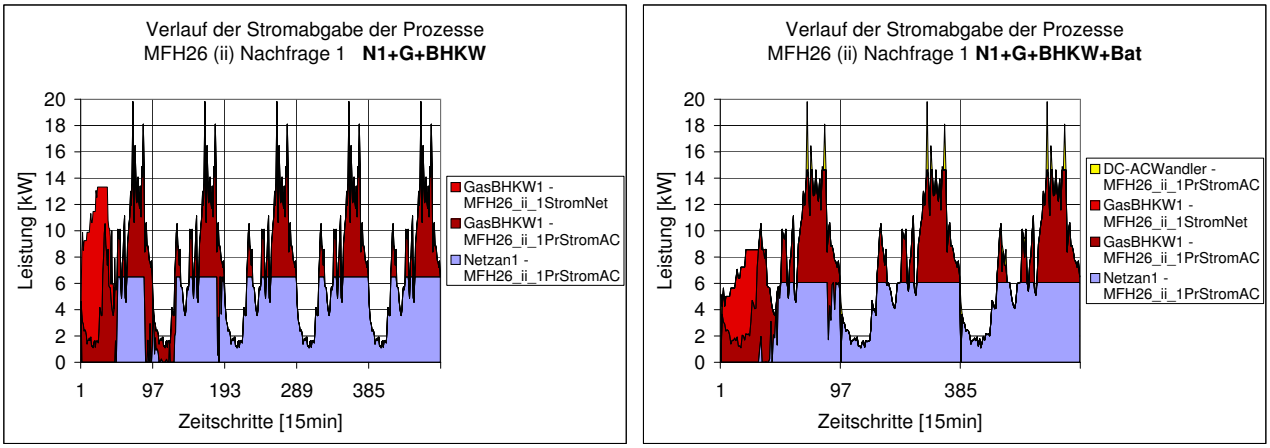


Abbildung 8.43.: Verlauf der Strombereitstellung durch das BHKW (weinroter Anteil entspricht ans Netz verkauften Strom) und einen Netzanschluss; *links:* ohne Batterie *rechts:* mit Batterie (Repräsentant I, II und V; Repräsentante III und IV entsprechen Repräsentant II.

In Tabelle 8.22 sind die spezifischen Energiekosten für Netzstrom aufgelistet. Es ist zu erkennen, dass bei einer „herkömmlichen“ Deckung der Nachfrage nach Strom mit elektrischer Energie aus dem Stromnetz die effektiven Strompreise für den neuen Tarif (Netzstrom 1) deutlich ansteigen. Unter zusätzlicher Verwendung von Batterien als Zwischenspeicher für elektrische Energie oder eines Blockheizkraftwerks zur Deckung der Spitzenlasten können diese effektiven Netzstrompreise gesenkt werden.

Szenario	EFH (ii)	MFH6 (ii)	MFH26 (ii)
N+G	17.1	17.1	17.1
N1+G	35.1	26.5	21.2
N1+G+BHKW	16.0	14.4	14.0
N1+G+Bat	15.1	15.2	16.2
N1+G+BHKW+Bat	14.1	13.5	13.7

Tabelle 8.22.: auf Energie bezogene Kosten für Strom für die verschiedenen Szenarien und Gebäude in Cent/kWh.

Szenario		EFH (ii)	MFH6 (ii)	MFH26 (ii)
N+G	[t CO_2/a]	27.6	67.0	23.7
N1+G	[%]	0.0	0.0	0.0
N1+G+BHKW	[%]	5.8	6.6	7.6
N1+G+Bat	[%]	-1.5	-0.9	-0.1
N1+G+BHKW+Bat	[%]	4.3	6.4	7.6

Tabelle 8.23.: CO_2-Emission des Szenarios **N+G** und die CO_2-Emissionminderung zu diesem Szenario in Prozent.

Durch die Nutzung des BHKW kann die CO_2-Emission auch in dieser Fahrweise gesenkt werden (siehe Tabelle 8.23).

Es zeigt sich, dass die Belegung des Netzstromes mit einem Leistungspreis die Auslastung des Netzanschlusses (und somit auch des Stromnetzes) deutlich verbessern kann. In den hier gerechneten Szenarien verringert sich der effektive Strompreis für Netzstrom um bis zu 20 %. Demgegenüber stehen allerdings höhere Kosten durch die schlechtere Auslastung des BHKW und etwaige Installationskosten für den elektrischen Speicher. Weiter zeigt sich in den hier optimierten Varianten, dass Batterien vornehmlich zur Abdeckung von kurzen Spitzenlasten verwendet werden. Das BHKW deckt, bei vorhandensein einer Batterie die Mittellast.

8.6. ergänzende Szenarien

Aus den bisherigen Szenarien zeigt sich, dass das Zusammenspiel von Strom- und Wärmenachfrage eine wichtige Rolle für die Einsetzbarkeit von Blockheizkraftwerken zur Deckung von Nachfragen von Wohngebäuden spielt. Um der Optimierung einen weiteren Freiheitsgrad zur Modulierung der Nachfragen zu geben wurde zusätzlich zum BHKW erlaubt eine Wärmepumpe (WP) zu installieren. Betrachtet man die jährlichen Kosten die durch diese Szenarien entstehen zeig sich ein Potential für die Kombination aus BHKW und Wärmepumpe (siehe Tabelle 8.24). Es wurde für die Optimierung auf das Modellgebäude Mehrfamilienhaus 26 mit Dämmstandard (ii) zurückgegriffen.

In Abbildung 8.44 ist die Fahrweise für das BHKW und die Wärmepumpe bzw. für das BHKW, die Wärmepumpe und die Gasheizung zu sehen. Dabei ergeben sich für den kostenoptimalen Fall für das installierte BHKW unter zusätzlicher Nutzung einer Wärmepumpe sowohl eine größere Kapazität als auch eine bessere Auslastung (siehe Tabelle 8.25).

Szenario	Kosten [€/a]	Kostenminderung [%]
N+G	26310	0.0
N+G+BHKW	25039	4.8
N+BHKW+WP	25405	3.4
N+G+BHKW+WP	23236	11.7

Tabelle 8.24.: Jährliche Kosten und Minderung der jährlichen Kosten im Vergleich zum Szenario mit Netzanschluss und Gasheizung für das MFH26 (ii).

Szenario	Kapazität [kW_{el}]	Auslastung [h/a]
N+G+BHKW	6.7	5300
N+BHKW+WP	8.3	6152
N+G+BHKW+WP	7.2	6351

Tabelle 8.25.: Installierte BHKW-Kapazität in elektrischer Leistung und Auslastung des BHKW in Volllaststunden in Abhängigkeit der erlaubten Prozesse.

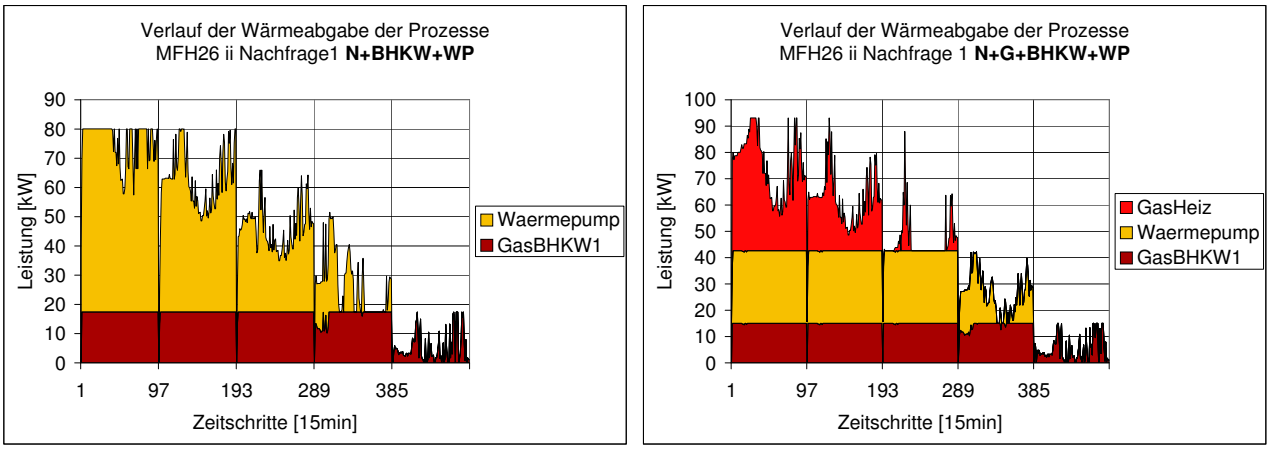


Abbildung 8.44.: *links:* Wärmebereitstellung des BHKW und der Wärmepumpe; *rechts:* Wärmebereitstellung des BHKW, der Wärmepumpe und der Gasheizung.

In Abbildung 8.45 und 8.46 zeigt sich, dass für das Szenario **N+G+BHKW+WP** der größte Teil des vom BHKW erzeugten Stroms dazu genutzt wird die Wärmepumpe zu betreiben. Die Stromnachfrage der Bewohner wird Größtenteils durch das Stromnetz gedeckt. In Szenario **N+BHKW+WP** reicht der erzeugte BHKW-Strom dagegen nicht aus, um mit der Wärmepumpe die Resnachfrage nach Wärme zu decken. Es wird zusätzlicher Netzstrom zum Betrieb der Wärmepumpe benötigt.

Durch die Kombination aus Wärmepumpe und BHKW kann die CO_2-Emission deutlich reduziert werden (siehe Tabelle 8.26).

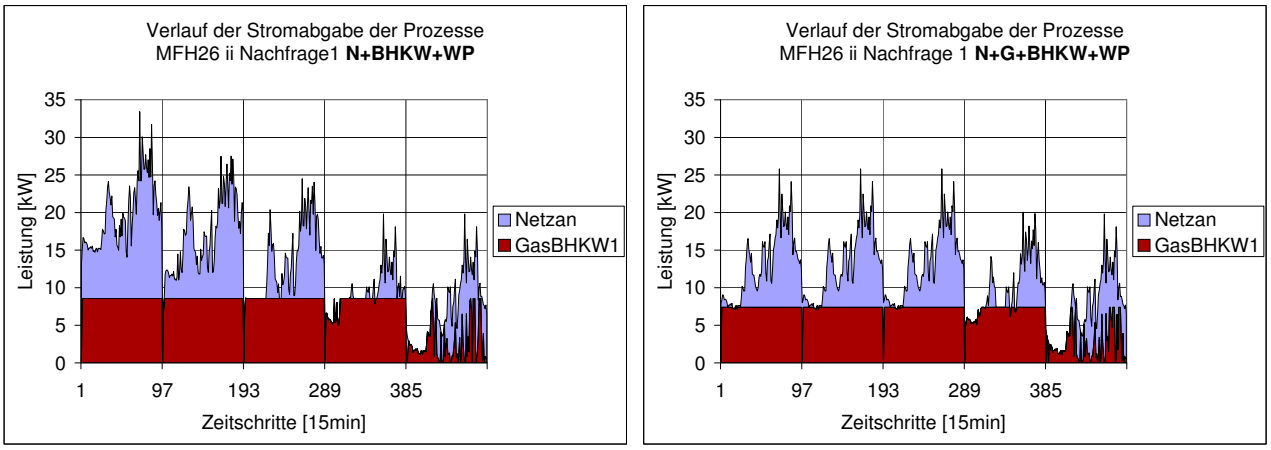


Abbildung 8.45.: *links:* Strombereitstellung des BHKW und des Netzanschlusses (Szenario **N+BHKW+WP**); *rechts:* Strombereitstellung (Szenario **N+G+BHKW+WP**).

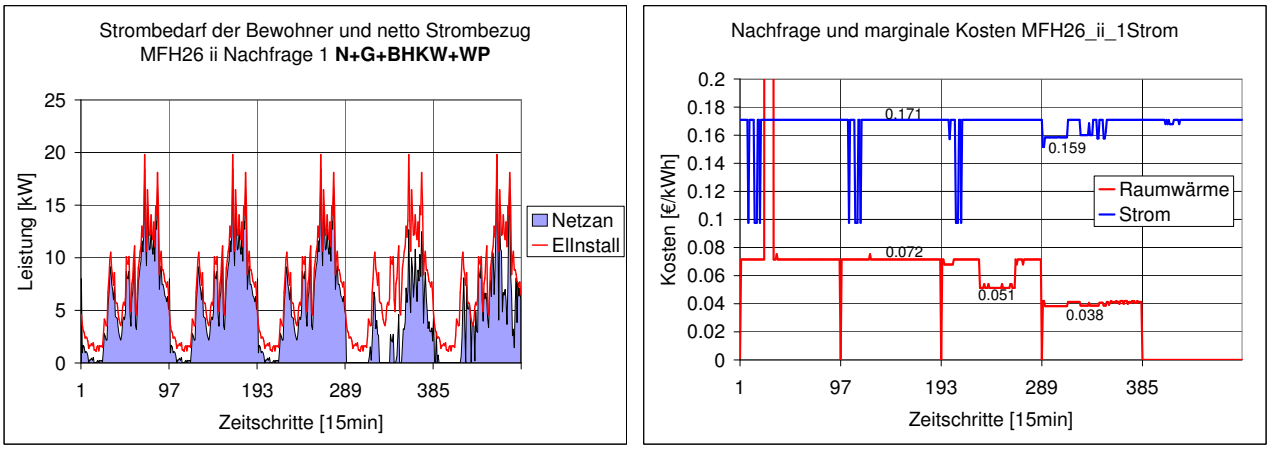


Abbildung 8.46.: *links:* Netto-Strombezug aus dem Stromnetz im Vergleich mit dem Strombedarf der Bewohner (Szenario **N+G+BHKW+WP)**; *rechts:* Marginale Kosten der Nachfragen Raumwärme und Strom des Szenarios **N+G+BHKW+WP**.

Szenario	CO_2-Emission[t/a]	Emissonsminderung [%]
N+G	79	0.0
N+G+BHKW	69	12.3
N+BHKW+WP	55	30.2
N+G+BHKW+WP	58	27.2

Tabelle 8.26.: CO_2-Emission und Minderung der CO_2-Emission im Vergleich zum Szenario mit Netzanschluss und Gasheizung für das MFH26 (ii).

