



Masterarbeit

# Kombination von Kraft-Wärme-Kopplung und Solarthermie in Mehrfamilienhäusern

Alois Wenninger

Oktober 2015

Hochschule Kempten

Studiengang Energietechnik

Prüfer:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Mayer

Prof. Dr.-Ing. Bernd Biffar

Betreuer:

Dipl.- Ing. (FH) Daniel Beckenbauer

Dr.-Ing. Michael Klärner

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzzusammenfassung .....</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Nomenklatur.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen Solarthermie und Kraft-Wärme-Kopplung .....</b>	<b>3</b>
2.1 Solarthermische Wärmeversorgung .....	3
2.2 Energieversorgung durch Kraft-Wärme-Kopplung .....	6
2.2.1 Motor-Blockheizkraftwerk.....	8
2.2.2 Stirling-Motor.....	9
2.2.3 Brennstoffzelle .....	10
2.2.4 Mikrogasturbine.....	11
<b>3 Simulation in Matlab/Simulink .....</b>	<b>13</b>
3.1 CARNOT-Blockset .....	13
3.2 Definition Mehrfamilienhaus.....	15
3.3 Modellierung KWK-Anlage .....	16
3.4 Modell Wärmeversorgung Mehrfamilienhaus .....	24
3.4.1 Gebäudeheizung .....	25
3.4.2 Warmwasserbereitung.....	27
3.4.3 Solaranlage .....	29
3.4.4 BHKW.....	30
3.4.5 Spitzenlastkessel .....	31
3.4.6 Wärmespeicher.....	33
3.4.7 Heizkreisverteiler .....	34
3.4.8 Stromverbrauch .....	35

<b>4</b>	<b>Parametervariation und Optimierung Anlage .....</b>	<b>36</b>
4.1	Simulation verschiedene Varianten .....	36
4.1.1	Auswahl Mehrfamilienhaus .....	36
4.1.2	Auswahl Parameter Gesamtmodell .....	38
4.1.3	Jahreslastgang und Jahresdauerlinie .....	45
4.1.4	Variation Wärmeerzeuger und Wärmespeicher .....	48
4.2	Energetische Optimierung der Anlage .....	51
4.3	Ökonomische Optimierung der Anlage .....	55
4.3.1	Kosten und Einnahmen .....	56
4.3.2	Wirtschaftlichkeitsberechnung .....	62
<b>5</b>	<b>Darstellung und Bewertung Ergebnisse .....</b>	<b>66</b>
5.1	Energetische Bewertung .....	66
5.2	Ökonomische Bewertung .....	69
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>70</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>72</b>
	<b>Erklärung und Ermächtigung.....</b>	<b>77</b>

### Kurzzusammenfassung

Ein Ziel der Energiewende ist es, den Anteil erneuerbarer Energie im Wärmebereich zu steigern. In Wohngebäuden ist Solarthermie eine Möglichkeit dies voran zu bringen. Die fluktuierende Wärmeproduktion einer Solarthermie-Anlage muss dabei durch Speicher oder eine Nachheizung ausgeglichen werden. In dieser Arbeit wurde untersucht, ob es Sinn macht einen Teil der Nachheizung in Mehrfamilienhäusern durch eine Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage zu decken. Dafür wurde ein passendes Simulationsmodell mit allen Komponenten erstellt. Durch Variation mehrerer Parameter ist die Grundlage für die energetische und ökonomische Betrachtung entstanden. Dabei wurde das Augenmerk auf Primärenergieeinsparung und Wirtschaftlichkeit der Anlage gelegt. In einer Analyse wurden die energetischen und ökonomischen Aspekte untersucht und bewertet.

Energetisch gesehen wird in dem System mit Kombination von solarthermischer und KWK-Anlage im Vergleich zu einem System mit Brennwert-Kessel und reinem Strombezug aus dem öffentlichen Netz immer Primärenergie eingespart. Bei der Variante mit dem größten BHKW und der größten solarthermischen Anlage werden 18,3 % Primärenergie und 21,5 % CO<sub>2</sub>-Emission eingespart. Bei größer werdenden Speichern nehmen große Solarkollektorflächen dem BHKW etwas die Betriebsstunden ab.

Ökonomisch gesehen sind dem System enge Grenzen gesetzt. Bei passender Auslegung des BHKW ist der Betrieb bei kleinen Solarkollektorflächen in diesem Modell wirtschaftlich. Die geringste Amortisationszeit von 13,8 Jahren ist immer noch sehr hoch, bei einer weiteren Optimierung könnte dieser Wert aber noch etwas fallen. Im wirtschaftlichsten Fall werden immer noch 8,5 % Primärenergie und 14 % CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber der Versorgung durch einen Brennwert-Kessel und reinem Strombezug aus dem Netz gespart.

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: „Wirkungsgradkennlinien handelsüblicher Flach- und Vakuumröhrenkollektoren“ [7].....	4
Abbildung 2.2: Beispiel Wärmebedarf Mehrfamilienhaus 1600 m <sup>2</sup> Grundfläche und Wärmeertrag Solarthermie-Anlage [7] .....	5
Abbildung 2.3: Funktionsprinzip Motor-BHKW [9] .....	8
Abbildung 2.4 Funktionsprinzip Stirling-Motor KWK-Anlage [8] .....	9
Abbildung 2.5: Aufbau PEM-Brennstoffzelle KWK-Anlage [11].....	10
Abbildung 2.6: Funktionsprinzip Mikrogasturbine [10] .....	11
Abbildung 3.1: Beispiel CARNOT-Block Heizkessel .....	13
Abbildung 3.2: Beispiel Maske CARNOT-Block Heizkessel .....	14
Abbildung 3.3: BHKW-Block mit Ein- und Ausgängen.....	17
Abbildung 3.4: Berechnung elektrische Leistung BHKW .....	17
Abbildung 3.5: Berechnung theoretische Wärmeleistung und Brennstoffleistung BHKW.....	18
Abbildung 3.6: Wärmeübergabe Fluid BHKW .....	19
Abbildung 3.7: Berechnung Ausgangstemperatur BHKW .....	20
Abbildung 3.8: Modellierung Anlauf- und Abkühlphase BHKW .....	21
Abbildung 3.9: Aufbau Modell Wärmeversorgungssystem .....	24
Abbildung 3.10: Modellausschnitt Gebäudeheizung .....	25
Abbildung 3.11: Modellausschnitt Warmwasserbereitung.....	27
Abbildung 3.12: Modellausschnitt Solaranlage .....	29
Abbildung 3.13: Modellausschnitt BHKW .....	30
Abbildung 3.14: Modellausschnitt Spitzenlastkessel .....	31

---

Abbildung 3.15: Berechnung Brennstoffleistung Spitzenlastkessel .....	32
Abbildung 3.16: Modellausschnitt Wärmespeicher.....	33
Abbildung 3.17: Modellausschnitt Heizkreisverteiler .....	34
Abbildung 3.18: Modellausschnitt Stomverbrauch .....	35
Abbildung 4.1: Heizkurve Gebäudeheizung .....	39
Abbildung 4.2: Teillastnutzungsgrade Heizkessel [22] .....	41
Abbildung 4.3: Jahreslastgang Mehrfamilienhaus.....	45
Abbildung 4.4: Jahreslastgang Warmwasserbereitung.....	46
Abbildung 4.5: Jahreslastgang Gebäudeheizung .....	46
Abbildung 4.6: Jahresdauerlinie Mehrfamilienhaus .....	47
Abbildung 4.7: Skizze Hausdach.....	49
Abbildung 4.8: Energiefluss Mehrfamilienhaus .....	51
Abbildung 4.9: Beispielverlauf Stromproduktion und Stromverbrauch .....	53
Abbildung 4.10: Durchschnittlicher Erdgaspreis Deutschland 2005 bis 2015 [34].....	60
Abbildung 4.11: Durchschnittlicher Strompreis Deutschland 2006 bis 2015 [35] .....	60

### Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Anteil verschiedene Wohngebäudetypen in Deutschland [6].....	15
Tabelle 3.2: Dauer Anfahrvorgang verschiedene BHKWs .....	22
Tabelle 4.1: Werte Mehrfamilienhaus [17] .....	37
Tabelle 4.2: Ausgewertete BHKWs Teillastverhalten.....	43
Tabelle 4.3: Teillastwirkungsgrade Vitobloc 200 EM-6/15.....	44
Tabelle 4.4: Normierte Wirkungsgrade BHKW Durchschnitt .....	44
Tabelle 4.5: Werte Variation BHKW .....	49
Tabelle 4.6: Primärenergiefaktoren nach EnEv 2014 [24].....	51
Tabelle 4.7: CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren nach GEMIS [26] .....	52
Tabelle 4.8: Beispiel Primärenergieverbrauch und CO <sub>2</sub> -Emissionen Variante 15 .....	53
Tabelle 4.9: Primärenergieverbrauch und CO <sub>2</sub> -Emission alle Varianten.....	54
Tabelle 4.10: BHKW-Modulkosten .....	56
Tabelle 4.11: Kosten für die Installation der Anlage [28] .....	57
Tabelle 4.12: Kosten für Gasbrennwertheizungen .....	57
Tabelle 4.13: Förderbeträge Mini-KWK-Anlagen.....	58
Tabelle 4.14: Wirtschaftlichkeitsrechnung nur Brennwert-Kessel .....	63
Tabelle 4.15: Beispiel Wirtschaftlichkeitsrechnung Variante 15 .....	63
Tabelle 4.16: Wirtschaftlichkeit alle Varianten.....	65
Tabelle 5.1: Solarer Deckungsgrad, solarer Nutzungsgrad und Solare Wärmeerzeugung alle Varianten .....	66
Tabelle 5.2: Volllaststunden, Jahresnutzungsgrad, Häufigkeit An- und Abfahren und Wärmeerzeugung BHKW alle Varianten .....	68

### Nomenklatur

#### Abkürzungen

EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EEWärmeG	Erneuerbare Energien Wärmegesetz
KWKG	Kraft Wärme Kopplungsgesetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
THV	Thermo-Hydraulic-Vector
AIV	Air-Infiltration-Ventilation
SLK	Spitzenlastkessel

#### Formelzeichen

$\eta_o$	Optischer Wirkungsgrad	-
$\eta_K$	Kollektorwirkungsgrad	-
DA	Deckungsgrad	-
$\zeta_{Solar}$	Solarer Nutzungsgrad	-
$\eta_{el}$	Elektrischer Wirkungsgrad	-
$\eta_{th}$	Thermischer Wirkungsgrad	-
$\eta_{ges}$	Gesamtwirkungsgrad	-
$S_p$	Leistungsbezogene Stromkennzahl	-
$\zeta_{el}$	Elektrischer Nutzungsgrad	-
$\zeta_{th}$	Thermischer Nutzungsgrad	-
$\zeta_{elges}$	Gesamtnutzungsgrad	-
$S_W$	Energiebezogene Stromkennzahl	-
$P_{el,Last}$	Elektrische Leistung bei bestimmter Last	W bzw. kW
$P_{el,Nenn}$	Elektrische Nennleistung	W bzw. kW

## Nomenklatur

---

$f_{el}(Last)$	Funktion für normierte elektrische Wirkungsgrade	-
$Last$	Steuersignal für Modellkomponenten (0...1)	-
$\eta_{el,Last}$	Elektrischer Wirkungsgrad bei bestimmter Last	-
$\eta_{el,Nenn}$	Elektrischer Wirkungsgrad bei Nennlast	-
$\dot{Q}_{Br,Last}$	Brennstoffleistung bei bestimmter Last	W bzw. kW
$\dot{Q}_{Br,Nenn}$	Nenn-Brennstoffleistung	W bzw. kW
$\dot{Q}_{th,Nenn}$	Nenn-Wärmeleistung	W bzw. kW
$\eta_{th,Nenn}$	Thermischer Wirkungsgrad bei Nennlast	-
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/s
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität	J/(kg·K) bzw. kJ/(kg·K)
$\vartheta$	Temperatur	°C bzw. K
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
$k$	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$V$	Volumen	m <sup>3</sup> bzw. l
$A$	Annuität	€ bzw. Cent
$K$	Investitionskosten	€ bzw. Cent
$a$	Annuitätsfaktor	-
$q$	Zinsfaktor	-
$T$	Nutzungsdauer	-
$b$	Preisdynamischer Barwertfaktor	-

### 1 Einführung

Mit der Energiewende hat sich Deutschland das langfristige Ziel gesetzt, die Treibhausgasemission bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber 1990 zu senken. Ein Etappenziel ist dabei das Senken des Gesamtverbrauchs von Primärenergie um 20 % bis 2020 gegenüber 2008. [1] Die beiden Säulen zum Erreichen der Ziele sind einerseits die Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energie, andererseits die effizientere Nutzung von Energie.

Private Haushalte spielen dabei mit 28% des gesamten Endenergieverbrauchs Stand 2013 eine große Rolle. In den Haushalten entfallen 69% des Energieverbrauchs auf das Heizen und 15% für Warmwasser, also insgesamt 84% für Wärmebereitstellung. [2] Um diesen Energieverbrauch in privaten Haushalten zu verringern wurden eine Reihe von Gesetzen und Verordnungen erlassen. Für Hausbesitzer sind vor allem das EEG (Erneuerbare Energien Gesetz), die EnEV (Energieeinsparverordnung), das EEWärmeG (Erneuerbare Energien Wärmegesetz) und das KWKG (Kraft Wärme Kopplungsgesetz) wichtig, da diese Anreize zum Energiesparen, zur Effizienzsteigerung und zum Einsatz von erneuerbaren Energien schaffen.

Ein weiteres Etappenziel der Energiewende ist, den Anteil der erneuerbaren Energie im Wärmebereich bis 2020 auf 14% zu steigern. Mit Stand 2014 liegt der Anteil bei 9,9%. [3] Das EEWärmeG soll dazu beitragen, dieses Ziel, auch zum Teil durch die privaten Haushalte, zu erreichen. Eine erneuerbare Wärmequelle im Wohnbereich ist die Solarthermie. Momentan wird ca. 1% des Wärmebedarfs deutscher Haushalte durch Solarthermie abgedeckt. Der Anteil soll laut Prognosen bis 2030 auf 8% ansteigen. [4] Ein weiteres Etappenziel der Energiewende ist, den Anteil des Stroms aus Kraft-Wärme-Kopplung bis 2020 auf 25% zu steigern. Mit Stand 2014 liegt der Anteil bei 17,3%. [5] Das KWKG soll dazu einen Beitrag liefern, den angestrebten Anteil, auch zum Teil durch die privaten Haushalte, zu erreichen. Momentan liegt der Anteil der durch Block-Heiz-Kraftwerke in Zentralheizungen beheizten Mehrfamilienhäuser bei ca. 0,1%. [6]

Ein Aspekt der Energiewende ist das Errichten und der Ausbau von Nah- und Fernwärmenetzen. Aktuelle Forschungen befassen sich mit der Kombination von verschiedenen Wärmeerzeugern in den Netzen. Die Wärme soll sowohl konventionell, z.B. mittels Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, als auch durch erneuerbare Energien, z.B. mittels Solarthermie-Anlagen erzeugt und ins Wärmenetz eingespeist werden. Auch die Einbindung von Wärmespeichern und Stromspeichern in das Netz ist ein Bestandteil der Forschungen, da die fluktuierende Stromerzeugung aus Wind und Solar nicht durchgehend vorhanden ist.

Auch im Wohnbereich muss die fluktuierende Wärmeproduktion einer Solarthermie-Anlage durch Speicher und Nachheizung, üblicherweise Heizkessel, ausgeglichen werden. Um dabei Primärenergie einzusparen besteht die Möglichkeit einen Teil der Nachheizung durch eine Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage bereit zu stellen. Ob sich diese Anlagenkombination in einem Wohngebäude sinnvoll ergänzt oder gegenseitig einschränkt kann sowohl in ökonomischer als auch ökologischer Hinsicht momentan nicht eindeutig beantwortet werden. Im Rahmen dieser Masterarbeit am Institut für neue Energie-Systeme der Technischen Hochschule Ingolstadt wird daher ein Mehrfamilienhaus simuliert, das sowohl mit einer solarthermischen, als auch einer KWK-Anlage ausgestattet ist. Das System wird hinsichtlich Kosten und Primärenergieverbrauch optimiert. Die Ergebnisse werden analysiert und die Sinnhaftigkeit einer gekoppelten Solarthermie/KWK-Anlage wird bewertet.

Die Arbeit gliedert sich damit in folgende Kapitel:

- **Kapitel 2: Grundlagen Solarthermie und Kraft-Wärme-Kopplung**

Einführung in Grundlegende Funktionsweise und Bewertungsmöglichkeiten Solarthermischer und Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen.

- **Kapitel 3: Simulation in Matlab/Simulink**

Einführung in das Simulationswerkzeug und Erläuterung des Aufbaus und Funktion der simulierten Anlage.

- **Kapitel 4: Parametervariation und Optimierung Anlage**

Variation der Anlagenparameter und energetische sowie ökonomische Optimierung auf Basis der Anlagenvariationen.

- **Kapitel 5: Darstellung und Bewertung Ergebnisse**

Qualitative und Quantitative Auswertung und Darstellung der Ergebnisse, sowie Bewertung der Sinnhaftigkeit.

- **Kapitel 6: Zusammenfassung und Ausblick**

Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und Ausblick auf weitere Untersuchungsmöglichkeiten einer gekoppelten Solarthermie/KWK-Anlage.

## 2 Grundlagen Solarthermie und Kraft-Wärme-Kopplung

### 2.1 Solarthermische Wärmeversorgung

Solaranlagen wandeln die Solarenergie der Sonne in eine technisch nutzbare Energieform wie Wärme, elektrischen Strom oder chemische Energie um. Die Solaranlagen werden in drei Haupttypen eingeteilt:

- Solarthermie-Anlagen (oder thermische Solaranlagen)
- Photovoltaikanlagen
- Solarwärmekraftwerk (oder thermisches Solarkraftwerk)

Solarthermie-Anlagen wandeln die Solarenergie in Wärme um. Photovoltaikanlagen wandeln die Solarenergie in elektrischen Strom um. Solarwärmekraftwerke wandeln die Solarenergie ebenfalls in Wärme um, aber auf einem höheren Temperaturniveau, um daraus Strom zu erzeugen.

In Deutschland trifft an einem gemittelten Tag eine Strahlungsleistung von ca.  $110 \text{ W/m}^2$  auf die Erde. Die maximale Strahlungsleistung reicht dabei von einem stark bewölkten Wintertag mit  $50 \text{ W/m}^2$  bis zu einem klaren Sommertag mit  $1.000 \text{ W/m}^2$ . Im Mittel trifft in Deutschland pro Jahr so eine Strahlungsenergie von 950 bis  $1.200 \text{ kWh/m}^2$  auf. Die direkte Strahlung hat dabei einen Anteil von ca. 50%, der Rest ist diffuse Strahlung. [7] nutzen. Um die Solarstrahlung zu nutzen, werden in Solarthermie-Anlagen thermische Solarkollektoren eingesetzt. Der Solarkollektor ist mit einem Absorber ausgestattet, der die Strahlungsenergie in Wärme umwandelt und nutzbar macht. Die Wärme wird an einen Wärmeträger, oft ein Wasser-Frostschutz-Gemisch, übertragen und wird durch eine Pumpe dem Heizsystem zur Verfügung gestellt. Im Normalfall wird ein Wärmespeicher genutzt um Energie zwischenzu- speichern und damit die Laufzeit der Solarthermie-Anlage zu erhöhen. Die Solarkollektoren werden heute meist in die zwei Typen, Flachkollektor und Vakuum-Röhrenkollektor eingeteilt. Bei Flachkollektoren ist der Absorber über die ganze Fläche in einem gut gedämmten Rahmen untergebracht. Bei Vakuumröhren-kollektoren sind die Absorber in evakuierten Röhren untergebracht, was die Wärmeverluste vermindert. Um die Effizienz weiter zu erhöhen, können sich hinter den Röhren Parabolspiegel befinden, die die einfallende Strahlung direkt auf die Röhren lenken. Diese Kollektoren werden CPC (compound parabolic concentrator)-Vakuumröhren-kollektoren genannt. Der optische Wirkungsgrad  $\eta_o$  gibt an, wie viel der einfallenden Strahlung in Wärme umgewandelt wird.

## 2 Grundlagen Solarthermie und Kraft-Wärme-Kopplung

---

Dieser Wirkungsgrad gilt nur bei senkrechtem Strahlungseinfall und wenn der Kollektor die gleiche Temperatur wie die Umgebung hat. Bei höheren Kollektortemperaturen kommen zusätzlich Wärmeverluste hinzu, wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist. Um diesen Einfluss zu bewerten wird der Kollektorstoffstromwirkungsgrad  $\eta_K$  angegeben.