In einem weiteren Szenario wurde dargestellt, in wie weit in einem Gebäude mit sehr geringem Raumwärmebedarf [34] die nachgefragte Energie nur durch ein BHKW und einen Netzanschluss gedeckt werden kann. In Abbildung 8.47 ist dazu die Fahrweise des BHKW und der Strombezug aus dem Netz für zwei verschiedene Nachfragevarianten zu sehen.

[34] Passivhausstandart

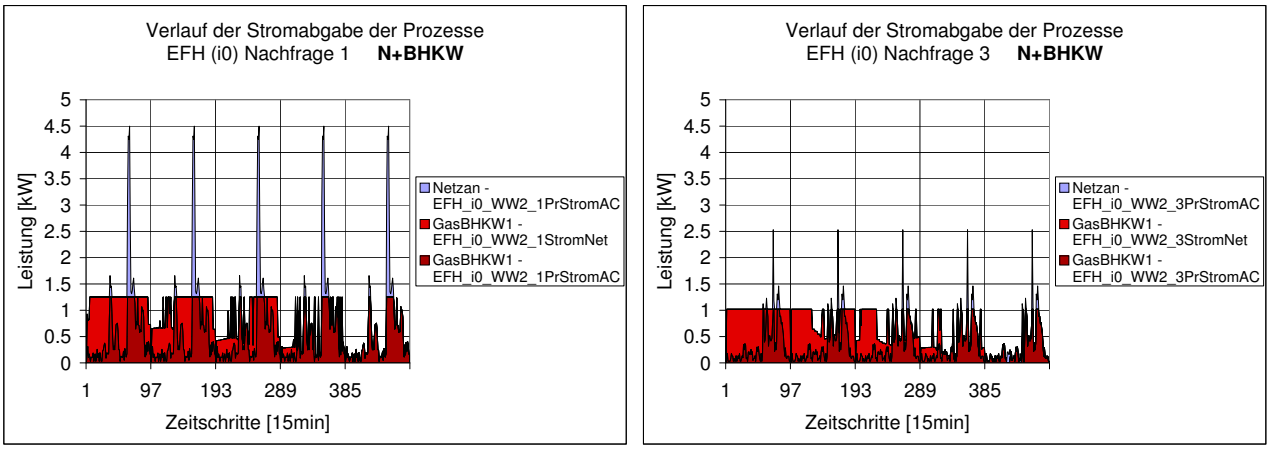


Abbildung 8.47.: Verlauf der Stromproduktion und des Stromverkaufs des BHKW und der Strombezug aus dem Netz für Nachfrage 1 (*links:*) und für Nachfrage 2 (*rechts:*).

Es zeigt sich, dass in diesem Fall an kalten Tagen ein relativ großer Teil des vom BHKW erzeugten Stroms an den Netzbetreiber verkauft wird.

9. Diskussion

Wie bereits im Kapitel „Motivation“ angesprochen zeigt Abbildung 9.1 nur ein vereinfachtes Flussschema für Energie von Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung.

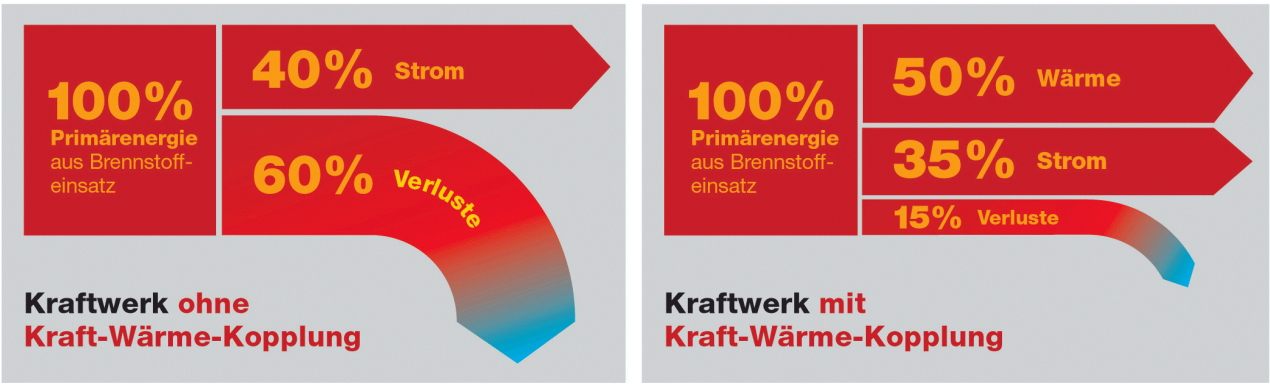


Abbildung 9.1.: *links:* schematischer Energiefluss in Kraftwerken zur Stromproduktion ohne die Nutzung der frei werdenden Wärme (ohne Kraft-Wärme-Kopplung); *rechts:* schematischer Energiefluss in Kraftwerken, in denen neben dem generierten Strom auch die erzeugte Wärme genutzt wird. *Quelle:* Stadtwerke Karlsruhe.

Nach diesem Schema wurde in Kapitel 6 die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit von kleinen Blockheizkraftwerken zur Deckung von Wärme- und Stromnachfragen von Wohngebäuden untersucht. Es zeigt sich, dass aufgrund des Verhältnis von Strom- zu Wärmenachfrage Haushalte aus ökonomischen Gesichtspunkten nur zum Teil durch Blockheizkraftwerke versorgt werden können. Unter Berücksichtigung der Jahresenergienachfrage kann der gesamte Strombedarf durch das BHKW gedeckt werden. Zur wirtschaftlichen Deckung der Wärmenachfrage muss zusätzlich ein Versorgungssystem mit geringeren Installationskosten verwendet werden [1]. Bei der Erhöhung der zeitlichen Auflösung der Nachfragen von einem Jahr auf Monate verringert sich der Anteil der vom BHKW beigesteuerten Energiemenge. Hier wirken sich die unterschiedlichen Voraussetzungen von Monaten mit und Monaten ohne Raumwärmebedarf auf die wirtschaftliche Nutzung eines Blockheizkraftwerks aus. In den Sommermonaten kann nur ein Teil der Stromnachfrage durch das BHKW kostengünstiger gedeckt werden [2].

Im Rahmen dieser Arbeit ist es gelungen die vermeintlichen Nachteile der oben genannten Betrachtungsweise zu umgehen. Dazu wurde die Nachfrage nach Strom und Wärme von Wohngebäuden modelliert. Die generierten Modellnachfragen konnten durch den Vergleich mit Messdaten verifiziert werden.

[1] vergleiche Abbildung 6.16
[2] vergleiche Abbildung 6.18

Anhand der Modelle konnte das Potential von Blockheizkraftwerken erneut abgeschätzt werden. Dabei wurden Kriterien gefunden, welche die Wirtschaftlichkeit und die Effektivität von Blockheizkraftwerken beeinflussen.

So zeigt sich, dass für ein bestimmtes Verhältnis von Wärme- zu Stromnachfrage ein BHKW kostengünstiger ist, als beispielsweise einen Netzanschluss und eine Gasheizung [3]. Dieses Verhältnis entspricht dem, von Wärme- zu Stromerzeugung des Blockheizkraftwerks. In jedem der optimierten Szenarien, in dem eine Installation eines Blockheizkraftwerks gestattet war, wurde dies von der Optimierung genutzt.

Als weiteres Ergebnis zeigt sich, dass die Erzeugung von Strom, dessen Wärme nicht nachgefragt wird sehr viel kostenintensiver ist, als ein Bezug von Netzstrom. Eine solche Fahrweise wird in keinem der Szenarien mit BHKW und Netzanschluss von der Optimierung berücksichtigt. Ähnliches gilt für die Wärmeproduktion [4]. Trotz der durch das KWK-Gesetz garantierten Mindestvergütung von 5,11 Cent/kWh für, an den Netzbetreiber verkauften BHKW-Strom ist die Erzeugung von Wärme durch das BHKW unrentabel, wenn die dabei generierte elektrische Energie nicht selbst nachgefragt wird. Jedoch kann diese Fahrweise zu Zeiten sehr hoher Wärmenachfrage Kostenvorteile bieten, wenn dadurch die zusätzliche Installation anderer wärmeproduzierender Prozesse vermieden werden kann [5].

Die Kapazität des Blockheizkraftwerks wird durch das Verhältnis von Leistungs- zu Energienachfrage und durch die sommerliche Wärmenachfrage bestimmt. Vergleicht man den Anteil, des vom BHKW im kostenoptimalen Fall beigesteuerten Strom am gesamten Strombedarf, dann zeigt sich, dass mit steigender Auslastung der Stromnachfrage die Einsetzbarkeit von Blockheizkraftwerken steigt [6]. Dabei steigt die Auslastung der Stromnachfrage, bis hin zu einem Maximum, mit der Anzahl der Parteien des Gebäudes aufgrund der Summation der Lastkurven an [7].

Bei dem zweiten Kriterium, der sommerlichen Wärmenachfrage kommt die Tatsache zu tragen, dass vom BHKW kein Strom erzeugt wird, dessen Wärme nicht nachgefragt wird. Somit steigt die Einsetzbarkeit des Blockheizkraftwerks mit wachsendem Verhältnis der sommerlichen Wärme- zur Stromnachfrage [8]. Die sommerliche Wärmenachfrage resultiert dabei aus dem Warmwasserbedarf und somit in gewissem Maße aus dem Komfortbedarf der Bewohner.

Diese beiden Eigenschaften der Nachfragen wirken sich folglich auf die jährliche Auslastung des Blockheizkraftwerks aus (bei konstanter Kapazität). Da ein BHKW erst ab einer Auslastung von mindestens ca. 2600 Volllaststunden [9] eine Nachfrage nach Wärme und Strom kostengünstiger decken kann, ist somit die kostenoptimale BHKW-Kapazität durch die Auslastung der Reststromnachfrage [10] und durch die sommerliche Restwärmenachfrage [11] vorgegeben.

[3] vergleiche Abbildung 6.10
[4] vergleiche Tabelle 8.1
[5] vergleiche z.B. Abbildung 8.16 weinroter Anteil
[6] vergleiche Abbildung 8.25
[7] vergleiche Abbildung 7.9
[8] vergleiche Abbildung 8.35 *rechts*
[9] vergleiche Abbildung 6.10
[10] Reststromnachfrage = Stromnachfrage - BHKW-Strom.
[11] Restwärmenachfrage = Wärmenachfrage - BHKW-Wärme.

Als grobe Abschätzung für einen Richtwert für die zu installierende BHKW-Kapazität ergibt sich aus den gerechneten Szenarien etwa 50 W_{el} pro kWh Bedarf nach warmem Wasser an einem Sommertag [12]. Dabei wird, über ein Jahr gesehen im Schnitt 0,7 kWh Strom pro nachgefragter kWh warmem Wassers vom BHKW erbracht [13]. Die Auslastung des Blockheizkraftwerks liegt in nahezu allen optimierten Szenarien mit Gasheizung, Netzanschluss und BHKW im Bereich zwischen 5000 und 6000 Volllaststunden [14].

Es ergibt sich in den Optimierungen, dass der kostengünstigste Betrieb eines Blockheizkraftwerks an Tagen mit Raumwärmebedarf eine stromgeführte Fahrweise darstellt. An diesen Tagen wird ein Grundlastteil der Stromnachfrage bis hin zur Begrenzung durch die Kapazität des Blockheizkraftwerks durch das BHKW beigetragen. Für Tage mit höchstem Raumwärmebedarf kann unter Verkauf von Strom zusätzliche Wärme durch das BHKW erzeugt werden. In dieser Zeit fährt das BHKW wärmegeführt. Im Sommerfall wird das BHKW, wie an den anderen Tagen in erster Linie dazu benutzt um einen möglichst großen Beitrag zum Strombedarf zu leisten. Somit ist auch in dieser Zeit die Fahrweise stromgeführt. Sie wird jedoch durch die Wärmenachfrage begrenzt. Kann die produzierte Wärme nicht mehr verwendet oder zwischengespeichert werden, so schaltet das BHKW ab. Diese Begrenzung stellt in allen berechneten Szenarien nur in den Sommermonaten eine obere Schranke für den generierten Strom dar.

Um dieser Regelung des Blockheizkraftwerks gerecht zu werden, müssen die Nachfrage nach Strom und/oder Wärme so modifiziert werden, dass sie gleichzeitig im richtigen Verhältnis vom BHKW nachgefragt werden. Dies kann durch die Zwischenspeicherung von Energie erreicht werden. Aufgrund der hohen Kosten die durch Wechselrichter, Laderegler und Akkumulatoren für die Speicherung von elektrischer Energie entstehen, werden von der Optimierung aus Kostengründen Wärmespeicher bevorzugt. In keinem der Gebäude mit den Prozessen Netzanschluss, Gasheizung und BHKW (**N+G+BHKW**) wurde von der Optimierung ein Speicher für elektrischen Strom installiert.

Vergleicht man die ökonomischen Auswirkungen der Nutzung eines Blockheizkraftwerks zeigt sich, dass mit steigender Auslastung der Stromnachfrage und mit steigendem Warmwasserverbrauch im Sommer die relative Kostenersparnis zu Versorgungsvarianten mit einem Netzanschluss und einer Gasheizung steigt [15]. Dabei liegen die Kosteneinsparungen zwischen ca. 2 % für kleinere Gebäude wie Ein- und Zweifamilienhäusern bei „normaler“ bis über 7 % bei großen Mehrfamilienhäusern mit sehr hoher Warmwassernachfrage.

Zur ökologischen Beurteilung von Blockheizkraftwerken wurden die CO_2-Emissionen der Varianten angegangen. Hier zeigt sich ein ähnliches Ergebnis wie für die Kosten. Durch die Nutzung des BHKW werden zwischen 5 und 17 % an CO_2-Emission eingespart. Bei diesen Einsparungen spielen „Gutschriften“ für, an das Netz abgegebenen Strom, eine zu vernachlässigende Rolle. Die Einsparungen sind eine tatsächliche geringere CO_2-Produktion.