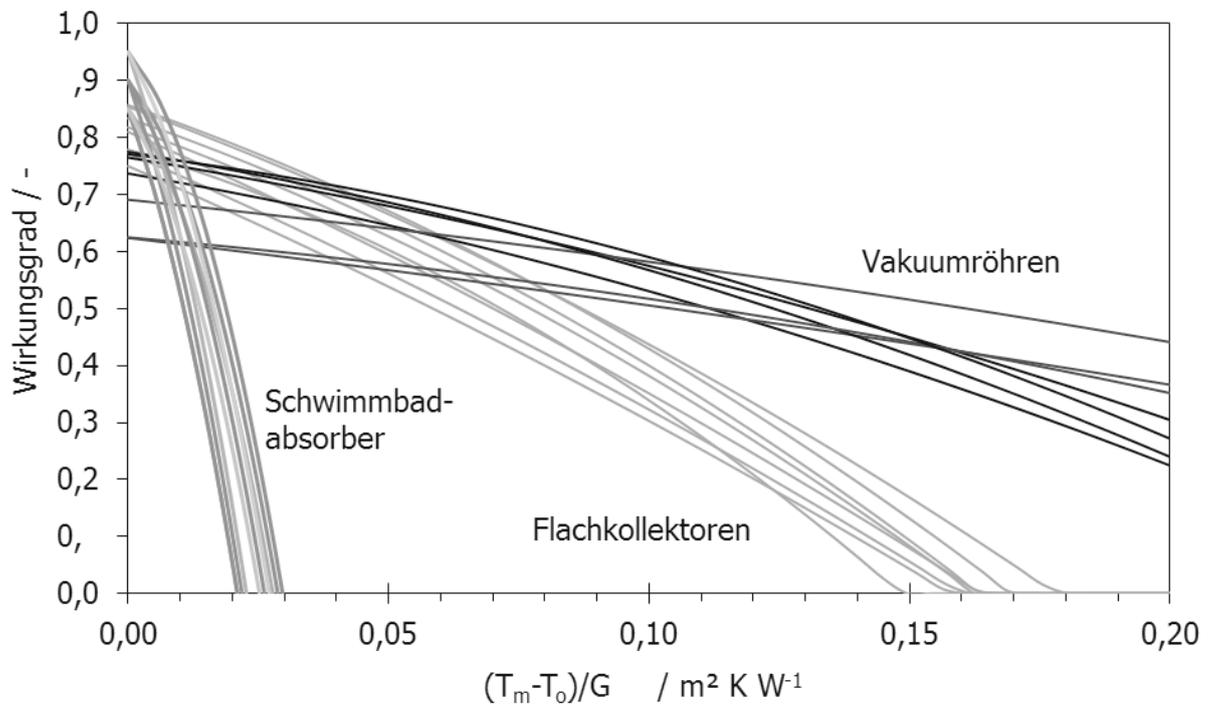


Abbildung 2.1: „Wirkungsgradkennlinien handelsüblicher Flach- und Vakuumröhrenkollektoren“ [7]

Bei der Nutzung einer Solarthermie-Anlage in Wohngebäuden besteht das Problem, dass die höchste Leistung im Sommer vorhanden ist, wenn normalerweise kein oder sehr geringer Heizwärmebedarf besteht. Daher wird für die Heizung immer noch ein Spitzenlastkessel benötigt, der die Wärme im Winter bereitstellt. Wie in Abbildung 2.2 zu sehen, wird die Wärme für die Warmwasserbereitung auch im Sommer benötigt und kann oft komplett von der Solarthermie-Anlage gedeckt werden.

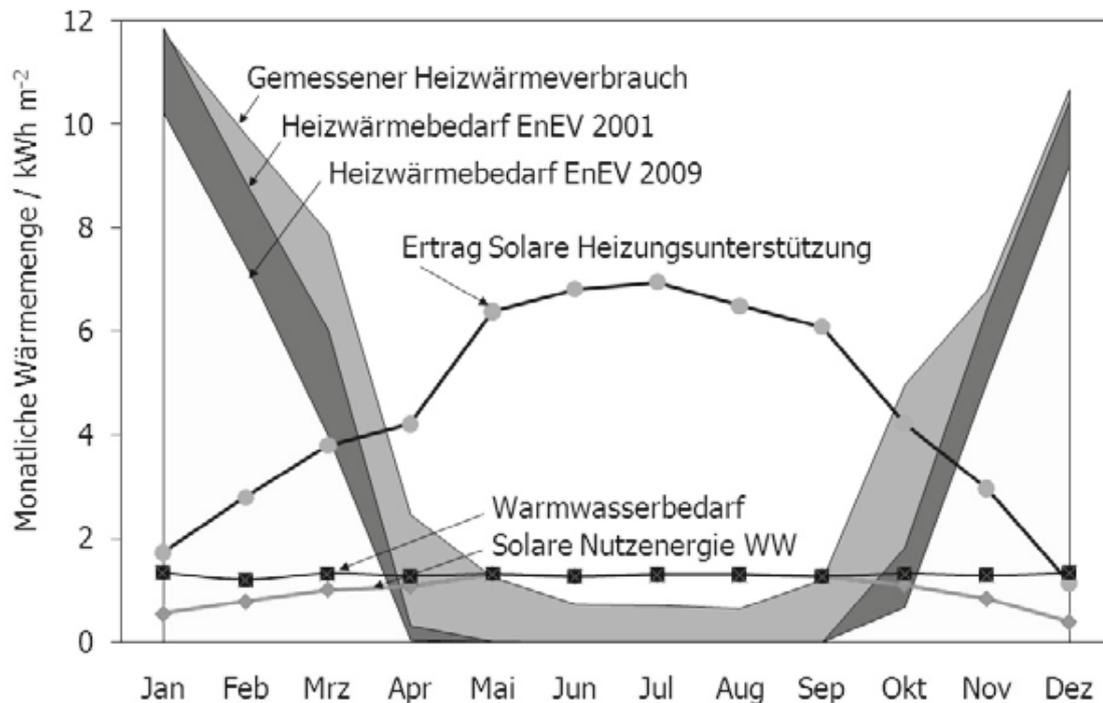


Abbildung 2.2: Beispiel Wärmebedarf Mehrfamilienhaus 1600 m<sup>2</sup> Grundfläche und Wärmeertrag Solarthermie-Anlage [7]

Ein Bewertungskriterium für die bedarfsgerechte Planung einer Solarthermie-Anlage ist der Deckungsgrad DA.

$$DA = \frac{Q_{\text{Solaranlage}}}{Q_{\text{Gesamt}}} \quad (2.1)$$

Dieser gibt das Verhältnis der solar erzeugten Wärme zum Gesamtwärmebedarf an. Er kann sich auch nur auf den Wärmebedarf des Warmwassers oder der Heizung beziehen. Ein großer Deckungsgrad ist nicht immer von Vorteil. Würde der Deckungsgrad der Heizung auf 100% ausgelegt werden, wäre die Anlage für den Sommer in den meisten Fällen viel zu groß ausgelegt und wäre nicht wirtschaftlich zu betreiben. Ein solarer Deckungsbeitrag zur Heizung von 10 bis 30% ist im Normalfall möglich. [7]

Ein weiteres Bewertungskriterium für Solaranlagen ist der solare Nutzungsgrad  $\zeta_{\text{Solar}}$ .

$$\zeta_{\text{Solar}} = \frac{Q_{\text{Solaranlage}}}{Q_{\text{Solarstrahlung}}} \quad (2.2)$$

Dieser gibt das Verhältnis der solar erzeugten Wärme zur Solarstrahlung an, die auf die Solarkollektoren getroffen ist.

### 2.2 Energieversorgung durch Kraft-Wärme-Kopplung

Das gleichzeitige Umwandeln von Energie in mechanische oder elektrische Energie und Nutzwärme innerhalb eines Prozesses wird Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) genannt. Wird die Bedingung erfüllt, dass in einem zu Versorgenden Objekt gleichzeitig Strom- und Wärmebedarf vorhanden ist, ergeben sich daraus für KWK folgende Vorteile gegenüber der getrennten Versorgung:

- Energieeinsparung und damit Ressourcenschonung
- Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit Klimaschutz
- Wirtschaftlichkeit bei passenden Rahmenbedingungen

Für KWK sind heute verschiedene Techniken mit einem Leistungsspektrum von einigen 100 Watt bis zu mehreren 100 Megawatt verfügbar. Die Systeme werden in folgende Größen unterteilt [10]:

- Großanlagen über 2 MW<sub>el</sub>
- Kleinanlagen von 50 kW<sub>el</sub> bis 2 MW<sub>el</sub>
- Kleinstanlagen unter 50 kW<sub>el</sub>

Die Kleinstanlagen werden nochmals folgendermaßen unterteilt:

- Mini-KWK von 20 kW<sub>el</sub> bis 50 kW<sub>el</sub>
- Mikro-KWK von 2,5 kW<sub>el</sub> bis 20 kW<sub>el</sub>
- Nano-KWK unter 0 bis 2,5 kW<sub>el</sub>

In Wohngebäuden und vor allem in Mehrfamilienhäusern ist KWK prinzipiell gut geeignet, da meist gleichzeitig Strom- und Wärmebedarf vorhanden ist. Es ist möglich die KWK-Anlagen Stromgeführt oder Wärmegeführt zu betreiben. Beim stromgeführten Betrieb wird die Anlage möglichst nach dem aktuellen Strombedarf geregelt. Kann nicht genügend elektrische Energie bereitgestellt werden, wird die fehlende Energie üblicherweise über das öffentliche Stromnetz bezogen. Es muss im stromgeführten Betrieb sichergestellt werden, dass die Wärme abgenommen, zwischengespeichert oder im Notfall anderweitig abgegeben werden kann. Beim wärmegeführten Betrieb wird die Anlage nach dem aktuellen

## 2 Grundlagen Solarthermie und Kraft-Wärme-Kopplung

---

Wärmebedarf geregelt. Hier muss analog zum stromgeführten Betrieb der elektrische Strom entweder selbst abgenommen, zwischengespeichert oder ins öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Des Weiteren gibt es auch Mischbetrieb aus beiden Arten um optimalen energetischen oder ökonomischen Nutzen aus der Anlage zu ziehen.