[12] vergleiche Abbildung 8.35 *links*
[13] vergleiche Abbildung 8.34
[14] entspricht 57 - 68 %; vergleiche Abbildungen 8.22, 8.29 und 8.37
[15] vergleiche Tabelle 8.5 und 8.16

Die Antwort auf die anfängliche Fragestellung, ob durch diese dezentrale Stromproduktion mittels Blockheizkraftwerken die Auslastung der Stromnetze aufgrund einer Verringerung der nötigen Leitungskapazitäten steigt muss negativ beantwortet werden. Hier zeigt sich viel mehr eine entgegengesetzte Auswirkung. Durch die relativ hohen Investitionskosten von Blockheizkraftwerken werden diese vornehmlich zur Deckung eines Grundlastteils der Stromnachfrage verwendet. Dementsprechend verringert sich die Auslastung der Stromnetze aufgrund der dezentralen Stromerzeugung bei der Grundlage heutiger Strompreissysteme. Versieht man die Stromkosten dahingegen mit einem Leistungspreis, so ist der Optimierung ein Anreiz gegeben, die Auslastung des Netzanschlusses zu erhöhen. Diesbezüglich lässt sich die kostenoptimale Auslastung des Stromnetzes durch den Leistungspreis steuern. Für den in dieser Arbeit verwendeten Tarif „Netzanschluss 1“ kann die Auslastung des Anschlusses und somit des Stromnetzes für die Szenarien mit BHKW deutlich gesteigert werden. Allerdings ergeben sich in diesen Modellrechnungen trotz einer Verringerung der effektiven Netzstrompreise höhere Gesamtkosten als bei dem herkömmlichen Tarif. Dabei werden kleinere Gebäude besonders stark durch diese zusätzlichen Kosten belastet.

Insgesamt zeigt sich, dass aus ökologischer aber auch aus ökonomischer Sicht Blockheizkraftwerke in allen Gebäudegrößen positive Auswirkungen haben. Diese steigen im Allgemeinen sowohl mit der Anzahl der Parteien im Gebäude als auch mit der Warmwassernachfrage der Bewohner. Jedoch ist zu beachten, dass nur verhältnismäßig kleine Kapazitäten der Blockheizkraftwerke sinnvoll einen Teil zu den Nachfragen nach Strom und Wärme beitragen. Als Nachteil einer dezentralen Stromversorgung könnte die höhere lokale Belastung von Abgasen in urbanen Bereichen gesehen werden. Diese sind damit begründet, dass zwar insgesamt weniger Abgase für die Deckung einer Teilnachfrage entstehen [16], diese aber nicht mehr an klimatechnisch günstigeren Lagen außerhalb der Städte sondern in den Wohngebieten selbst entstehen.

Zur Abschätzung des Potentials von Blockheizkraftwerken im Haushaltssektor wurde auf die Kopplung der Jahresstromproduktion des Blockheizkraftwerks an den Warmwasserbedarf bei kostenoptimaler Fahrweise zurückgegriffen. Geht man von einem Jahresenergiebedarf von ca. 34,5 TWh [17] für die Warmwasseraufbereitung in Deutschland aus, so könnten unter der Annahme, dass jedes Wohngebäude mit einem BHKW ausgestattet wäre, ca. 24,2 TWh an Strom durch diese Blockheizkraftwerke produziert werden. Dies entspricht knapp 4% des jährlichen Strombedarfs Deutschlands. Diesbezüglich könnten die Hausbesitzer Deutschlands, bei der Durchdringung der Wohngebäude mit Blockheizkraftwerken von 100 % und durchschnittlichen Kosteneinsparungen von ca. 4 Cent pro kWh BHKW-Strom [18] mit einer Kostenersparnis von ca. eine Milliarde € pro Jahr und somit mit ca. 12,50 € pro Person und Jahr rechnen.

Die CO_2-Emission könnte dadurch in Deutschland um ca. 6,5 Millionen Tonnen pro Jahr verringert werden [19]. Dies entspricht etwa einem Drittel des Minimalziels der CO_2-Emissionsminderung der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahre 2010. Allerdings erscheint eine Ausstattung aller Haushalte

[16] Betrachtung in Anlehnung an die CO_2-Emission.

[17] 2,23 kWh Warmwasserbedarf pro Haushalt und Tag; 1,89 Personen pro Haushalt (vergleiche P. Loose (1991)); 80 Mio Einwohner; 0,7 kWh Strom pro kWh Warmwassernachfrage 8.34.

[18] Netzstromkosten von 17,09 Cent/kWh und BHKW-Stromkosten von 12,95 Cent/kWh bei einer Auslastung des BHKW's von 5000 h/a; vergleiche Tabelle 6.4

[19] vergleiche Abbildung 6.8

mit Blockheizkraftwerken bis zum Jahre 2010 als höchst unwahrscheinlich. Geht man von einer Lebensdauer von Heizungssystemen von ca. 15 Jahren aus, könnte, selbst wenn ab heute jedes neu installierte Heizsystem Kraft-Wärme-Kopplung nutzt, nur mit einer Durchdringung von ca. einem Drittel bis zum Jahr 2010 gerechnet werden.

Aus gerechneten Varianten in denen sowohl die Installation von Blockheizkraftwerken, als auch die von Wärmepumpen erlaubt war, zeigt sich, dass diese beiden Prozesse in Kombination sehr günstige Eigenschaften aufweisen um Nachfragen von Haushalten zu decken. Dabei entspricht die installierte elektrische Kapazität der Wärmepumpe in etwa der elektrischen Kapazität des Blockheizkraftwerks. Durch die Möglichkeit den erzeugten BHKW-Strom mittels Wärmepumpe in Wärme umzuwandeln kann die Auslastung des Blockheizkraftwerks deutlich erhöht werden [20].

Aus den Modellrechnungen ergibt sich folgender Schluss. Blockheizkraftwerke sind in den meisten Fällen nicht dazu geeignen, die gesamte Strom- oder Wärmenachfrage eines Gebäudes zu decken [21]. Vielmehr können Blockheizkraftwerke eingesetzt werden, um ökonomisch und ökologisch einen Teil zu diesen Nachfragen beizutragen.

Durch Verwendung einer linearen Optimierung, um die kostengünstigsten zu installierenden Kapazitäten und Fahrweisen der Szenarien zu finden, konnte einigen Aspekten nicht gerecht werden. Als Näherung muss die Linearität der Installationskosten mit der installierten Prozesskapazität angesehen werden. Hier ergeben sich für nahezu alle Prozesse, insbesondere aber für Blockheizkraftwerke, deutliche Unterschiede für die spezifischen Installationskosten in Abhängigkeit der Kapazität [22]. Demzufolge müssten bei kleinen Gebäuden, wohlweislich dieser Tatsache, dem Blockheizkraftwerk höhere Installationskosten zugewiesen werden. Außerdem war es bei der linearen Optimierung der Modellszenarien nicht möglich, bestimmte Mindestkapazitäten vorzugeben, die, falls auf den jeweiligen Prozess zurückgegriffen wird, installiert werden. Somit wurden zum Teil unsinnig kleine Kapazitäten von Prozessen installiert, die durch Änderung der Ausgangsdaten und neuer Optimierung verhindert werden mussten.

Als Manko der Modellierung kann die Anzahl der optimierten Nachfragekurven gesehen werden. Diese ist mit drei pro Szenario eher gering. Dadurch begründet sind die erhaltenen durchschnittlichen Werte beispielsweise für die Kapazitäten statistisch mit einem großen Fehler beaufschlagt.

Für eine weiterführende Beurteilung von Blockheizkraftwerken könnte das Konzept der linearen Optimierung fallen gelassen werden. Dadurch könnten beispielsweise die Installationskosten wirklichkeitsgetreuer abgebildet werden.

[20] vergleiche Tabelle 8.25

[21] Ausnahme: Bei Gebäuden mit besonders hoher Warmwasser- und besonders niedriger Raumwärmenachfrage könnte unter Berücksichtigung der Nichtlinearität der Installationskosten mit der Kapazität eine vollständige Deckung der Wärmenachfrage durch das BHKW wirtschaftlich sein (vergleiche Abbildung 8.47).

[22] vergleiche Abbildung 5.12

Der Grund, weshalb dennoch auf die lineare Optimierung zurückgegriffen wurde, liegt zum einen darin, dass durch diese ein verhältnismäßig einfaches System gegeben ist und zum anderen darin, dass dieses mit herkömmlichen PCs in überschaubarer Zeit lösbar ist.

Literaturverzeichnis

ASUE, Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., *BHKW-Kenndaten 2005*, Module Anbieter Kosten, Verlag, Rationeller Edgaseinsatz, Kaiserslautern **2005**.

M. Barbosa, U. Broske, J. Diekmann u.a.. *Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit.* Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovatrionsforschung, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Technische Universität München u.a., Karlsruhe, Berlin, München u.a., April **2004**.

Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, *Agrarmeteorologisches Mesnetz Bayern - Wetterdatenabruf Gersthofen -*,
URL: http://www.stmlf-design2.bayern.de/alle/cgi-bin/go.pl?region=home&page=
http://www.stmlf-design2.bayern.de/lbp/agm/cgi-bin/agmdaten.cgi?statnr=119.
Stand **12.09.2005**.

Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, *Agrarmeteorologisches Mesnetz Bayern - Wetterdatenabruf Krumbach -*, URL:
http://www.stmlf-design2.bayern.de/alle/cgi-bin/go.pl?region=home&page=
http://www.stmlf-design2.bayern.de/lbp/agm/cgi-bin/agmdaten.cgi?statnr=62.
Stand **12.09.2005**.

Bundesamt für Wirtschaft und Technologie *Zahlen und Fakten, Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung*, URL:
http://www.inqa.de/Navigation/Technologie-und-Energie/Energiepolitik
/energiedaten,did=51884.html. Stand **9.02.2005**.

K. Biasin, Dr. B. Dietrich, Dr. W. Hauke u.a.. *Bau-Handbuch*, 12. Ausgabe. RWE Energie, Essen, **1998**.

DESTATIS [a], Statistisches Bundesamt Deutschland, *Mikrozensus, Bevölkerung*,
URL: http://www.destatis.de/basis/d/bevoe/bevoetab11.php. Stand 22.03.**2005**.

DESTATIS [b], Statistisches Bundesamt Deutschland, *Mikrozensus, Bauen und Wohnen*,
URL: http://www.destatis.de/basis/d/bauwo/wositab5.php. Stand 13.08.**2003**.

DESTATIS [c], Statistisches Bundesamt Deutschland, *Ausgewählte Zahlen zur Energiewirtschaft*, Fachserie 4 / Reihe 6.5, Artikelnummer: 2040650051064, Erschienen am 21.11.**2005**.

EEG *Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich (Erneuerbare-Energien-Gesetz)*, 21.07.**2004**.

Eurostat. *Energy & Transport : Figures and Main Facts*, URL: http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/figures/pocketbook/doc/2004/pb2004_part_2_energy.pdf. Stand 12.12.**2005**.

EnEV. *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung)*, Stand Kabinettbeschluss 26.05.**2004**.

W. Feist. *Passiv-Haus-Projektierungs-Programm 2004 (PHPP 2004)*, URL: http://www.passiv.de/ **2004**.

A. Hammer, H. Hammer, K. Hammer. *Physikalische Formeln und Tabellen*, 6. Auflage. J. Lindauer Verlag, München, **2000**.

F. D. Heidt. *Globalstrahlungskarte Deutschland 2003*, URL: http://nesa1.uni-siegen.de Stand 16.03.**2006**.

M. Klobasa, M. Ragwitz. *Gutachten zur CO_2-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien*, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, Januar **2005**.

KWK-Gesetz *Gesetz für die Erhaltung, Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz* , Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil I Nr. 19, Bonn 22. März **2002**

J. Lang, *Hausenergiesysteme mit Brennstoffzellen* , BINE Informationsdienst, Projektinfo 06/04, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich- technische Information mbH, Eggenstein-Leopoldshafen **2004**.

P. Loose, *Der Tagesgang des Trinkwarmwasserbedarfes* , HLH Bd. 42 Nr. 2, VDI Verlag, Februar **1991**

S. Marsch, C. Tüller. *Ernährung in der Intensivmedizin, Der Anaesthesist*, 51. Ausgabe. Springer Verlag, Mannheim u.a., **2002**.

K. Schneider. *Bautabellen für Architekten*, 15. Auflage. Werner Verlag, Düsseldorf, **2002**.

Solarshop ^{PV}, *Netzeinspeise Anlagen, Anlagen Bausätze*, URL: http://www.solarshop.net/index.php?cPath=106_121. Stand 10.08.**2005**.

Solarshop ^{LR}, *Laderegler*, URL: http://www.solarshop.net/index.php?cPath=87&xanarioID =678b280ad8220d7c51a71d70a641f80e. Stand 10.08.**2005**.

Stadtwerke Augsburg ^{a}, *Stadtwerke Wärme, Versorgungsgebiet*, URL: http://www.stawa.de/augsburg/energie/waerme/v_fernwaerme.jpg. Stand 14.12.**2005**.

Stadtwerke Augsburg [b], *Stadtwerke Strom, Tarifübersicht*,
URL: http://www.stawa.de/augsburg/index2.php?rubrik=energie&seite=/augsburg/energie/energie.shtml. Stand 1.1.**2005**.

Stadtwerke Karlsruhe,
URL: http://www.stadtwerke-karlsruhe.de/info/grafiken-bilder/kwk.gif, 29.01.**2006**

H. Stöcker. *Taschenbuch der Physik*, 4. Auflage. Harri Deutsch Verlag, Thun, Frankfurt am Main, **2000**.

VDN, Verband der Netzbetreiber. *Daten und Fakten, Basisdaten zum Stromnetz in Deutschland*,
URL: http://www.vdn-berlin/daten_und_fakten.asp. Stand 15.12.**2005**.

Abbildungsverzeichnis

1.1. *links:* schematischer Energiefluss in Kraftwerken zur Stromproduktion ohne die Nutzung der frei werdenden Wärme (ohne Kraft-Wärme-Kopplung); *rechts:* schematischer Energiefluss in Kraftwerken, in denen neben dem generierten Strom auch die erzeugte Wärme genutzt wird. *Quelle:* Stadtwerke Karlsruhe. 7

3.1. *links:* durchschnittlicher Tageslastgang von Haushalten für Werk-, Sams- und Sonn- und Feiertage. *Quelle:* DREWAG; *rechts:* mittlerer Lastgang von Haushalten für Werktage in Abhängigkeit des Monats *Quelle:* DREWAG 12

3.2. Verlauf der von den Stadtwerken Augsburg 1997 (*links*) und 1998 (*rechts*) abgegebenen elektrischen Leistung. *Quelle:* Stadtwerke Augsburg 13

3.3. *links:* durchschnittliche pro Tag aufgenommene Energie in Abhängigkeit des Monats; *rechts:* durchschnittliche pro Tag aufgenommene Energie in Abhängigkeit des Wochentages. 13

3.4. Mittlerer zeitlicher Verlauf der Stromnachfrage der Stadt Augsburg über alle Tage des Jahres 1997 gemittelt. 14

3.5. *links:* mittlerer zeitlicher Verlauf des Lastgangs der Stadtwerke Augsburg für Januar und Juli 1997; *rechts:* mittlerer Tagesverlauf der Stromnachfrage von Haushalten für Januar und Juli *Quelle: DREWAG.* 14

3.6. Vergleich der Unterschiede in der Nachfrage zwischen Januar und Juli für die haushaltsspezifischen Daten der DREWAG (linke Skala) und der Nachfrage aller Sektoren (Haushalte, Gewerbe, Industrie) der Stadtwerke Augsburg (rechte Skala). 15

3.7. Vergleich der Nachfrage nach den Kategorien Industrie & Gewerbe, Nachtspeicheröfen und Haushalte von Januar und Juli der Stadt Augsburg. 16

3.8. *links:* Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers nach Stefan-Bolzmann in Abhängigkeit der Temperatur; *rechts:* Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers nach Stefan-Bolzmann in Abhängigkeit der Temperatur im Temperaturbereich zwischen -20 °C und 40 °C und lineare Näherung für diesen Bereich. 18

3.9. *links:* Temperaturverlauf in einer Wand z.B. Ziegelmauer mit einer Dicke von 10 cm und der Wärmeleitfähigkeit von 1 $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K\,m}}$; *rechts:* Temperaturverlauf in einer Wand aus mehreren Schichten, z.B. Ziegelmauer mit einer Dicke von 10 cm und der Wärmeleitfähigkeit von 1 $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K\,m}}$, Dämmung mit Dicke 5 cm und Putz mit 1 cm Dicke. 20

3.10. *links:* Temperaturverlauf des ersten Halbjahres 2005 in Gersthofen in 2 m Höhe und in 20 cm Bodentiefe; *rechts:* Verlauf der Globalstrahlung vom 1. Februar bis 31. April 2005 in Gersthofen. 21

3.11. *links:* Durchschnittliche Temperatur der letzten Jahre; *rechts:* Durchschnittliche Temperatur jedes Monats aus Temperaturdaten vom 1.1.1991 bis 31.12.2004. 22
3.12. *links:* Durchschnittliche Heizgradstunden pro Heizperiode der letzten Jahre; *rechts:* Durchschnittliche Heizgradstunden jedes Monats aus Temperaturdaten vom 1.1.1991 bis 31.12.2004. 22
3.13. Durchschnitt der Globalstrahlung in kWh/m^2 des Jahres 2003 *Quelle:* Heidt. 23
3.14. Durchschnitt der Globalstrahlung in kWh/m^2 vom 1.1.1991 bis 31.12.2004 *Quelle:* Wetterstation Krumbach (2005). 24
3.15. Verhältnis der Globalstrahlung pro Tag zur Tagesdurchschnittstemperatur in Abhängigkeit des Monats einschließlich linearer Regression für jeden Monat. 25
3.16. *links:* Verhältnis der verschiedenen Bezugsarten. *rechts:* Genutzte Energiequellen für die Deckung der Wärmenachfrage. *Quelle:* DESTATIS [b] (2005) 26
3.17. Jahresheizwärmebedarf bzw. -verbrauch des Wohnbestandes und Höchstwerte des Jahres-Heizwärmebedarfs nach der Wärmeschutzverordnung von 1982 bzw. von 1995. *Quelle:* K. Biassin (1998) Abbildung 2-1. 27

4.1. *links:* installierte Kapazitäten in GW und Anteil der einzelnen Kraftwerkstypen an der Gesamtkapazität der deutschen Energieversorger (Strom) von 2003. *Quelle:* M. Klobasa (2005); *rechts:* Jahresenergieproduktion der einzelnen Kraftwerkstypen. *Quelle:* DESTATIS [c]. 30
4.2. Auslastung der Kraftwerkstypen anhand der installierten Kapazitäten und des Jahresenergieverbrauchs. 30
4.3. Stromaustausch mit den Nachbarländern des Jahres 2004. *Quelle* VDN. 31
4.4. *links:* Regelzonen der vier Netzbetreiber; *rechts:* Höchstspannungs Leitungsnetz in Deutschland. *Quelle* VDN. 32
4.5. *links:* Schätzung der Bestandteile des Strompreises für Haushaltskunden. *Vergleiche* VDN (2005); *rechts:* Verlauf der Strompreise der letzten Jahre. *Quelle* BMWi (2005). . 33
4.6. Verlauf der durchschnittlichen Gaspreise der letzten Jahre. *Quelle:* Eurostat (2005). . 35
4.7. Versorgungsgebiet der Stadtwerke Augsburg mit Fernwärme. 36

5.1. Effektiver Strompreis in Cent pro kWh in Abhängigkeit des Jahresstrombedarfs pro Haushalt der Stadtwerke Augsburg vom 01.1.2005. 38
5.2. Photovoltaikanlage. 38
5.3. *links:* Kosten für die Installation verschiedener Photovoltaikanlagen und linearer Trend. Die resultierenden spezifischen Kosten liegen bei ca. $4600\frac{\text{Euro}}{\text{kW}_\text{P}}$; *rechts:* Kosten für die Installation verschiedener DC-AC Wechselrichter und linearer Trend. Die resultierenden spezifischen Kosten liegen bei ca. $546\frac{\text{Euro}}{\text{kW}_\text{P}}$. 39
5.4. Flamme einer Gasheizung. 40
5.5. Kosten für die Installation einer Gasheizung in Abhängigkeit der Kapazität der Anlage und linearer Trend ($138\frac{\text{Euro}}{\text{kW}_\text{P}}$). 42
5.6. Holzpellets. 42
5.7. Spezifische Kosten für die Installation einer Pelletheizung (linearer Trend $521\frac{\text{Euro}}{\text{kW}_\text{P}}$). . . 43

5.8. Spezifische Kosten für die Installation eines Solarkollektors (linearer Trend $370\frac{\text{Euro}}{\text{kW}_\text{P}}$). . 44

5.9. Spezifische Kosten für die Installation einer Wärmepumpe in Abhängigkeit der abgegebenen Wärmeleistung (linearer Trend: $784\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$). 45

5.10. Spezifische Kosten für die Installation eines Stromspeichers aus Akkumulatoren (linearer Trend: $174\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$). 46

5.11. *links:* spezifische Kosten für die Installation eines Warmwasserspeichers in Abhängigkeit der Speicherkapazität in Litern; *rechts:* spezifische Kosten für die Installation eines Warmwasserspeichers in Abhängigkeit der Speicherkapazität in kWh (linearer Trend: $96\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$). 47

5.12. *links:* Installationskosten pro kW installierte Leistung. *rechts:* Kosten eines Instandhaltungsvertrags pro kWh erzeugte elektrischer Energie in Abhängigkeit der installierten Leistung in kW_{el}. Für die Instandhaltungskosten von Öl-BHKW's liegen keine statistischen Werte vor. 48

5.13. Spezifische Kosten von BHKW's in Abhängigkeit der elektrischen Kapazität von BHKW's bis 10 kW_el. 49

6.1. ecopower Mini-BHKW. 51

6.2. Solo Stirling 161 microKWK-Modul 52

6.3. Viessmann SOFA 3 53

6.4. Primärenergieeinsatz in kWh Primärenergie pro kWh nachgefragter Energie in Abhängigkeit vom Anteil des Strombedarfs am Gesamtenergiebedarf; *links:* für die Kombination aus Netzanschluss und Gasheizung; *rechts:* für ein BHKW. 54

6.5. *links:* Primärenergiebedarf des BHKW und überschüssig vom BHKW produzierte Wärme bzw. Strom; *rechts:* Primärenergieeinsatz in kWh Primärenergie pro kWh nachgefragter Energie in Abhängigkeit vom SaE für die Kombination aus Netzanschluss und Gasheizung und für ein BHKW (gestrichelte Linie: Berücksichtigung des Verkaufs des überschüssig produzierten Stromes mit 2,5 kWh/kWh). 55

6.6. Wirkungsgrad der beiden Optionen 56

6.7. *links:* Energiebezugskosten in Abhängigkeit des Stromanteils für beide Varianten (gestrichelte Linie: ohne Berücksichtigung der Verkaufserlöse aus der Stromeinspeisung); *rechts:* Kostenersparnis pro kWh Energie bei der Nutzung eines Blockheizkraftwerks zur Deckung der Energienachfrage in Abhängigkeit des Stromanteils an der Gesamtnachfrage. Hier ist im Gegensatz zur linken Abbildung ein Servicevertrag mit Kosten von 3 Cent/kWh_{el} berücksichtigt. 56

6.8. CO_2 Belastung pro kWh Energienachfrage in Abhängigkeit des Stromanteils am Energiebedarf (gestrichelte Linie: Berücksichtigung einer Gutschrift von 0,55 kg CO_2 pro kWh verkauftem Strom). (CO_2-Emissionsminderung bei 33 % Stromanteil am Strombedarf ca. 0,27 kg CO_2 / kWh_{el}). 57

6.9. *links:* Verlauf der Leistungsaufnahme einer Gasheizung für ein Jahr, das aus 5 repräsentierenden Tagen modelliert wurde. Die Kapazität beträgt in diesem Beispiel 153 kW, die aufgenommene Energie 350 MWh und dementsprechend die Auslastung 2286 h/a; *rechts:* Vergleich der auf die Energienachfrage umgelegten Installationskosten eines BHKW in Abhängigkeit der Volllaststunden bei Installationskosten von 65 Euro pro kW Prozesskapazität. 58

6.10. Gesamtkosten (Energiekosten) für die Deckung der Nachfrage der Variante Gasheizung und Netzanschluss mit 2000 Volllaststunden der Gasheizung im Vergleich mit einer Deckung durch ein BHKW mit je einer Auslastung von 2600 bzw. 6000 Volllaststunden. (gestrichelte Linien entsprechen Kosten ohne Vergütung des verkauften Stroms). Die rote Linie zeigt die Kostenersparnis in Cent pro kWh bei einer Auslastung des BHKW von 6000 und der Gasheizung von 2000 Volllaststunden (Maximum = 1,61 Cent/kWh). 58

6.11. *links:* Energiekosten in Abhängigkeit des Stromanteils für die Deckung der Nachfrage mittels Gasheizung und Netzanschluss und dem Gaspreis (punktgestrichelte Linie: Mehrkosten durch den neuen Gaspreis); *rechts:* Energiekosten in Abhängigkeit des Stromanteils für die Deckung der Nachfrage mittels BHKW und dem Gaspreis. (punktgestrichelte Linie: Mehrkosten durch den neuen Gaspreis). 59

6.12. Gesamtkosten für die Deckung der Nachfrage der Variante Gasheizung und Netzanschluss mit 2000 Volllaststunden der Gasheizung im Vergleich mit einer Deckung durch ein BHKW mit je einer Auslastung von 3300 bzw. 6000 Volllaststunden. (gestrichelte Linien entsprechen Kosten ohne Vergütung des verkauften Stromes). Die rote Linie zeigt die Kostenersparnis in Cent pro kWh bei einer Auslastung des BHKW von 6000 und der Gasheizung von 2000 Volllaststunden (Maximum = 1,02 Cent/kWh). 60

6.13. *links:* Energiebezugskosten in Abhängigkeit des Stromanteils für die Deckung der Nachfrage mittels Gasheizung und Netzanschluss und dem Strompreis. (punktgestrichelte Linie: Mehrkosten durch den neuen Strompreis); *rechts:* Gesamtkosten für die Deckung der Nachfrage der Variante Gasheizung und Netzanschluss mit 2000 Volllaststunden der Gasheizung im Vergleich mit einer Deckung durch ein BHKW mit je einer Auslastung von 1865 bzw. 6000 Volllaststunden. (gestrichelte Linien entsprechen Kosten ohne Vergütung des verkauften Stromes). Die rote Linie zeigt die Kostenersparnis in Cent pro kWh bei einer Auslastung des BHKW von 6000 und der Gasheizung von 2000 Volllaststunden (Maximum = 2,75 Cent/kWh). 61

6.14. *links:* Vergleich der Installationskosten in ct/kWh in Abhängigkeit des Stromanteils und der Installationskosten in Euro/kW Kapazität bei einem BHKW mit 6000 Volllaststunden; *rechts:* Gesamtkosten für die Deckung der Nachfrage der Variante Gasheizung und Netzanschluss mit 2000 Volllaststunden der Gasheizung im Vergleich mit einer Deckung durch ein BHKW mit je einer Auslastung von 2090 bzw. 6000 Volllaststunden. (gestrichelte Linien entsprechen Kosten ohne Vergütung des verkauften Stromes). Die rote Linie zeigt die Kostenersparnis in Cent pro kWh bei einer Auslastung des BHKW von 6000 und der Gasheizung von 2000 Volllaststunden (Maximum = 1,86 Cent/kWh). . . 62