Der Nutzen einer KWK-Anlage wird mit Hilfe einiger Kennzahlen bewertet. Dabei gibt es leistungsbezogene und energiebezogene Bewertungskriterien. Leistungsbezogene Kennzahlen sind der elektrische Wirkungsgrad  $\eta_{el}$ , der thermische Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  und der Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{ges}$ . Sie beziehen die jeweilige Nennleistung auf die Nenn-Brennstoffleistung. Zusätzlich wird bei KWK-Anlagen die leistungsbezogene Stromkennzahl  $S_p$  angegeben, welche die elektrische Nennleistung auf die thermische Nennleistung bezieht. Da Strom im Vergleich zu Wärme auch wirtschaftlich gesehen höherwertiger ist, wird normalerweise eine hohe Stromkennzahl angestrebt. Die Wirkungsgrade einer KWK-Anlage ändern sich für andere Lastpunkte außerhalb der Nennlast. Energiebezogene Kennzahlen sind der elektrische Nutzungsgrad  $\zeta_{el}$ , der thermische Nutzungsgrad  $\zeta_{th}$  und der Gesamtnutzungsgrad  $\zeta_{ges}$ . Sie beziehen die jeweilige Energiemenge auf die Brennstoffenergiemenge, z.B. für ein Jahr. Zusätzlich wird die energiebezogene Stromkennzahl  $S_W$  angegeben, welche die elektrische Energie auf die thermische Energie bezieht. Die Nutzungsgrade sind in realen Systemen geringer als die Wirkungsgrade, da durch Verluste und Anfahrverhalten der Anlagen Energie verloren geht.

Im Folgenden werden verschiedene aktuelle KWK-Technologien vorgestellt, die in Mehrfamilienhäusern zum Einsatz kommen können.

### 2.2.1 Motor-Blockheizkraftwerk

Motor-Blockheizkraftwerke (BHKW) sind klassische Verbrennungsmotoren, die nach dem Otto- oder Dieselpinzip funktionieren. In Abbildung 2.3 ist das Funktionsprinzip eines BHKWs zu sehen.

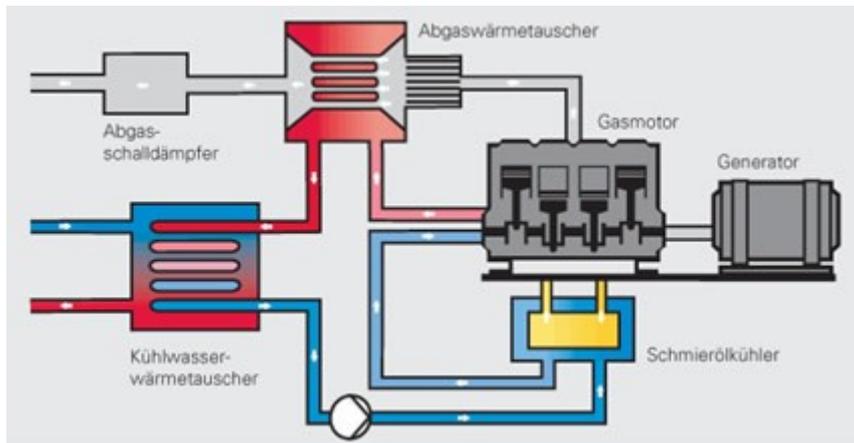


Abbildung 2.3: Funktionsprinzip Motor-BHKW [9]

Die an der Welle geleistete Arbeit wird im Generator genutzt um elektrischen Strom zu erzeugen. Der Großteil der Abwärme, der in Schmieröl, Motorkühler und Abgas des Motors entsteht wird durch einen Kühlkreislauf aufgenommen und nutzbar gemacht. Als Brennstoff werden in Otto-Motoren vor allem Erdgas verwendet, in Diesel-Motoren vor allem Heizöl. Außerdem können Biogas, Klärgas und Flüssiggas als Brennstoff dienen. Die Wartungsintervalle liegen zwischen 2.700 bis 6.000 Betriebsstunden [10]. Eine Lebensdauer von über 10 Jahren bei 40.000 bis 80.000 Betriebsstunden ist üblich [10]. BHKW-Modelle gibt es von 1 kW<sub>el</sub> bis zu 20.000 kW<sub>el</sub>. Die Modelle die in Wohngebäuden mit bis zu 50 kW<sub>el</sub> eingesetzt werden, weisen elektrische Wirkungsgrade von 24 bis 33 % auf [8]. Ein Gesamtwirkungsgrad von bis zu 90 % ist möglich [8]. Das Teillastverhalten von BHKWs ist gut, da der Wirkungsgrad bei Teillast nicht stark abfällt. Trotzdem werden BHKWs im Normalfall im besten Punkt auf Grundlast im zu versorgenden Objekt ausgelegt. In der dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung sind BHKW stark vertreten. Daher gibt es hier bei Wartung und Lebensdauer die meiste Erfahrung [10]. Die elektrischen Leistungen der BHKWs werden immer kleiner und eignen sich daher sehr gut für Mehrfamilienhäuser. Mit elektrischen Leistungen im 1 kW-Bereich werden sie auch für Einfamilienhäuser interessant.



Wirkungsgrade reichen momentan von 10% bis ca. 30% bei elektrischen Leistungen von 1 kW<sub>el</sub> bis 40 kW<sub>el</sub> [8]. Stirling-Motoren sind durch die Anpassung des Mitteldrucks des Arbeitsgases grundsätzlich teillastfähig. Einige Hersteller bieten mittlerweile Stirling-Anlagen im Nano-KWK-Bereich für Wohngebäude an, ein Teil davon befindet sich noch als Prototyp in der Testphase. Der meistgenutzte Brennstoff bei diesen Modellen ist Erdgas oder Flüssiggas.

### 2.2.3 Brennstoffzelle

Brennstoffzellen sind elektrochemische Zellen, ähnlich Batterien, die prinzipiell Wasserstoff und Sauerstoff unter Abgabe von Energie in Wasser umwandeln [10]. Abbildung 2.5 zeigt das Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle, wenn sie als KWK-Anlage genutzt wird.

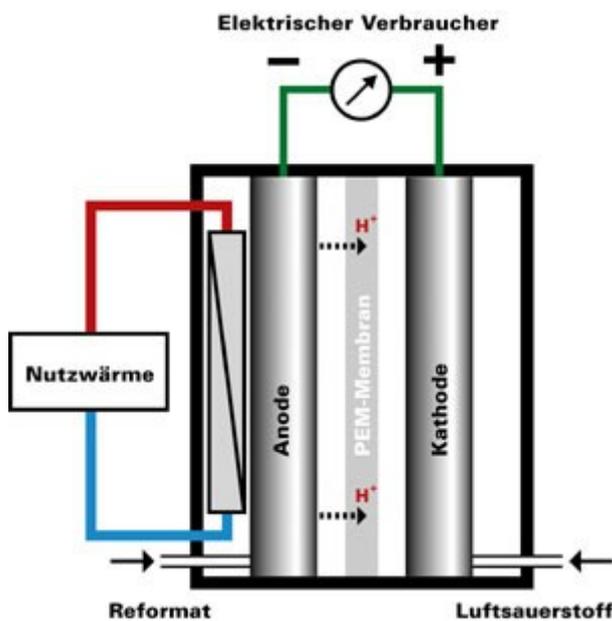


Abbildung 2.5: Aufbau PEM-Brennstoffzelle KWK-Anlage [11]

Da der Funktion von Brennstoffzellen kein Kraftmaschinenprozess zu Grunde liegt, gilt für sie auch nicht der ideale Carnot-Wirkungsgrad. Daher ist es prinzipiell möglich sehr hohe elektrische Wirkungsgrade zu erreichen. Die Funktion der Brennstoffzelle ist vom Elektrolyten abhängig. Alle Brennstoffzellentypen erzeugen aus Wasserstoff und Sauerstoff, Wasser und Energie. Die Einzelreaktionen an Kathode und Anode und durch den Elektrolyten sind verschieden. Als KWK-Anlage in Gebäuden scheint die PEM-Brennstoffzelle am geeignetsten, da sie bei eher niedrigen Temperaturen von 50 bis 90 °C arbeitet [10]. Viele Hersteller konzentrieren sich daher auf die Entwicklung von PEM-Brennstoffzellen. Als

## 2 Grundlagen Solarthermie und Kraft-Wärme-Kopplung

---

Brennstoff werden prinzipiell Wasserstoff und Sauerstoff benötigt. Der Sauerstoff kommt aus der Atmosphäre. Da Wasserstoff kaum in der Natur vorkommt, muss dieser z.B. aus Erdgas aufbereitet werden. Dazu werden Reformier verwendet, die Wasserdampf und Erdgas zu Kohlendioxid und Wasserstoff umwandeln. Die Gasaufbereitung benötigt zusätzlich Energie. Durch die wenigen bewegten Teile einer Brennstoffzelle wird der Wartungsaufwand in Zukunft sehr gering eingeschätzt. Das Teillastverhalten von Brennstoffzellen ist sehr gut, da der Wirkungsgrad kaum abfällt oder sogar zunimmt. Momentan stehen wenige Brennstoffzellen als KWK-Anlage vor der Markteinführung, verschiedene Heiztechnik-Hersteller sind aber mit der Entwicklung beschäftigt. Durch den höheren Wirkungsgrad der Brennstoffzelle gegenüber anderen Technologien im gleichen Leistungssegment wird ihr ein hohes Potenzial für die Zukunft eingeräumt [10].

### 2.2.4 Mikrogasturbine

Mikrogasturbinen funktionieren wie die meisten Gasturbinen nach dem offenen Joule-Prozess. Abbildung 2.6 zeigt das Funktionsprinzip einer Mikrogasturbine mit Rekuperator.