6.15. *links:* Strom und Wärmebedarf pro Quadratmeter Bezugsfläche und Jahr in Abhängigkeit der Anzahl an Familien im Gebäude; *rechts:* Stromproduktion eines BHKW bei Deckung der Wärmenachfrage im Vergleich zur Stromnachfrage je m^2 und Jahr. . . . 63
6.16. Anteil des vom BHKW erbrachten Stroms (100 %) und der erbrachten Wärme (39 %) am gesamten Jahresenergiebedarf. Bezogen auf die im Schnitt pro Tag nachgefragte Energie. 65
6.17. Anteil des Heizwärmebedarf jedes Monats vom gesamten Jahresheizwärmebedarf. . . . 66
6.18. *links:* Deckung des täglichen Wärmebedarfs durch BHKW und Gasheizung in den verschiedenen Monaten; *rechts:* Deckung der täglichen Stromnachfrage durch das BHKW und einen Netzanschluss in den verschiedenen Monaten. Je für eine Wärmenachfrage von 161,8 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$. 67
6.19. *links:* Gesamtkosten der Energieversorgung mittels BHKW (0,59 kWh Wärme und 0,29 kWh elektrischer Energie); *rechts:* Gesamtkosten der Energieversorgung mittels Gasheizung und Netzanschluss der selben Nachfrage. 68
6.20. Kosten pro 0,59 kWh Wärme und 0,29 kWh elektrischer Energie eines BHKW's im Vergleich zu einer Variante mit Netzanschluss und Gasheizung. 68

7.1. *links:* Zuschauerzahlen im deutschen Fernsehen, berechnet aus den Einschaltquoten und den Zuschauerzahlen der ARD für den 24.10.2005 und den 9.11.2005; *rechts:* Wahrscheinlichkeit für das Einschalten eines Modellfernsehers an einem Wochentag eines berufstätigen Nutzers (Kat. I: Wahrscheinlichkeit für eine lange Nutzung; Kat. II: Wahrscheinlichkeit für eine kurze Nutzung des Fernsehgerät). 72
7.2. Möglicher Lastgang eines Fernsehers eines berufstätigen Nutzers an einem Werktag. . 73
7.3. Möglicher Lastgang eines Kühlschranks und einer Gefriertruhe. 74
7.4. Wahrscheinlichkeiten für das Einschalten eines Geräts in Abhängigkeit der Person. . . 76
7.5. Wahrscheinlichkeiten für das Einschalten eines Geräts im Fall, dass die Hausarbeit am Abend, bzw. unter Tags erledigt wird. 77
7.6. *links:* mögliche Lastgänge für zwei Singlewohnungen (je Single-I); *rechts:* mögliche Lastgänge für zwei Haushalte mit je 4 Personen (je Paar-I++) 77
7.7. Durchschnittlicher Lastgang von je 100 Haushalten; links: Single-I; rechts: Paar-I++. . 78
7.8. *links:* Lastgänge der verschiedenen Haushaltstypen und der Mittelwert unter Berücksichtigung der Häufigkeit der jeweiligen Haushaltstypen; *rechts:* Vergleich der Modelldaten mit Lastkurven für Haushalte (siehe Abbildung 3.1). 79
7.9. Durchschnittliche Auslastung von je n Haushalten; *links:* Single-I (vgl. 654 h/a bei Einzelnem Haushalt); *rechts:* Paar-I++ (vgl. 989 h/a bei Einzelnem Haushalt). 80
7.10. *links:* vier unterschiedliche mögliche Warmwassernachfragen; *rechts:* Aufteilung der Warmwassernachfrage in Baden, Duschen und sonstige Verbrauche. 81
7.11. Eigenschaften der thermischen Hülle von Gebäuden des Dämmstandards (i). 83
7.12. Eigenschaften der thermischen Hülle von Gebäuden des Dämmstandards (ii) 84
7.13. Eigenschaften der thermischen Hülle von Gebäuden des Dämmstandards (iii) 85

7.14. *links:* Tagestemperaturverlauf für den Repräsentanten (II) (Kaltwintertag); berechnet aus dem Mittelwert aus je dem Mitglied der Gruppe (II) mit der niedrigsten, höchsten und mittleren Tagesdurchschnittstemperatur. *rechts:* Tagesverlauf der Globalstrahlung dieser Tage; gleiche Berechnungsweise. 88
7.15. *links:* relative Häufigkeit für das Vorkommen eines der fünf Typtage bzw. Repräsentanten; *rechts:* Aufteilung in Repräsentanten mit Raumwärmebedarf (I - IV) und in Repräsentanten ohne Raumwärmebedarf (V). 89
7.16. Verlustleistung der einzelnen Komponenten des Gebäudetyps Einfamilienhaus für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii). 91
7.17. *links:* Verlustleistung der einzelnen Komponenten aller Gebäudetypen für den Dämmstandard (ii); *rechts:* spezifischer Jahresheizwärmebedarf aller Gebäudetypen. 96

8.1. Energiediagramm der maximal möglichen Prozesse der Modelle. 98
8.2. *links:* Verlauf der Wärmenachfrage (Nachfrage 1) am Repräsentanten I (Gewichtung des Tages: 0,33). Die Skalierung der Abszisse erfolgt in Zeiteinheiten, wobei eine Zeiteinheit 15 Minuten entspricht. Ein Tag besteht somit aus 96 Zeiteinheiten; *rechts:* Verlauf der Wärmenachfrage (Nachfrage 1) am Repräsentanten II (Gewichtung 19). 100
8.3. *links:* Verlauf der Wärmenachfrage (Nachfrage 1) am Repräsentanten III (Gewichtung 103); *rechts:* Verlauf der Wärmenachfrage (Nachfrage 1) am Repräsentanten IV (Gewichtung 98). 100
8.4. *links:* Verlauf der Wärmenachfrage (Nachfrage 1) am Repräsentanten V (Gewichtung 144); *rechts:* Verlauf der Stromnachfrage (Nachfrage 1) für alle Repräsentanten. . . . 100
8.5. *links:* Kapazität der installierten Prozesse; *rechts:* Volllaststunden der Prozesse 101
8.6. Stromnachfrage und marginale Kosten des EFH (ii) für die Nachfrage 1 (Szenario **G+N**). Dabei wurden die fünf Repräsentanten in der Reihenfolge I, II, III, IV und V aneinander gereiht (Gewichtung der Tage wie in Abbildung 7.15 gezeigt). 102
8.7. Raumwärmenachfrage und marginale Kosten des EFH (ii) für zwei verschiedene Skalenbereiche der marginalen Kosten (Nachfrage 1, Szenario **G+N**). Dabei sind die fünf Typtage aneinander gereiht. 102
8.8. *links:* durch die Optimierung durchschnittlich installierte Prozesskapazitäten (aufgenommene Leistung) der verschiedenen Szenarien; *rechts:* Volllaststunden der Prozesse in Abhängigkeit des Szenarios. 103
8.9. *links:* marginale Kosten für Strom, Raumwärme und warmes Wasser für Nachfragekurve 1 (Szenario **BHKW**); *rechts:* Fahrweise des BHKW. 104
8.10. *links:* Strombezug, selbst nachgefragter BHKW-Strom und Stromverkauf des überschüssig produzierten Stromes (Szenario **N+BHKW** Nachfrage 1); *rechts:* Speicherinhalt im Warmwasserspeicher (Szenario **N+BHKW**). 105
8.11. *links:* marginale Kosten Nachfragekurve 1 (Szenario **N+BHKW**); *rechts:* Fahrweise des BHKW. 105
8.12. *links:* Fahrweise des BHKW Nachfrage 1 (Szenario **G+BHKW**); *rechts:* Stromangebot aus BHKW und Batterie. 106

8.13. *links:* Wärmeangebot aus BHKW und Gasheizung Nachfragekurve 1; *rechts:* Speicherinhalt Akkus und Warmwasserspeicher. 107
8.14. *links:* marginale Kosten Nachfragekurve 1 (Szenario **G+BHKW**). 107
8.15. *links:* Stromproduktion des BHKW (Stromverkauf ist in weinroter Farbe dargestellt) und Strombezug aus dem Netz (Szenario **N+G+BHKW**); *rechts:* Wärmebereitstellung (Szenario **N+G+BHKW**). 108
8.16. *links:* Stromproduktion des BHKW (Stromverkauf ist in weinroter Farbe dargestellt) und Strombezug aus dem Netz für den Repräsentanten I (kältester Tag); *rechts:* Wärmebereitstellung Repräsentant I. 108
8.17. *links:* Stromproduktion des BHKW und Strombezug aus dem Netz (Repräsentant V); *rechts:* Wärmebereitstellung (Repräsentant V). 108
8.18. *links:* Anteil der von der Gasheizung und vom BHKW erbrachten Wärmemenge pro Tag in Abhängigkeit des Typtags (vergleiche Abbildung 6.18 *links*); *rechts:* Anteil der vom Netzanschluss und vom BHKW erbrachten Strommenge pro Tag in Abhängigkeit des Typtags (vergleiche Abbildung 6.18 *rechts*). 109
8.19. marginale Kosten für Strom, Raumwärme und Warmwasser. 109
8.20. *links:* durchschnittliche Auslastung der Nachfrage nach elektrischer Energie der verschiedenen Gebäude bzw. Straßen; *rechts:* Auslastung der Wärmenachfrage für die Gebäude bzw. für die Straßen. 111
8.21. *links:* von der Optimierung installierte Kapazitäten der Leistungsaufnahme der Prozesse bei verschiedenen Szenariengrößen (Kapazität der Gasheizung im Szenario Straße 2 beträgt 391 kW, Straße 2a 383 kW); *rechts:* Energiedurchsatz pro Jahr der Prozesse bei verschiedenen Szenariengrößen. 111
8.22. Volllaststunden der Prozesse bei verschiedenen Szenariengrößen. 112
8.23. *links:* Verlauf der durch das BHKW und durch den Netzanschluss bereitgestellter elektrischer Energie (weinroter Anteil an Tag I entspricht Stromverkauf an das Netz); *rechts:* Verlauf der Wärmebereitstellung. 112
8.24. Verlauf der marginalen Kosten für das Gebäude MFH26, Szenario **N+G+BHKW**. . 112
8.25. vom BHKW erbrachter Anteil zum gesamten Strombedarf der einzelnen Nachfragen in Abhängigkeit der Auslastung der Nachfragekurven nach Strom und linearer Trend. . . 114
8.26. spezifische Kapazität bezogen auf die Anzahl der Bewohner und die Wohnfläche. . . . 115
8.27. *links:* Anteil des BHKW-Stroms am Strombedarf für jeden Typtag für die acht Szenarien; *rechts*: Anteil der BHKW-Wärme am Wärmebedarf. 115
8.28. Auslastung der BHKW's an den verschiedenen Tagen. Dabei wird auch hier die Auslastung zu einer besseren Vergleichbarkeit der Werte in Volllaststunden angegeben. . . 116
8.29. *links:* installierte BHKW-Kapazität in kW_{el} (elektrischer Leistung) für die Gebäude EFH, MFH6 und MFH26 in Abhängigkeit vom Dämmstandard; *rechts:* Auslastung des Blockheizkraftwerks für die verschiedenen Dämmstandards. 117
8.30. *links:* Anteil des BHKW-Stroms am gesamten Strombedarf für die fünf Repräsentanten am Beispiel des Gebäudes MFH26 in Abhängigkeit des Dämmstandards; *rechts:* Anteil der BHKW-Wärme am gesamten Wärmebedarf für die fünf Repräsentanten am Beispiel des Gebäudes MFH26 in Abhängigkeit des Dämmstandards. 118

8.31. links: Verlauf der Stromabgabe des BHKW und des Strombezugs aus dem Netz für das Gebäude MFH26 für Dämmstandard (i) (Nachfragevariante 1); rechts: Verlauf der Stromabgabe des BHKW und des Strombezugs aus dem Netz für das Gebäude MFH26 für Dämmstandard (iii) (Nachfragevariante 1) 119

8.32. *links:* Verlauf des Wärmeangebots des BHKW und der Gasheizung für das Einfamilienhaus der Nachfragevariante 1 bei bestem Dämmstandard (Passivhausstandard) für die fünf Repräsentanten ; *rechts:* Dämmstandard (iii). 119

8.33. *links:* Verlauf des BHKW- und Netzstroms des Einfamilienhauses der Nachfragevariante 1 bei bestem Dämmstandard (Passivhausstandard) für die drei Repräsentanten I, II und V (kältester Tag, Kaltwintertag und Sommertag). Für die Repräsentantern III und IV (Wintertag und Übergangstag) ergab sich die gleiche Fahrweise wie für Repräsentant II; *rechts:* Dämmstandard (iii). 120

8.34. kostenoptimale Stromproduktion des BHKW der gerechneten Szenarien in Abhängigkeit der Warmwassernachfrage der Bewohner. Als linearer Trend lässt sich eine Stromproduktion von 0,7 kWh pro nachgefragter kWh warmes Wasser erkennen. 121

8.35. *links:* installierte BHKW-Kapazität (elektrisch) in Abhängigkeit der Warmwassernachfrage in kWh pro Tag. Dabei sind sowohl die Daten dieses Kapitels (blaue Kreuze) als auch die des Kapitels über die Gebäudegröße (rote Kreise) verwendet worden; *rechts:* Anteil des vom BHKW erzeugten Stromes am Gesamtstrombedarf in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Warmwasser- und Stromnachfrage. 122

8.36. *links:* Kapazitäten in elektrischer Leistung der Blockheizkraftwerkinstallation für eine „normale“, um 33 % und um 100 % erhöhte Warmwassernachfrage für die Gebäude EFH und MFH6 für den Dämmstandard (i); *rechts:* BHKW-Kapazität [kW_{el}] für das Mehrfamilienhaus 26 mit Dämmstandard (i) bzw. (ii). 123

8.37. *links:* Auslastung der installierten Blockheizkraftwerke für die drei Warmwassernachfragen; *rechts:* marginale Kosten für Strom-, Raumwärme- und Warmwassernachfrage für das Gebäude MFH26 (ii) bei um 100 % erhöhter Warmwassernachfrage. 124