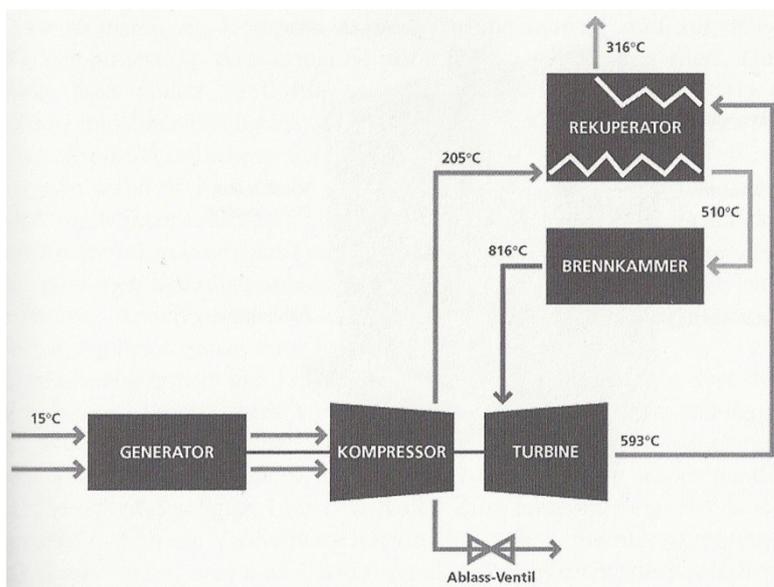


Abbildung 2.6: Funktionsprinzip Mikrogasturbine [10]

Die Umgebungsluft wird vom Kompressor angesaugt und zur Kühlung über den Generator geführt. Der Kompressor verdichtet die Luft, womit auch die Temperatur steigt. Die Luft wird anschließend durch den Rekuperator mit dem heißen Abgas erhitzt und in die Brennkammer geleitet. Dort verbrennt sie zusammen mit dem Brennstoff und das heiße Rauchgas wird zur

## 2 Grundlagen Solarthermie und Kraft-Wärme-Kopplung

---

Turbine geleitet und entspannt. Dabei verrichtet das Gas mechanische Arbeit, womit der Kompressor angetrieben wird. Der Rest der Arbeit wird im Generator zu elektrischer Energie umgewandelt. Das immer noch heiße Abgas gibt einen Teil seiner Wärme über den Rekuperator an die komprimierte Luft und verlässt die Mikrogasturbine. Das immer noch sehr heiße Abgas kann als Wärmequelle genutzt werden [10].

Als Brennstoff in Mikrogasturbinen kommt meistens Erdgas oder Heizöl zum Einsatz, es können aber auch Klär-, Deponie- oder Biogas verwendet werden. Die Welle in der Mikrogasturbine läuft ab der Drehzahl von etwa 15.000 1/min berührungslos in Luftlagern. Daraus ergeben sich ein sehr geringer Wartungsaufwand und eine hohe erreichbare Lebensdauer. Der elektrische Wirkungsgrad von Mikrogasturbinen ist in etwa 3 bis 5 Prozentpunkte niedriger als bei BHKWs. Da die Wärmenutzung nur über das sehr heiße Abgas möglich ist, geht hier viel Wärme verloren. Der Gesamtwirkungsgrad liegt bei etwa 80%. Durch variable Drehzahlen, sind Mikrogasturbinen teillastfähig, der Wirkungsgrad fällt dabei aber stark ab. Ein grundlegendes Problem bei Mikrogasturbinen sind die spezifisch größer werdenden Verluste bei geringeren Leistungen. Durch endliche Fertigungstoleranzen nehmen die spezifischen Spaltverluste zu. Die kleinsten Mikrogasturbinen am Markt besitzen eine Leistung von 30 kW<sub>el</sub>. Damit werden Mikrogasturbinen für Mehrfamilienhäuser erst bei sehr großen Gebäuden mit vielen Wohneinheiten interessant. [10]

## 3 Simulation in Matlab/Simulink

Im Zuge dieser Arbeit wird ein Mehrfamilienhaus mit einer Wärmeversorgung durch eine Solarthermie/KWK-Kombination simuliert. Durch die vielen Einflussfaktoren in dem komplexen System bietet die Simulation mehr Übersicht und detailliertere Ergebnisse als eine Berechnung von Hand. Als Simulationsumgebung wird Matlab/Simulink mit der CARNOT-Blockset Erweiterung benutzt, das am Institut für neue Energiesysteme (InES) an der Technischen Hochschule in Ingolstadt sehr verbreitet ist. Matlab/Simulink wird in der Version R2013a verwendet.

### 3.1 CARNOT-Blockset

Das CARNOT-Blockset (**C**onventional **A**nd **R**enewable **e**Nergy systems **O**pTimization Blockset) ist eine Matlab/Simulink-Toolbox, die der Berechnung und Simulation von thermischen Bauteilen in Heizungssystemen dient. Der Blick liegt dabei auf konventionellen und erneuerbaren Elementen. Entwickelt wurde das CARNOT-Blockset ursprünglich vom Solar-Institut am Standort Jülich der FH Aachen, welches die Toolbox öffentlich und somit jedem kostenfrei zugänglich gemacht hat.

Die CARNOT-Toolbox ist wie die Simulink-Bibliothek aus Blöcken aufgebaut, die einzelne Bauteile oder Komponenten sein können und jeweils ein eigenes Subsystem bilden. Die Bedienung der Blöcke ist dabei die gleiche wie in Simulink.

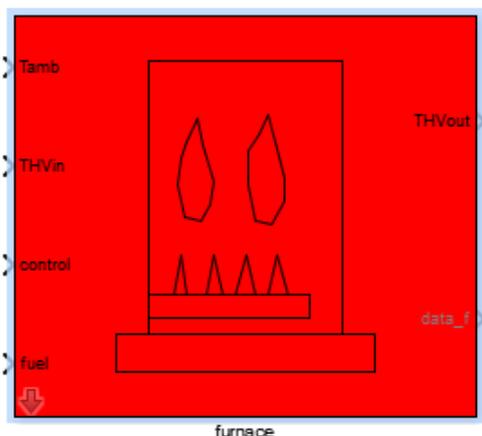


Abbildung 3.1: Beispiel CARNOT-Block Heizkessel

Abbildung 3.1 zeigt den CARNOT-Block eines Heizkessels (furnace). Links sind die Verbindungseingänge, rechts die Verbindungsausgänge, die jeweils mit passenden weiteren

### 3 Simulation in Matlab/Simulink

---

Blöcken verbunden werden. Neben den normalen Verbindungen gibt es in der CARNOT-Toolbox eigene Verbindungsvektoren, die bestimmte Daten enthalten, z.B. THV (Thermo-Hydraulic-Vector), Weather data Vector oder AIV (Air-Infiltration-Ventilation). Die Vektoren enthalten verschiedene Elemente, die innerhalb der Blöcke verrechnet werden. Der THV ist der wichtigste Verbindungsvektor im CARNOT-Blockset. Er enthält alle wichtigen Daten des Wärmemediums, wie z.B.: Art des Fluids, Temperatur, Druck, Massenstrom, usw. Der THV wird innerhalb der Bauteile aufgeteilt und die einzelnen Elemente zu verschiedenen Berechnungen verwendet. Die neuen Werte werden wieder zu einem THV gebündelt und aus dem Bauteil zur Weitergabe herausgeführt. Die Berechnungen in den Blöcken werden anhand der in den jeweiligen Masken eingegebenen Daten durchgeführt. Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft die Eingabemaske eines Heizkessels (furnance). Alle Werte werden in der CARNOT-Toolbox in SI-Einheiten angegeben. Lediglich die Temperatur wird in °C angegeben. Die Gesamtheit der verschiedenen Blöcke und Verbindungen ergeben bei passenden Werten ein funktionierendes Heizungssystem.

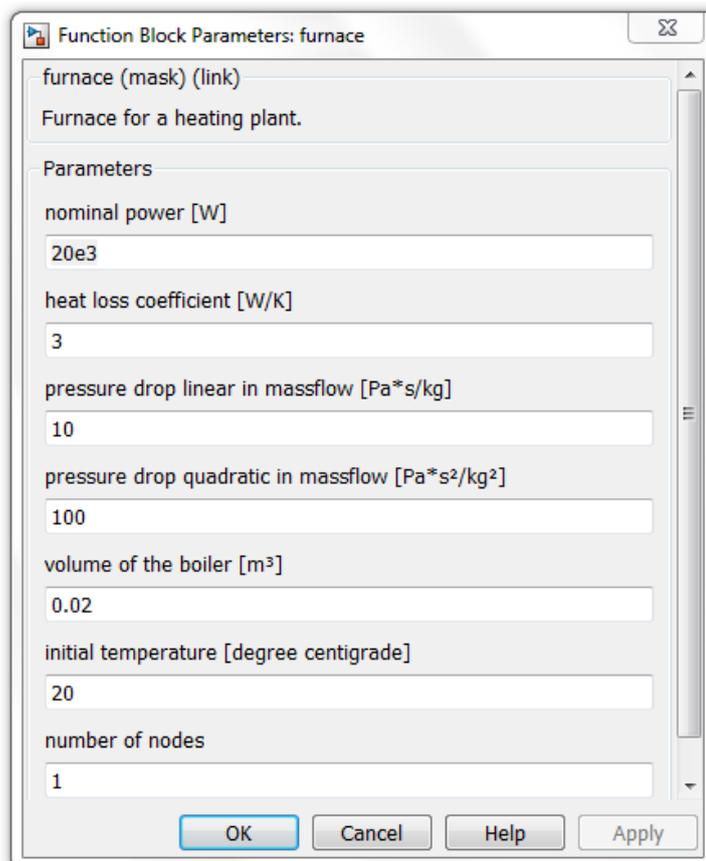


Abbildung 3.2: Beispiel Maske CARNOT-Block Heizkessel

Die einzelnen Bauteile wurden durch Messungen und andere Simulationsprogramme wie TRNSYS validiert und weisen eine sehr geringe Diskrepanz zu echten Bauteilen auf. Das CARNOT-Blockset wird weiterhin von der CARNOT-Usergroup weiterentwickelt. Für diese Arbeit wird Version 5.3 verwendet [12].

#### 3.2 Definition Mehrfamilienhaus

Das Institut Wohnen und Umwelt (IWU) teilt Wohngebäude in folgende Basis-Typen ein:

- Einfamilienhaus: Freistehende Wohngebäude mit 1-2 Wohnungen
- Reihenhaushaus: Wohngebäude mit 1 bis 2 Wohnungen als Doppelhaus, gereihtes Haus oder sonstiger Gebäudetyp
- Mehrfamilienhaus: Wohngebäude mit 3 bis 12 Wohnungen
- Großes Mehrfamilienhaus: Wohngebäude mit 13 oder mehr Wohnungen

Die Grenze zwischen Mehrfamilienhaus und großem Mehrfamilienhaus könnte auch höher oder niedriger liegen. Sie ist aber an die Einteilung im Mikrozensus 2010 angelehnt [6]. Der Anteil der einzelnen Gebäudetypen am gesamten Wohngebäudebestand ist mit Stand Ende 2011 in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tabelle 3.1: Anteil verschiedene Wohngebäudetypen in Deutschland [6]

		Summe	Anteil
<b>EFH</b>	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	9.976	55%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	12.263	31%
	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	1.463	41%
<b>RH</b>	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	5.030	28%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	5.796	15%
	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	633	18%
<b>MFH</b>	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	3.023	17%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	16.495	42%
	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	1.168	33%
<b>GMH</b>	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	210	1%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	4.674	12%
	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	288	8%

Mit zusammen 54% stellen kleine und große Mehrfamilienhäuser die Mehrheit der Wohngebäude in Deutschland, aber nur 41% der Wohnfläche. Wohnungen in Mehrfamilienhäusern sind somit im Durchschnitt kleiner als Wohnungen in Einfamilienhäusern und Reihenhäusern.