8.38. *links:* Bereitstellung der nachgefragten Wärme durch die Prozesse Gasheizung und BHKW des MFH26 (Nachfrage 1) mit Dämmstandard (ii) bei der Warmwassernachfrage wie in Kapitel 8.2; *rechts:* Bereitstellung der Wärme bei verdoppelter Warmwassernachfrage. 125

8.39. *links:* Bereitstellung des nachgefragten elektrischen Stroms für die Repräsentanten I, II und V (III und IV entsprechen dem Verlauf von II) durch die Prozesse Netzanschluss und BHKW des MFH26 (Nachfrage 1) mit Dämmstandard (ii) bei der Warmwassernachfrage wie in Kapitel 8.2; *rechts:* Bereitstellung des Stroms bei verdoppelter Warmwassernachfrage (weinroter Anteil entspricht Stromverkauf). 125

8.40. *links:* Anteil der von der Gasheizung und vom BHKW erbrachten Wärmemenge pro Tag in Abhängigkeit des Typtags (vergleiche Abbildungen 6.18 *links* und 8.18 *links*); *rechts:* Anteil der vom Netzanschluss und vom BHKW erbrachten Strommenge pro Tag in Abhängigkeit des Typtags (vergleiche Abbildungen 6.18 *rechts* und 8.18 *rechts*). . . 126

8.41. *links:* Bereitstellung des nachgefragten Stroms für die Nachfragevariante 1 durch die Prozesse Netzanschluss und BHKW des EFH mit Dämmstandard (i) und einer doppelten Warmwassernachfrage wie in Kapitel 8.2; *rechts:* Bereitstellung des nachgefragten Stromes für Nachfragevariante 2 (Verkauf an den Netzbetreiber, weinroter Anteil). . . 126
8.42. *links:* Strombedarf der Bewohner und netto Strombezug aus dem Netz für das Gebäude MFH26 Dämmstandard (ii) und „normalen“ Warmwasserverbrauch (Nachfragekurve 1); *rechts:* Strombedarf und netto Strombezug für das Gebäude MFH26 Dämmstandard (ii) mit doppeltem Warmwasserverbrauch (Nachfragekurve 1). 127
8.43. Verlauf der Strombereitstellung durch das BHKW (weinroter Anteil entspricht ans Netz verkauften Strom) und einen Netzanschluss; *links:* ohne Batterie *rechts:* mit Batterie (Repräsentant I, II und V; Repräsentante III und IV entsprechen Repräsentant II. . . 129
8.44. *links:* Wärmebereitstellung des BHKW und der Wärmepumpe; *rechts:* Wärmebereitstellung des BHKW, der Wärmepumpe und der Gasheizung. 131
8.45. *links:* Strombereitstellung des BHKW und des Netzanschlusses (Szenario **N+BHKW+WP**); *rechts:* Strombereitstellung (Szenario **N+G+BHKW+WP**). 132
8.46. *links:* Netto-Strombezug aus dem Stromnetz im Vergleich mit dem Strombedarf der Bewohner (Szenario **N+G+BHKW+WP)**; *rechts:* Marginale Kosten der Nachfragen Raumwärme und Strom des Szenarios **N+G+BHKW+WP**. 132
8.47. Verlauf der Stromproduktion und des Stromverkaufs des BHKW und der Strombezug aus dem Netz für Nachfrage 1 (*links:*) und für Nachfrage 2 (*rechts:*). 133

9.1. *links:* schematischer Energiefluss in Kraftwerken zur Stromproduktion ohne die Nutzung der frei werdenden Wärme (ohne Kraft-Wärme-Kopplung); *rechts:* schematischer Energiefluss in Kraftwerken, in denen neben dem generierten Strom auch die erzeugte Wärme genutzt wird. *Quelle:* Stadtwerke Karlsruhe. 135

A.1. Modellhäuser 153
A.2. Temperaturverlauf und Globalstrahlung Typtag I (kältester Tag), 1.3.2005. 155
A.3. Temperaturverlauf und Globalstrahlung Typtag II (Kaltwintertag). 155
A.4. Temperaturverlauf und Globalstrahlung Typtag III (Wintertag). 155
A.5. Temperaturverlauf und Globalstrahlung Typtag IV (Übergangstag). 156
A.6. Temperaturverlauf und Globalstrahlung Typtag V (Sommertag). 156

Tabellenverzeichnis

0.1. Abkürzungen und Symbole. 3

3.1. Stromverbrauch pro Jahr je Haushalt und spezifischer Stromverbrauch pro m^2 pro Jahr je Haushalt in Abhängigkeit der Anzahl an Haushalten pro Wohngebäude (nur Haushalte ohne Elektrospeicheröfen). *Quelle:* M. Barbosa (2004) Tabelle 2.2-18. 12
3.2. Durchschnittlicher Stromverbrauch pro Jahr je Haushalt und durchschnittlicher spezifischer Stromverbrauch pro m^2 und pro Jahr in Abhängigkeit der Anzahl an Personen eines Haushalts (nur Haushalte ohne Elektrospeicheröfen). *Quelle:* M. Barbosa (2004) Tabelle 2.2-19. 12
3.3. Gas- und Ölverbrauch pro Jahr je Haushalt und spezifischer Gas- und Ölverbrauch pro m^2 pro Jahr je Haushalt in Abhängigkeit der Anzahl an Haushalten pro Wohngebäude. *Quelle:* M. Barbosa (2004) Tabelle 2.2-20 und Tabelle 2.2-22. 16

5.1. Strompreise der Stadtwerke Augsburg (*vgl.* Stadtwerke Augsburg [b]) seit dem 1.1.2005. Tarif I für Jahresverbrauche kleiner 2113 kWh; darüber Tarif II. 37
5.2. Netzanschluss. 38
5.3. Photovoltaikanlage und Wechselrichter. 40
5.4. Gasheizung. 41
5.5. Pelletheizung. 43
5.6. Solarkollektor. 43
5.7. Wärmepumpe. Sämtliche Kosten beziehen sich auf die aufgenommene elektrische Energie. 45
5.8. Akkumulatoren. 47
5.9. Warmwasserspeicher. 47
5.10. Blockheizkraftwerk. 49
5.11. Hilfsprozesse zur Modellierung und Optimierung. 50
5.12. Prozesse zur Modellierung und Optimierung. 50

6.1. Strom- und Wärmenachfrage in kWh pro Quadratmeter Wohnfläche und pro Jahr. . . 63
6.2. Stromnachfrage der Bewohner, Stromangebot durch das BHKW und der daraus resultierende Stromüberschuss in kWh pro Quadratmeter und Jahr in Abhängigkeit der Anzahl der Familien in einem Gebäude. 64
6.3. Primärenergiebedarf, CO_2 Emission und Kosten der drei Szenarien. [a]: unter Berücksichtigung des Stromverkaufs [b]: bei 3500 Volllaststunden des BHKW. 66
6.4. Kosten für Wärme und Strom (bei 5000 Volllaststunden des BHKW und 2000 Volllaststunden der Gasheizung). 69

7.1. Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein verschiedener elektrischer Geräte in einem Haushalten Abhängigkeit der Bewohnerzahl des Haushalts. 73
7.2. Anzahl der verschiedenen Bewohnertypen in den jeweiligen Haushalten und Unterscheidung der Haushalte, in denen die Hausarbeit wie Kochen und Wäsche waschen hauptsächlich unter Tags bzw. am Abend erledigt wird. 75
7.3. Durchschnittlicher Energiebedarf aus je 100 generierten Haushalten. 78
7.4. Zu sehen sind der Anteil der jeweiligen Haushalte, der Jahresstromverbrauch nach Statistik und nach Monte Carlo Methode und die Abweichung beider Energien von einander. Da keine 5 Personenhaushalte modelliert wurden, wurden diese bei der Ermittlung des durchschnittlichen Energiebedarfs nicht berücksichtigt. 78
7.5. Zu sehen ist die mittlere Auslastung von 100 Haushalten pro Haushaltstyp, sowie deren maximale und minimale Auslastung. Weiter sind die Standardabweichung und die relative Standardabweichung angegeben. 80
7.6. Zu sehen ist die mittlere Auslastung von $26 \leq n \leq 100$ Haushalten, sowie die Standardabweichung und die relative Standardabweichung. 81
7.7. U-Werte der Fenster einschließlich Rahmen. *Quelle:* K. Schneider (2002). 82
7.8. U-Werte in $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}$ der verschiedenen Standards. 82
7.9. Luftwechselraten der unterschiedlichen Gebäudestandards 86
7.10. Richtungsaufgelöste DIN-Werte für die gesamte Jahresglobalstrahlung, deren Anteil an der Gesamtstrahlung (*Quelle:* K. Schneider (2002)) und der richtungsaufgelöste, angenommene Anteil der Fensterflächen an der Gesamtfensterfläche für die Gebäudemodelle. 86
7.11. Die solaren Gewinne pro Quadratmeter Fensterfläche betragen 0,105 kW je kW eingestrahltes $\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m^2}}$ Globalstrahlung. 87
7.12. Durchschnittstemperaturen, relative Häufigkeiten und Gewichte der 5 Repräsentanten 88
7.13. Statistische Werte für die Größe von Haushalten in Abhängigkeit der Gebäudegröße. . 90
7.14. Eigenschaften des Gebäudetyps Einfamilienhaus. Nach Tabelle 7.13 ergibt sich die Anzahl der Personen im Haus zu 3. Diese wurde allerdings als 4 angenommen, da in den späteren Modellierungen Einfamilienhäuser als Gebäude mit hohem spezifischen Stromverbrauch gelten sollen. 90
7.15. Verlustleistung der einzelnen Komponenten des Gebäudetyps Einfamilienhaus für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii) in $\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{K}}$. 90
7.16. Anzahl der Personen und Haushaltstypen im Gebäude EFH. 91
7.17. Eigenschaften des Gebäudetyps Zweifamilienhaus. 91
7.18. Verlustleistung des Gebäudetyps Zweifamilienhaus für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii) in $\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{K}}$. 91
7.19. Anzahl der Personen und Haushaltstypen im Gebäude ZFH. 92
7.20. Eigenschaften des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 3. 92
7.21. Verlustleistung des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 3 für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii) in $\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{K}}$. 92
7.22. Anzahl der Personen und Haushaltstypen im Gebäude MFH 3. 92
7.23. Eigenschaften des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 6. 93

7.24. Verlustleistung des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 6 für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii) in $\frac{kW}{K}$. 93
7.25. Anzahl der Personen und Haushaltstypen im Gebäude MFH 6. 93
7.26. Eigenschaften des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 12. 94
7.27. Verlustleistung des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 12 für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii) in $\frac{kW}{K}$. 94
7.28. Anzahl der Personen und Haushaltstypen im Gebäude MFH12. 94
7.29. Eigenschaften des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 26. 95
7.30. Verlustleistung Gebäudetyps Mehrfamilienhaus 26 für die drei Dämmstandards (i), (ii) und (iii) in $\frac{kW}{K}$. 95
7.31. Anzahl der Personen und Haushaltstypen im Gebäude MFH26. 95

8.1. Energiebezugskosten der verschiedenen Nachfragekurven in Abhhängigkeit des Prozesses und der Fahrweise. 99
8.2. Jahresenergiebedarf für Strom und Warmwasser in Abhängigkeit der drei Nachfragekurven. 99
8.3. jährliche Kosten der verschiedenen Szenarien in Abhängigkeit der Nachfragekurven 1, 2 und 3 und durchschnittliche Kosten und CO_2-Emissionen der drei Nachfragen 102
8.4. Installierte Kapazität der Batterien in Abhängigkeit der Nachfragekurve im Szenario **G+BHKW** 106
8.5. Gesamtkosten für die sechs Häuser und zwei Straßen für die beiden Versorgungsvarianten **N+G** und **N+G+BHKW**, installierte BHKW-Kapazitäten in elektrischer Leistung und Kostenersparnis pro Jahr unter Benutzung des Blockheizkraftwerks. . . . 113
8.6. Auslastung der Stromnachfrage und Anteil der vom BHKW erzeugten Wärme und Strom am Jahreswärme- bzw. Jahresstrombedarf. 114
8.7. CO_2-Emission der verschiedenen Szenarien mit den Versorgungsvarianten **N+G** und **N+G+BHKW** im Vergleich. 116
8.8. Kapazitäten des BHKW und der Gasheizung und der Anteil der vom BHKW erbrachten Wärme und des Stroms am Wärme- bzw. Strombedarf der Gebäude 118
8.9. jährlicher Anteil der Wärmemenge des BHKW die zur Warmwasseraufbereitung genutzt wird. 120
8.10. jährlicher Anteil der Wärmemenge der Gasheizung am Raumwärmebedarf. 120
8.11. Anteil des Warmwasserbedarf und der vom BHKW zur Verfügung gestellten Wärme am gesamten Wärmebedarf, sowie der Anteil des BHKW-Stroms am gesamten Strombedarf. 122
8.12. Anteil des Strombedarfs am Gesamtenergiebedarf für die Tage mit Raumwärmebedarf (Repräsentanten I - IV) und für den Sommertag (Repräsentant V) in Prozent. 123
8.13. durchschnittlicher Anteil des BHKW-Stroms am Strombedarf des Modellgebäudes MFH26 (ii) für die fünf Repräsentanten in Abhängigkeit der Warmwassernachfrage. 124
8.14. Anteil des BHKW-Stroms am Strombedarf des Modellgebäudes EFH (i) für die fünf Repräsentanten in Abhängigkeit der Warmwassernachfrage. 125
8.15. Auslastung des elektrischen Netzanschlusses in Volllaststunden für die unterschiedlichen Warmwassernachfragen. 126

8.16. spezifische Kosten der Szenarien pro kWh Warmwasser in Cent/kWh. 127
8.17. CO_2-Emission der Szenarien in t/a in Abhängigkeit der Warmwassernachfrage. 127
8.18. spezifische CO_2-Emission für die zusätzliche Warmwassernachfrage. 128
8.19. Stromkosten für die folgenden Szenarien. 128
8.20. durchschnittliche jährliche Gesamtkosten der Szenarien in €/a in Abhängigkeit der installierten Prozesse. 129
8.21. durchschnittliche Auslastung des Netzanschlusses der Gebäude bei den unterschiedlichen Szenarien. 129
8.22. auf Energie bezogene Kosten für Strom für die verschiedenen Szenarien und Gebäude in Cent/kWh. 130
8.23. CO_2-Emission des Szenarios **N+G** und die CO_2-Emissionminderung zu diesem Szenario in Prozent. 130
8.24. Jährliche Kosten und Minderung der jährlichen Kosten im Vergleich zum Szenario mit Netzanschluss und Gasheizung für das MFH26 (ii). 131
8.25. Installierte BHKW-Kapazität in elektrischer Leistung und Auslastung des BHKW in Volllaststunden in Abhängigkeit der erlaubten Prozesse. 131
8.26. CO_2-Emission und Minderung der CO_2-Emission im Vergleich zum Szenario mit Netzanschluss und Gasheizung für das MFH26 (ii). 132

A.1. PV-Anlagen. *Quelle:* Solarshop ^{PV} 149
A.2. Wechselrichter. *Quelle:* Solarshop ^{LR} 149
A.3. Gasheizungen 150
A.4. Pelletheizungen. 150
A.5. Sonnenkollektoren. *Quelle:* Solarshop 151
A.6. Wärmepumpen. 151
A.7. Akkumulatoren. *Quelle:* Solarshop. 152
A.8. Warmwasserspeicher. Angenommener Temperaturhub: 30°C. 152

A. Anhang

A.1. Daten zu den Prozessen

A.1.1. PV-Anlage

Folgende PV-Anlagen wurden als Grundlage genommen:

Anlage	Peakleist. [kW]	Setpreis [Euro]	Preis Wechselrichter [Euro]	Preis [Euro]	spez. Peakleist. [W_P/m^2]	Preis/Peakleist. [Euro/kW_P]
Sharp	10.50	53714	5738	47976	131	4569
Kyocera	3.75	19314	2219	17095	125	4559
Kyocera	5.50	28200	2833	25367	131	4612
Sharp	5.60	28842	2833	26009	130	4645
conergy	6.60	33840	3218	30621	120	4640

Tabelle A.1.: PV-Anlagen. *Quelle:* Solarshop [PV]

Hierbei berechnet sich der Preis aus den Kosten für das jeweilige Set abzüglich der Kosten für den Wechselrichter, da dieser als eigenständiger Prozess gehandhabt wird.

Typ	Preis [Euro]	Leistung [W]	Preis/Leistung [Euro/kW]
Solar - Laderegler Alpha	62	96	646
Solar - Laderegler Gamma	73	144	507
Solar - Laderegler Omega	119	360	331
Solar - Laderegler PR 0303	45	36	1250
Solar - Laderegler PR 0505	52	60	867
Solar - Laderegler Sigma	99	240	413
1a Laderegler Steca PR 1010 / 10 A	109	120	908
1a Laderegler Steca PR 1515 / 15 A	129	180	717
1a Laderegler Steca PR 2020 / 20 A	149	240	621
1a Laderegler Steca PR 3030 / 30 A	159	360	442

Tabelle A.2.: Wechselrichter. *Quelle:* Solarshop [LR]

A.1.2. Gasheizung

Model	Kapazität kW	Preis €	Preis/Kap €/kW
Typ KBR3-16 A	16	3426	214.13
CGB-20 mit CSW-120	20.5	2350	114.63
SBK 5/SBK B5 Diematic	29.7	4467	150.40
Ultron	21	3250	154.76
Renda Calor	23	3612	157.04
Econfloor 27 A	26.8	3100	115.67
Rotex A1 BG 40i	40	5679	141.98
Vitocrossal	27	5045	186.85
TGK 24-TB/155	25	4480	179.20
Cerasmart ZWB 7-26 A	21.8	3095	141.97
Thision	24	2600	108.33
ProCon GWB 25	25	3000	120.00
Econpact 20-1 C	26.8	2800	104.48
Quinta Combi	28.5	3800	133.33
BK 13 WK-24	28.5	2950	103.51
ecoTec classic VCW 246	25.8	3425	132.75

Tabelle A.3.: Gasheizungen

A.1.3. Pelletheizungen

Modell	Wirkungsgrad	Kapazität kW	Preis €	Preis/Kap €/kW
Buderus Logano SP251		15.0	10940	729.33
Buderus Logano SP251		25.0	11755	470.20
VITOLIG 100		14.9	2297	154.16
VITOLIG 300		15.0	6899	459.93
Ederheizung Pallevent 17	91.2	16.7	9097	544.73
biothech PZ8RL	96.3	13.5	8295	614.44
Buderus Logano SP 241-15L	90.5	15.0	11095	739.67
Twist 80/20	95.1	10.0	6528	652.80
Entech PK 15-V2002	94.7	14.9	10243	687.45
Froeling P2	91.0	14.9	8759	587.85
Guntamatic Biostar 15	93.3	15.0	8212	547.47
Hargassner	94.1	16.8	7500	446.43
Herzfeuerung Pelletstar 15	96.3	15.0	8846	589.73
Hoval BioLyt	94.0	15.0	8609	573.93
KWB USP 15	91.0	14.9	8350	560.40
Ökofen Pelletmatic 20	90.0	20.0	9423	471.15
Ökofen Pelletmatic Plus	99.0	15.0	10128	675.20
Biomat PK-V15	91.9	14.9	7575	508.41
Biomat Kombi V 15	87.1	16.0	8250	515.63
Sol-ution SOList 15	88.5	15.0	9872	658.13
Sht thermocomfort PN15	93.2	15.0	8964	597.60
Windhager PMX 150K	91.3	14.9	8227	552.15

Tabelle A.4.: Pelletheizungen.

A.1.4. Sonnenkollektoren

Anlage	Fläche m^2	Peakleistung kW	Preis €	Preis/Leistung €/kW$_P$
Sunset SolarKoll	8.2	6.0	3899	649,833
Sunset SolarKoll	14.3	10.5	5149	490,381
solarshop komfort1	8.2	5.9	3578	609,001
solarshop komfort2	10.2	7.3	4437	604,167
solarshop start	4.1	3.0	2557	866,192

Tabelle A.5.: Sonnenkollektoren. *Quelle:* Solarshop

A.1.5. Wärmepumpe

Modell	Wärmeleistung [kW]	Leistungszahl	Preis [€]
AWP Wärmep. AWWW81	10.6	5.5	7500
AWP Wärmep. AWWW111	10.9	4.5	7700
Bartl W WB 2 CF/W	10.1	5.3	12500
Bartl W Eco 4 S	11.7	5.1	12000
Dimplex KKW Kulmb. SI 9 CS	9.2	4.4	6380
Hautec Carno W HCW-PN-26-H	7.8	4.9	5034
Hautec Carno W HCS-PN-37-S	8.1	4.3	5417
Statag Thermotechnik WW 104	6.3	4.8	6250
Statag Thermotechnik BW 106	6.4	4.0	6100
Schrag CWP WW 1-10	12.6	4.0	5405
Schrag CWP SW 1-10	11.2	4.0	5405
Stiebel Eltron WPF 5	7.2	4.9	8740
Stiebel Eltron WPF 7	7.8	4.3	10650
Viessmann Werke Vitocal 300 WW 106	8.4	5.1	10198
Viessmann Werke Vitocal 343	6.0	4.1	8420
BUDERUS WPS 70 IK	6.9		7923
BUDERUS WPS 90 IK	9.2		8352
BUDERUS WPS 120 IK	11.8		9019
BUDERUS WPS 140 IK	15.5		9645
BUDERUS WPS 50 ?	5.3		8368
BUDERUS WPS 70 ?	6.9		8731
BUDERUS WPS 90 ?	9.2		9230
BUDERUS WPS 120 ?	11.8		9824
BUDERUS WPS 140 ?	14.5		10663
BUDERUS WPS 160 ?	17.1		11360
BUDERUS WPS 210 ?	21.1		12718

Tabelle A.6.: Wärmepumpen.

A.1.6. Akkumulatoren

Hersteller	Kapazität [kWh]	Preis [€]	Preis/Kap [€/kWh]
DELTA Solar	1.3	129	102.38
DELTA Solar	1.0	135	132.35
Moll	1.2	169	140.83
Moll	1.6	209	133.97
Moll	0.7	149	206.94
Solarbatterie	1.3	149	118.25
Solarbatterie	3.1	369	120.59
Sonnenschein dryfit Solar S!”	1.6	279	178.85
4OPZS200 - 12VOLT 200 AH/C10	2.4	726	302.50
5OPZS250 - 12VOLT 250 AH/C10	3.0	826	275.33
6OPZS300 - 12VOLT 300 AH/C10	3.6	976	271.11
6OPZS600 - 12VOLT 600 AH/C10	7.2	1453	201.81
8OPZS800 - 12VOLT 800 AH/C10	9.6	2052	213.75
10OPZS1000 - 12VOLT 1000 AH/C10	12.0	2392	199.33
12OPZS1200 - 12VOLT 1200 AH/C10	14.4	2604	180.83
12OPZS1500 - 12VOLT 1500 AH/C10	18.0	3114	173.00
15OPZ1875 - 12VOLT 1875 AH/C10	22.5	4206	186.93
16OPZS2000 - 12VOLT 2000 AH/C10	24.0	4308	179.50
TYP 20OPZS2500 - 12VOLT 2500 AH/C10	30.0	5370	179.00
24OPZS3000 - 12VOLT 3000 AH/C10	36.0	6240	173.33
24OPZS3000 - 24 VOLT 3000 AH/C10	72.0	12480	173.33
24OPZS3000 - 48 VOLT 3000 AH/C10	144.0	24960	173.33

Tabelle A.7.: Akkumulatoren. *Quelle:* Solarshop.

A.1.7. Warmwasserspeicher

Firma	Bezeichnung	Inhalt [l]	Preis [€]	Kapazität [kWh]	Preis/kWh [€/kWh]
Höhne	HBSE TOP	120	434	4.2	103.54
Höhne	HBSE TOP	150	464	5.2	88.59
Höhne	HBSE TOP	200	507	7.0	72.59
Höhne	HBSE TOP	300	625	10.5	59.69
Höhne	HBSE TOP	400	759	14.0	54.32
Buderus	WWSP300	285	1515	10.0	152.24
Buderus	WWSP400	350	1805	12.2	147.70
Buderus	WWSP500	430	2080	15.0	138.54
Viessmann	Vitocell	160	630	5.6	112.77
Viessmann	Vitocell	200	650	7.0	93.08
Viessmann	Vitocell	300	860	10.5	82.10
Viessmann	Vitocell	500	1470	17.5	84.20
Viessmann	Vitocell	750	2570	26.2	98.14
Viessmann	Vitocell	1000	3120	34.9	89.36
Viessmann	Vitocell W	120	675	4.2	161.10
Viessmann	Vitocell W	150	730	5.2	139.38

Tabelle A.8.: Warmwasserspeicher. Angenommener Temperaturhub: 30°C.

A.2. Gebäudemodelle

		EFH (i)	EFH (ii)	EFH (iii)	DH (i)	DH (ii)	DH (iii)	Mehrfamilienhaus 3 (i)	Mehrfamilienhaus 3 (ii)	Mehrfamilienhaus 3 (iii)	Mehrfamilienhaus 6 (i)	Mehrfamilienhaus 6 (ii)	Mehrfamilienhaus 6 (iii)	Mehrfamilienhaus 12 (i)	Mehrfamilienhaus 12 (ii)	Mehrfamilienhaus 12 (iii)	Mehrfamilienhaus 26 (i)	Mehrfamilienhaus 26 (ii)	Mehrfamilienhaus 26 (iii)
Länge	m	10	10	10	13	13	13	12	12	12	15	15	15	25	25	25	40	40	40
Breite	m	9	9	9	11	11	11	9	9	9	11	11	11	12	12	12	12	12	12
Höhe	m	8.5	8.5	8.5	9.5	9.5	9.5	11.2	11.2	11.2	12.2	12.2	12.2	12.7	12.7	12.7	15.4	15.4	15.4
Wandanteil		0.2	0.2	0.2	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Raumhöhe	m	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Stockwerke		2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4
Energiebezugsfläche	m²	144	144	144	234.52	234.52	234.52	268.92	268.92	268.92	415.8	415.8	415.8	765	765	765	1632	1632	1632
Grundfläche	m²	90	90	90	143	143	143	108	108	108	165	165	165	300	300	300	480	480	480
Fensteranteil		0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
Wandfläche	m²	168	168	168	221	221	221	282	282	282	358	358	358	497	497	497	918	918	918
Fensterfläche	m²	24	24	24	32	32	32	40	40	40	51	51	51	71	71	71	131	131	131
Dachfläche	m²	127	127	127	202	202	202	153	153	153	233	233	233	424	424	424	679	679	679
Luftvolumen	m³	360	360	360	586	586	586	672	672	672	1040	1040	1040	1913	1913	1913	4080	4080	4080
Wohnfläche/Person	m²/pers	56.2	56.2	56.2	51.1	51.1	51.1	49.5	49.5	49.5	45.7	45.7	45.7	44	44	44	44	44	44
Fläche je Wohnung	m²	128.8	128.8	128.8	106.3	106.3	106.3	83.2	83.2	83.2	69.8	69.8	69.8	63.7	63.7	63.7	63.7	63.7	63.7
Personen je Wohnung		2.71	2.71	2.71	2.44	2.44	2.44	2.02	2.02	2.02	1.81	1.81	1.81	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
Wohnungen im Haus		1	1	1	2	2	2	3	3	3	6	6	6	12	12	12	26	26	26
Personen im Haus		4	4	4	5	5	5	7	7	7	11	11	11	20	20	20	43	43	43
U-Wert Boden	W/m²K	0.395	0.562	1.727	0.395	0.562	1.727	0.395	0.562	1.727	0.395	0.562	1.727	0.395	0.562	1.727	0.395	0.562	1.727
U-Wert Wand	W/m²K	0.235	0.872	1.435	0.235	0.872	1.435	0.235	0.872	1.435	0.235	0.872	1.435	0.235	0.872	1.435	0.235	0.872	1.435
U-Wert Fenster	W/m²K	1.300	1.800	2.600	1.300	1.800	2.600	1.300	1.800	2.600	1.300	1.800	2.600	1.300	1.800	2.600	1.300	1.800	2.600
U-Wert Dach	W/m²K	0.179	0.231	0.509	0.179	0.231	0.509	0.179	0.231	0.509	0.179	0.231	0.509	0.179	0.231	0.509	0.179	0.231	0.509
g-Wert		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Luftwechselrate	1/h	0.30	0.35	0.40	0.30	0.35	0.40	0.30	0.35	0.40	0.30	0.35	0.40	0.30	0.35	0.40	0.30	0.35	0.40
Verlust Boden	kW/K	0.036	0.051	0.155	0.056	0.080	0.247	0.043	0.061	0.187	0.065	0.093	0.285	0.119	0.169	0.518	0.190	0.270	0.829
Verlust Wand	kW/K	0.040	0.147	0.242	0.052	0.193	0.317	0.066	0.246	0.404	0.084	0.312	0.513	0.117	0.433	0.713	0.216	0.801	1.318
Verlust Fenster	kW/K	0.031	0.043	0.063	0.041	0.057	0.082	0.052	0.072	0.105	0.066	0.092	0.133	0.092	0.128	0.185	0.171	0.236	0.341
Verlust Dach	kW/K	0.023	0.029	0.065	0.036	0.047	0.103	0.027	0.035	0.078	0.042	0.054	0.119	0.076	0.098	0.216	0.122	0.157	0.346
Verlustleistung Trans.	kW/K	0.129	0.270	0.524	0.186	0.377	0.749	0.188	0.414	0.773	0.257	0.551	1.050	0.403	0.828	1.632	0.697	1.464	2.834
Verlustleistung Lüftung	kW/K	0.036	0.042	0.048	0.058	0.068	0.077	0.067	0.078	0.089	0.103	0.120	0.137	0.189	0.221	0.252	0.404	0.471	0.539
Verlustleistung	kW/K	0.165	0.312	0.572	0.244	0.444	0.826	0.255	0.492	0.862	0.360	0.671	1.187	0.593	1.048	1.884	1.101	1.935	3.372
spez. solare Gewinne	kW/kW	2.53	2.53	2.53	3.31	3.31	3.31	4.22	4.22	4.22	5.37	5.37	5.37	7.45	7.45	7.45	13.78	13.78	13.78
Heizwärme Feis	kWh/m²	66	151	268	59	130	234	54	128	220	49	111	193	43	93	163	37	80	138