Der Jahresheizenergiebedarf eines Wohngebäudes ist in erster Linie von der Gebäudehülle abhängig, welche sich im Laufe der Jahre, z.B. durch bessere Dämmung, stetig verbessert hat. Im Jahr 2013 hatte ein Mehrfamilienhaus in Deutschland im Durchschnitt einen Jahresheizenergiebedarf von 131,1 kWh pro Quadratmeter und Jahr, in Bayern 115,4 kWh pro Quadratmeter und Jahr [13]. Neubaugebäude nach Niedrigenergiestandard haben einen Jahresheizenergiebedarf von 30 bis 70 kWh pro Quadratmeter und Jahr. Der Energieverbrauch für warmes Wasser hängt vor allem von der Haushaltssituation und den Gewohnheiten der Bewohner ab und kann nicht ohne weiteres pauschal angegeben werden. Laut einer Angabe liegt der Verbrauch bei ca. 500 bis 800 kWh pro Jahr und Person. [14]

#### 3.3 Modellierung KWK-Anlage

Blockheizkraftwerke sind die am meisten genutzte Technologie bei kleinen dezentralen KWK-Anlagen im Wohnbereich. Die Technologie hat sich bewährt und die Modelle am Markt sind vergleichsweise günstig in Anschaffung und Betrieb. Daher fällt die Entscheidung in der Simulation ein BHKW als KWK-Anlage zu verwenden. In der Carnot-Bibliothek ist noch kein vorgefertigter Block für KWK-Anlagen vorhanden, daher wird hierfür ein passendes BHKW-Modul modelliert.

Die Funktion des BHKW besteht darin, ankommendes Heizungswasser mit einer bestimmten Wärmeleistung aufzuheizen und mit einer höheren Temperatur wieder abzugeben. Außerdem wird gleichzeitig Strom mit einer bestimmten elektrischen Leistung produziert. Im Modell muss das BHKW für Betrieb und Analyse des Systems folgende Funktionen erfüllen:

- Ein- und Ausschaltbarkeit
- Modulierbarkeit mit Änderung des elektrischen und thermischen Wirkungsgrads
- Aufheizung des eingehenden Heizwasserstroms je nach Wärmeleistung
- Trägheit der Leistungen durch Aufheiz- und Abkühlphasen des BHKWs
- Ausgabe der elektrischen Leistung, sowie der Wärmeleistung und Brennstoffleistung

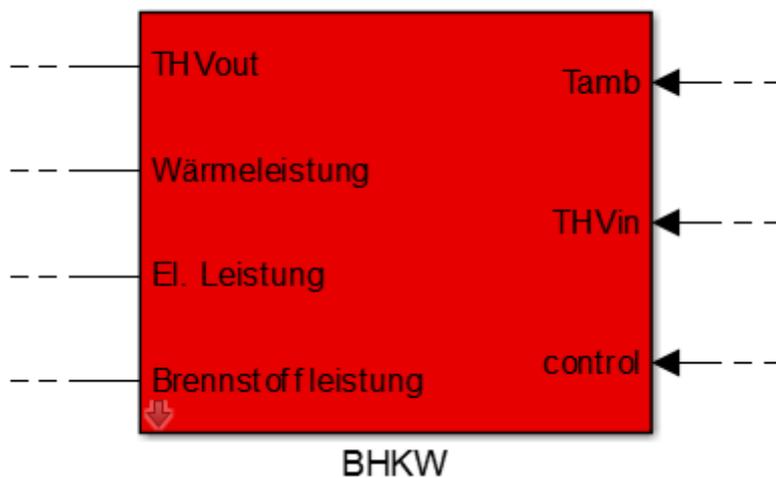


Abbildung 3.3: BHKW-Block mit Ein- und Ausgängen

Das BHKW ist, wie in Abbildung 3.3 zu sehen, als eigener Block ähnlich den anderen CARNOT-Blöcken modelliert, das über den Eingang „THVin“ und dem Ausgang „THVout“ mit dem restlichen System verbunden ist. Die gestrichelten Linien sind im echten Modell nicht vorhanden und bedeuten lediglich, dass die Verbindungen außerhalb des Bildes weitergehen. Der Eingang „control“ moduliert das BHKW und schaltet es ein oder aus. Der Eingang „Tamb“ wird mit der Umgebungstemperatur des BHKWs verbunden und wird für die Aufheizung sowie Abkühlung des Verbrennungsmotors benötigt. Ausgegeben werden zur Weiterverarbeitung jeweils die aktuelle „Wärmeleistung“, „elektrische Leistung“ und „Brennstoffleistung“. Die Eingabeparameter in der Maske des BHKW-Blocks sind „elektrische Nennleistung“, „thermische Nennleistung“ und „thermischer Wirkungsgrad“.

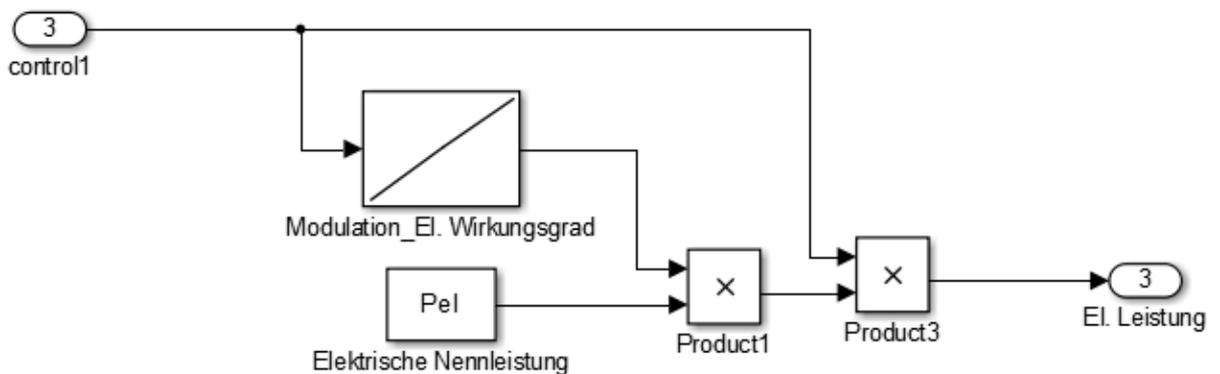


Abbildung 3.4: Berechnung elektrische Leistung BHKW

Abbildung 3.4 zeigt den Ausschnitt des Subsystems der zur Berechnung der elektrischen Leistung dient. Die elektrische Leistung (El. Leistung) wird dabei nach folgender Formel, abhängig von der Last (control1) berechnet:

$$P_{el,Last} = P_{el,Nenn} \cdot f_{el}(Last) \cdot Last \quad (3.1)$$

Last kann dabei nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen.  $f_{el}(Last)$  ist ein Vergleich des elektrischen Wirkungsgrades bei einer gewissen Last mit dem elektrischen Wirkungsgrad bei Nennlast, wie in folgender Formel dargestellt:

$$f_{el}(Last) = \frac{\eta_{el,Last}}{\eta_{el,Nenn}} = \frac{P_{el,Last} / \dot{Q}_{Br,Last}}{P_{el,Nenn} / \dot{Q}_{Br,Nenn}} \quad (3.2)$$

$\dot{Q}_{Br}$  ist hierbei die Brennstoffleistung. Die Werte für  $f_{el}(Last)$  sind in dem Lookup „Modulation\_El. Wirkungsgrad“ abhängig von der Last (control1) hinterlegt. Der Verlauf der Funktion ist dabei vom BHKW selbst abhängig und ist von Modell zu Modell verschieden. Er lässt sich nicht vereinheitlichen, nimmt aber bei der Mehrzahl der Modelle bei geringerer Last ab (siehe Kapitel 4.1.2).

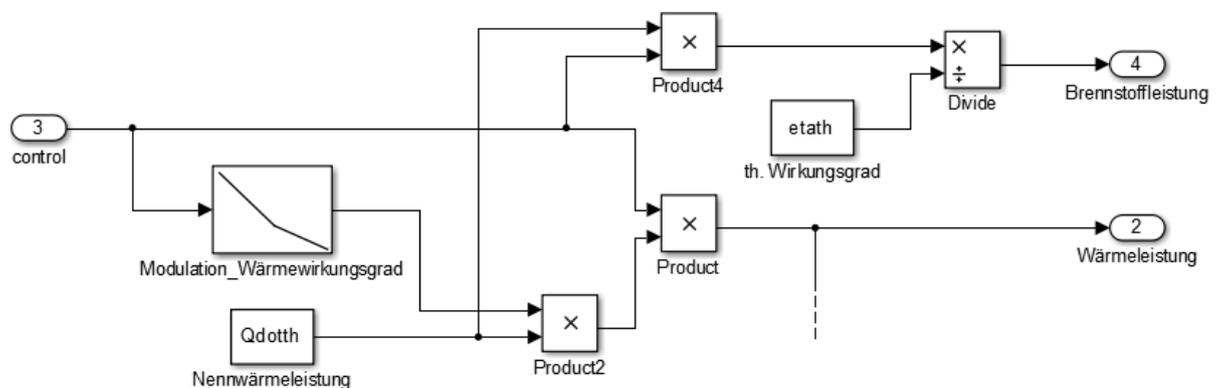


Abbildung 3.5: Berechnung theoretische Wärmeleistung und Brennstoffleistung BHKW

Abbildung 3.5 zeigt den Ausschnitt des Subsystems der zur Berechnung der theoretischen Wärmeleistung und der Brennstoffleistung dient. Die theoretische Wärmeleistung wird dabei analog zur elektrischen Leistung berechnet mit eigenen Werten  $f_{th}(Last)$  (Modulation\_Wärmewirkungsgrad). Der Verlauf der Funktion ist dabei auch hier vom BHKW-Modell abhängig. Bei vielen Modellen nimmt er bei geringerer Last etwas zu (siehe Kapitel 4.1.2).

### 3 Simulation in Matlab/Simulink

Die Brennstoffleistung wird nach folgender Formel berechnet:

$$\dot{Q}_{Br,Last} = \frac{\dot{Q}_{th,Nenn} \cdot Last}{\eta_{th,Nenn}} = \dot{Q}_{Br,Nenn} \cdot Last \quad (3.3)$$

Der elektrische und der Gesamtwirkungsgrad des BHKWs müssen in der Simulation nicht angegeben werden, können aber in der Auswertung der Daten, ebenso wie die Stromzahl von Interesse sein. Abbildung 3.6 zeigt die Wärmeübergabe an das eingehende Fluid.