Abbildung A.1.: Modellhäuser

$$h = (St - 1) * (2,5\text{m} + 0,2\text{m}) + 0,3\text{m} + 1,0\text{m}_{\text{Traufhoehe}} + \frac{1}{2}b_{\text{ Firsthoehe ab Traufe}} \tag{A.1}$$

Die Höhe h der Gebäude ergibt sich aus der Anzahl der Stockwerke St und der Breite b des Gebäudes. (2,5 m = Raumhöhe; 0,2 m = Deckenhöhe; 0,3 m = Bodenplattendicke; 1,0 m = Kniestock; $\frac{1}{2}b$ = Firsthöhe ab Traufe).

$$A_N = l\ b\ St\ (1 - A_W) \tag{A.2}$$

A_N = Energiebezugsfläche; l und b sind Länge und Breite der Modellgebäude; A_W = Wandanteil am Gesamtvolumen.

A.3. Strommodelle

$$P_{\text{Modell } i} = P_{\oslash\ i}\ (Rnd + 0,5) \tag{A.3}$$

mit Rnd = Zufahlszahl zwischen 0 und 1; $P_{\text{Modell } i}$ ist die Leistung des Geräts i; $P_{\oslash\ i}$ ist die durchschnittliche Leistung der Geräte des Typs i; $i \in$ {Fernseher, Computer, Licht, Fön, Waschmaschine, ... }.

A.4. Typtage (Wetterrepräsentanten)

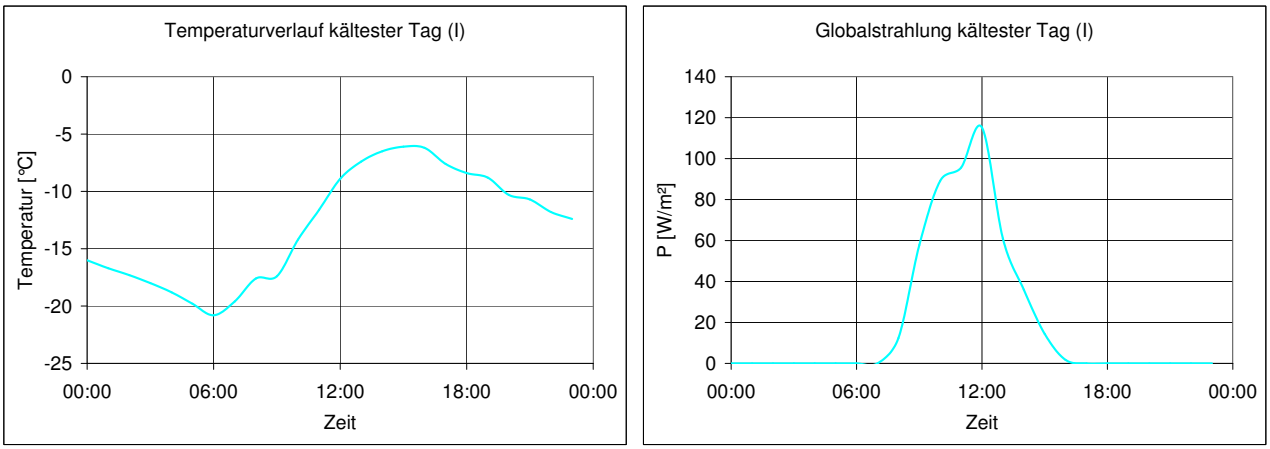


Abbildung A.2.: Temperaturverlauf und Globalstrahlung Typtag I (kältester Tag), 1.3.2005.

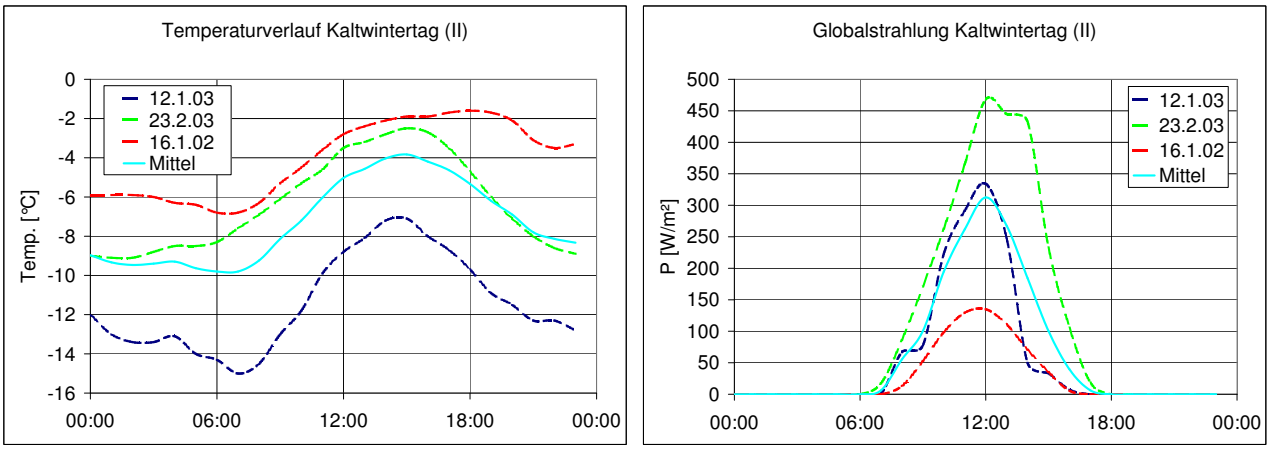


Abbildung A.3.: Temperaturverlauf und Globalstrahlung Typtag II (Kaltwintertag).

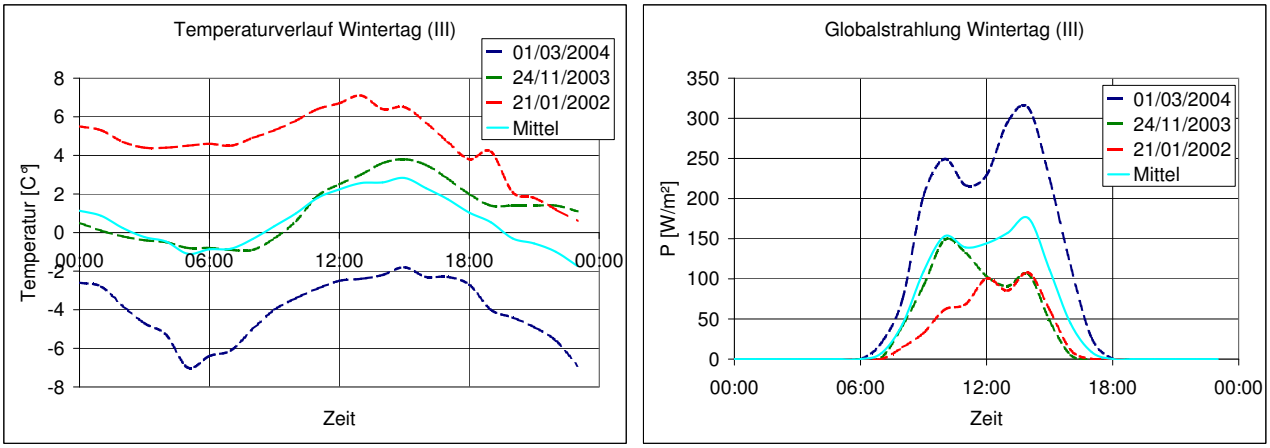


Abbildung A.4.: Temperaturverlauf und Globalstrahlung Typtag III (Wintertag).

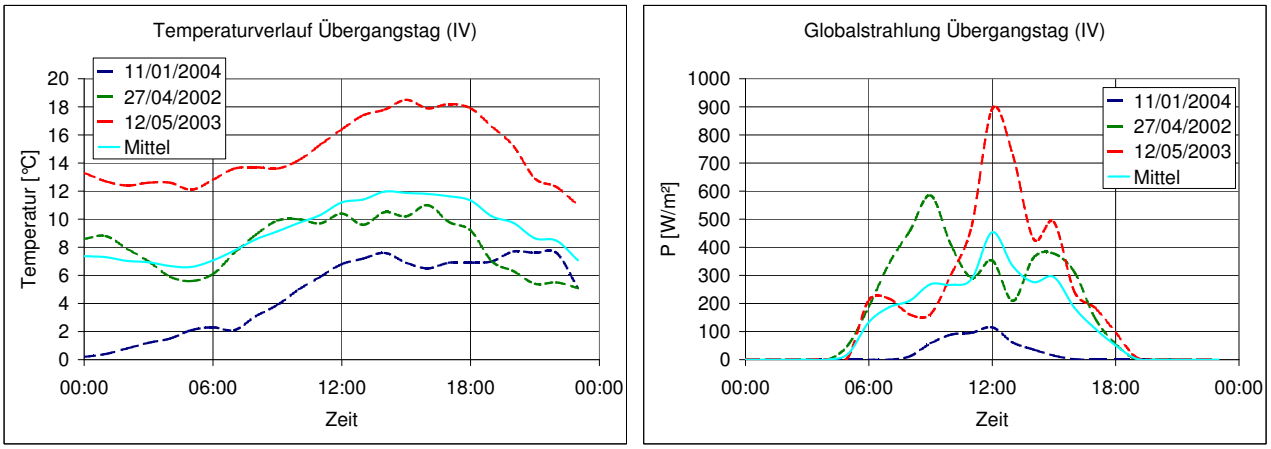


Abbildung A.5.: Temperaturverlauf und Globalstrahlung Typtag IV (Übergangstag).

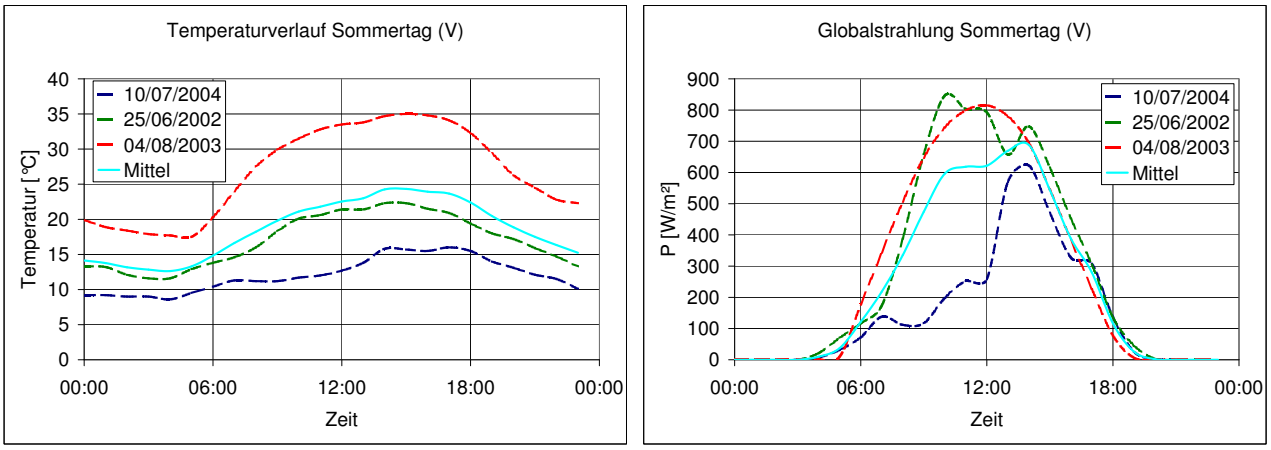


Abbildung A.6.: Temperaturverlauf und Globalstrahlung Typtag V (Sommertag).