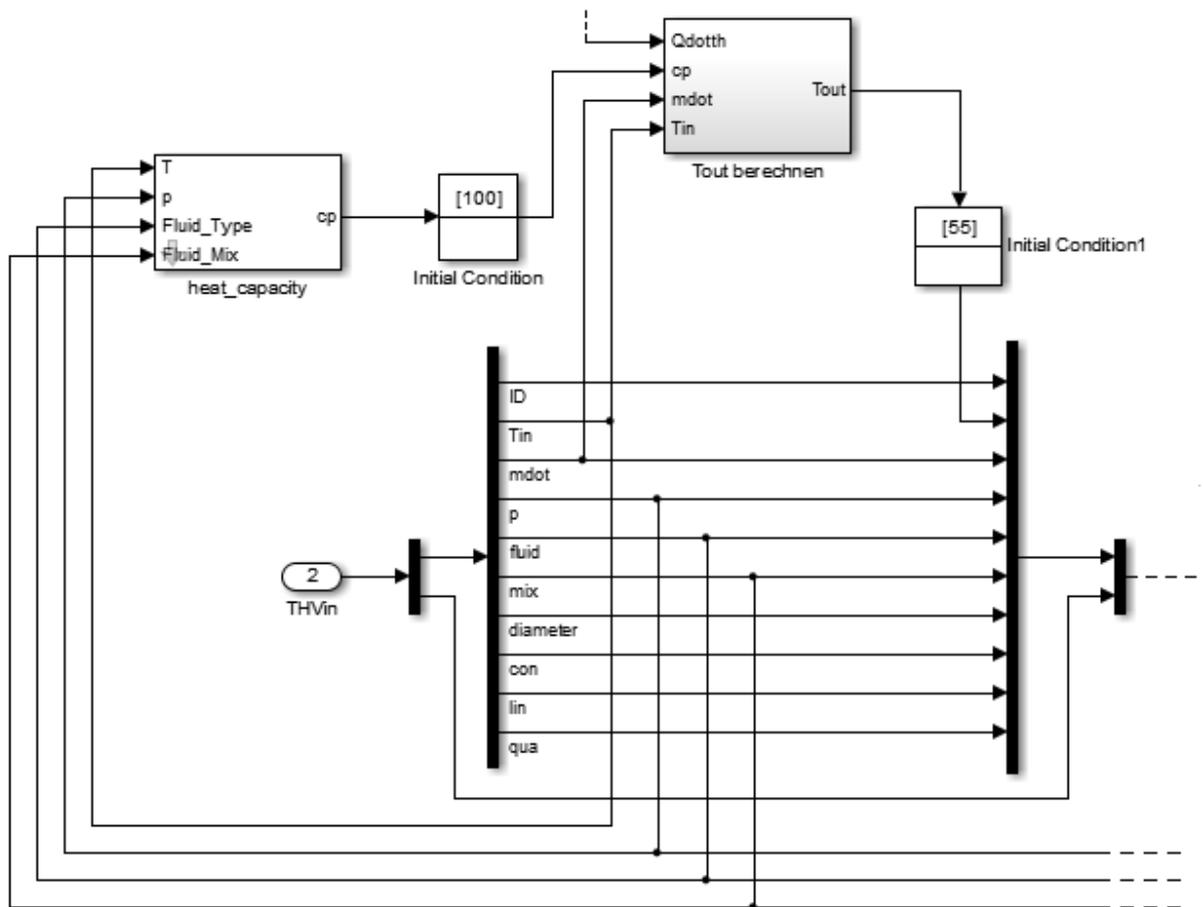


Abbildung 3.6: Wärmeübergabe Fluid BHKW

Der ankommende THV (THVin) wird in seine Komponenten aufgeteilt. Aus den Elementen Temperatur (T), Druck (p), Fluid typ (Fluid\_Type) und Fluid mix (Fluid\_Mix) wird in dem CARNOT-Block „heat\_capacity“ die aktuelle spezifische Wärmekapazität  $c_p$  berechnet. In dem Block „Tout berechnen“ wird aus der aktuellen Wärmeleistung (Qdotth), der spezifischen Wärmekapazität (cp), dem Massenstrom (mdot) und der Eingangstemperatur (Tin) die Ausgangstemperatur nach folgender Formel berechnet:

$$\dot{Q}_{th,Last} = \dot{m} \cdot c_p (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (3.4)$$

Daraus folgt für die Ausgangstemperatur folgender Zusammenhang:

$$\vartheta_2 = \frac{\dot{Q}_{th,Last}}{\dot{m} \cdot c_p} + \vartheta_1 \quad (3.5)$$

Mit der neuen Ausgangstemperatur werden alle Komponenten wieder zu einem THV zusammengefasst und weitergegeben. Die zwei „Initial Conditions“ werden benötigt, da sonst in manchen Fällen Fehlermeldungen erscheinen. Falls die Pumpe für das BHKW ausgeschaltet ist, wird in der Simulation durch Null geteilt.

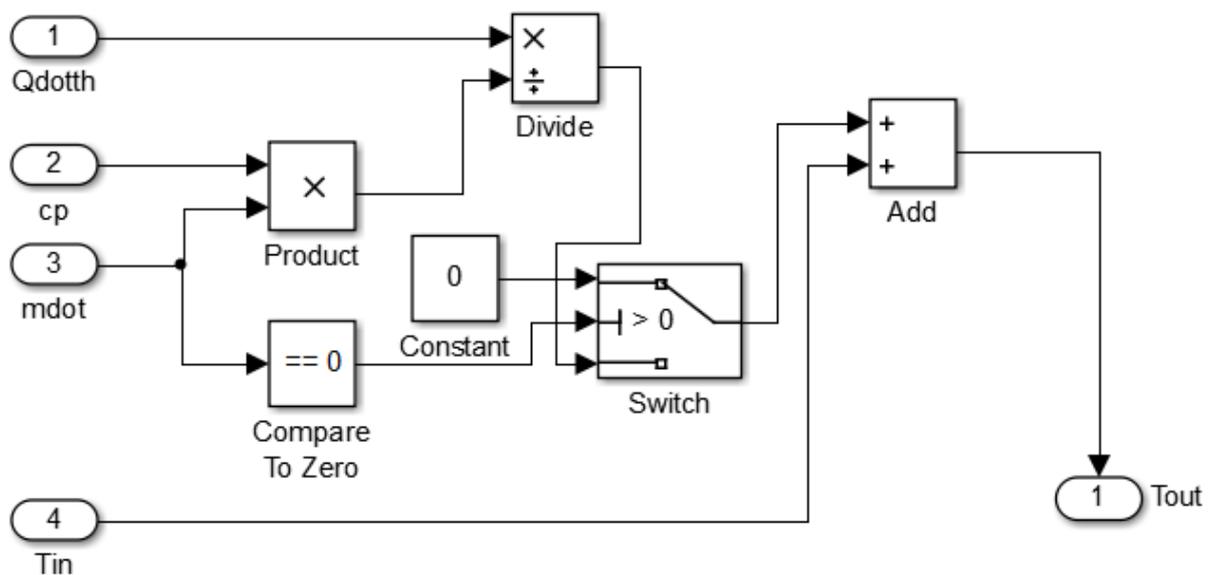


Abbildung 3.7: Berechnung Ausgangstemperatur BHKW

Abbildung 3.7 zeigt den Code des „Tout berechnen“-Blocks. Durch die Fallunterscheidung im „Switch“ wird immer wenn kein Massenstrom vorhanden ist, statt einer nicht definierten Zahl, was eine Fehlermeldung nach sich ziehen würde, eine 0 weiter gegeben.

Die Abwärmeleistung eines BHKWs ist nach dem Einschalten nicht sofort vorhanden, da sich der Motor erst aufheizen muss. Das Aufwärmerhalten kann durch ein PT1-Glied modelliert werden, ist aber bei vielen An- und Abfahrvorgängen in relativ kurzer Zeit eher ungenau, da nicht zwischen kaltem oder warmem Motor unterschieden wird. In dem BHKW-Block wird die thermische Masse des Motors durch einen Wärmespeicher simuliert, der sich erst aufheizen muss und nach dem abschalten wieder abkühlt.

### 3 Simulation in Matlab/Simulink

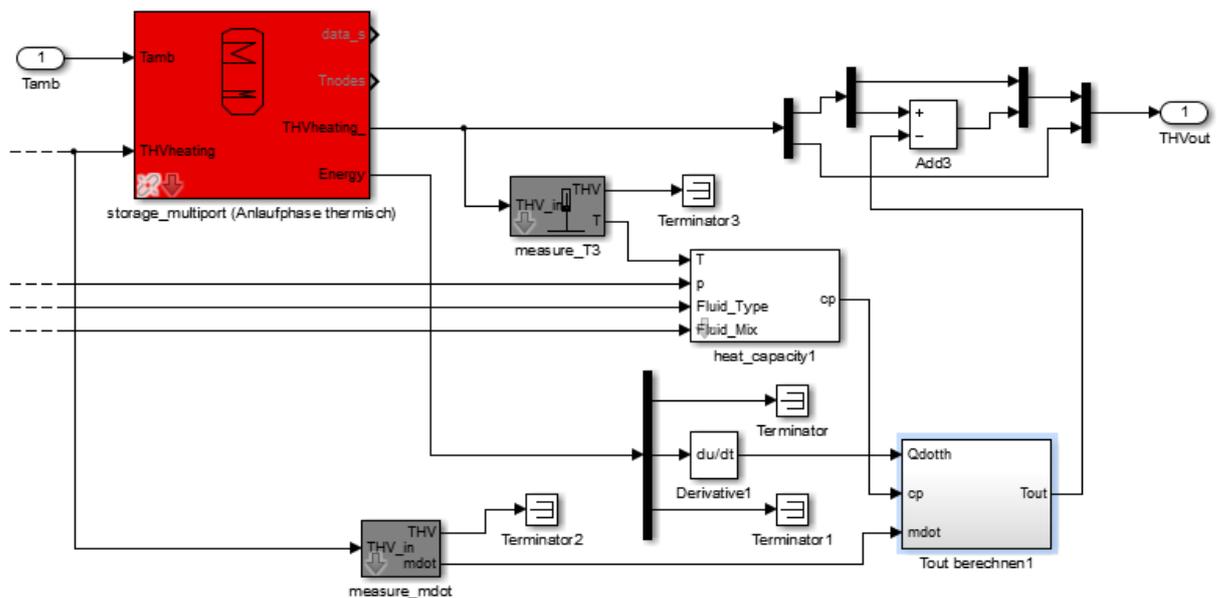


Abbildung 3.8: Modellierung Anlauf- und Abkühlphase BHKW

Der rote Block in Abbildung 3.8 ist ein vorgefertigter Wärmespeicher „storage\_multiport“ aus dem CARNOT-Blockset. In diesem werden die Werte für den Durchmesser, das Volumen, die Wärmedurchgangskoeffizienten für Wand, Deckel und Boden sowie die Anfangstemperatur angegeben. Zur Berechnung der Verluste wird die Umgebungstemperatur ( $T_{amb}$ ) verwendet. Der Eingang (THVheating) ist mit dem ausgehenden THV aus Abbildung 3.7 verbunden, der bereits erhitzt wurde. Ist der Speicher z.B. gerade auf Umgebungstemperatur, gibt der ankommende Wärmestrom zunächst seine Wärme an den Inhalt des Speichers ab und der ausgehende THV (THVheating\_) ist erst nach einer gewissen Zeit bei Nenntemperatur. Wird das BHKW abgeschaltet, kühlt der Inhalt des Speichers wieder langsam ab. Dieser Vorgang simuliert das Aufheizen und Abkühlen des Motors im BHKW. Die Aufheizzeiten richten sich nach den im Buch Mini-Blockheizkraftwerke von Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas [12] geprüften BHKWs. Folgende BHKWs wurden geprüft:

- Senertec Dachs HKA G/F: Elektrische Nennleistung 5,5 kW, Thermische Nennleistung 12,5 kW.
- PowerPlus Technologies Ecopower: Elektrische Nennleistung 4,7 kW, Thermische Nennleistung 12,5 kW.
- EC Power XRGI 15G-TO: Elektrische Nennleistung 15,2 kW, Thermische Nennleistung 30 kW.

### 3 Simulation in Matlab/Simulink

---

Für diese 3 BHKWs liegen Daten für die Zeit bis zum Erreichen der Nennwärmeleistung aus dem kalten, als auch dem warmen Zustand vor. Warmer Zustand bezieht sich hier auf eine Stunde Abkühlzeit seit dem letzten Ausschalten des BHKWs. Dabei ergeben sich die in Tabelle 3.2 dargestellten Daten.

**Tabelle 3.2: Dauer Anfahrvorgang verschiedene BHKWs**

	Zeit bis zum Erreichen der Nennwärmeleistung aus <b>kaltem</b> Zustand in min.	Zeit bis zum Erreichen der Nennwärmeleistung aus <b>warmem</b> Zustand in min.
Dachs HKA G/F	<b>100</b>	<b>30-45</b>
Ecopower	<b>60</b>	<b>40</b>
XRGI 15G-TO	<b>45</b>	<b>30</b>

Die durchschnittliche Anlaufzeit der BHKWs aus dem kalten Zustand ist ca. 70 min, aus dem warmen Zustand ca. 35 min. Durch wiederholtes Verändern des Durchmessers, Volumens und der Wärmedurchgangskoeffizienten in dem Speichermodell werden diese Zeiten im BHKW-Modell ungefähr erreicht. Die genauen Zeiten hängen stark von vielen Faktoren wie Modell, Größe, Einbindung, Regelung und Umgebungstemperatur ab. Die oben vorgenommene Näherung ist für die Zwecke dieser Arbeit ausreichend.

Durch die Wärmeverluste im Speichermodell ist nach dem Speicher die Temperatur im THV-Vektor niedriger als vorher und es entsteht ein Fehler, da die Verluste in den Angegebenen Wirkungsgraden bereits enthalten sind. Um dies zu kompensieren wird der durch die Wärmeverluste entstehende Temperaturverlust wieder ausgeglichen. Der Speicher „storage\_multiport“ aus dem CARNOT-Blockset hat eine Funktion, welche die Wärmeverluste des Speichers ausgibt. Die Verluste werden zusammen mit anderen Daten in dem Energy Vektor (Energy) wie in Abbildung... zu sehen ausgegeben. Diese Verlustenergie wird im Block „Derivative1“ nach der Zeit abgeleitet, um die aktuelle Verlustleistung zu erhalten. Im Block „Tout berechnen1“ wird mit Hilfe der Verlustleistung, der spezifischen Wärmekapazität und dem Massenstrom analog zu oben die durch die Verluste entstandene Temperaturdifferenz ausgerechnet. Die Temperaturdifferenz wird anschließend zu der Temperatur aus dem THV-Vektor addiert (Add3) und dieser wird aus dem BHKW-Block geleitet (THVout). Ist die Pumpe des BHKWs aus, wird keine Verlustleistung abgezogen.

Die elektrische Leistung eines BHKWs ist ebenso wie die Wärmeleistung nicht sofort vorhanden. Die Anlaufzeit beträgt bei den 3 geprüften BHKWs aus dem kalten Zustand im Durchschnitt ca. 5 min und aus dem warmen Zustand weniger als eine Minute. Die Datenaufnahme in der Simulation geschieht alle 10 Minuten. Die Anlaufzeit der elektrischen Leistung wird im Modell nicht berücksichtigt, da der Fehler sehr gering ist und vernachlässigt werden kann. Die Brennstoffleistung eines BHKWs ist beim Start etwas höher als sein eigentlicher Nennwert. Bei den 3 geprüften BHKWs erreicht die Brennstoffleistung nach etwa 5 bis 15 Minuten aus dem kalten Zustand seinen Nennwert. Aus dem warmen Zustand dauert es etwa halb so lang. Hier ist der Fehler etwas größer als bei der elektrischen Leistung, aber im noch vernachlässigbar. Die Anlaufzeiten für die elektrische Leistung und die Brennstoffleistung sind wie bei der Wärmeleistung von vielen verschiedenen Faktoren abhängig und nicht verallgemeinerbar.

#### 3.4 Modell Wärmeversorgung Mehrfamilienhaus

Im Folgenden werden der Aufbau und die Funktion des Modells zur Simulation eines Wärmeversorgungssystems mit Kombination von Solarthermie und BHKW in einem Mehrfamilienhaus erläutert.

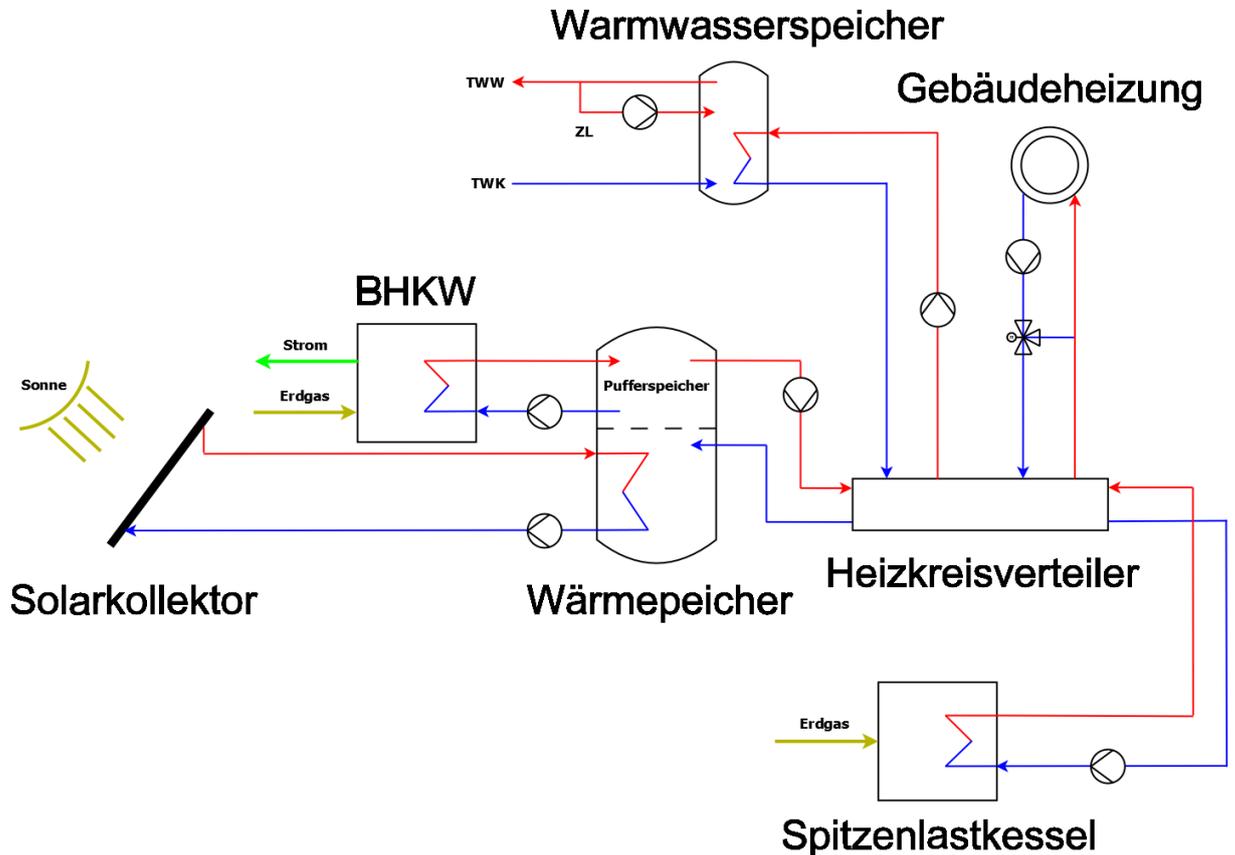


Abbildung 3.9: Aufbau Modell Wärmeversorgungssystem

Wie in Abbildung 3.9 zu sehen, besteht das Modell zur Wärmeversorgung eines Mehrfamilienhauses aus folgenden Hauptkomponenten:

- Gebäudeheizung
- Warmwasserspeicher
- Solarkollektoren
- BHKW
- Spitzenlastkessel
- Wärmespeicher
- Heizkreisverteiler

Zusätzlich beinhaltet das Modell benötigte Pumpen und die Regelung der einzelnen Komponenten. Grundsätzlich funktioniert das System wie folgt. Solarkollektoren und BHKW heizen den Wärmespeicher. Die benötigte Wärme wird zum Heizkreisverteiler gebracht. Reicht die Wärme noch nicht aus, heizt der Spitzenlastkessel (SLK) nach. Der Heizkreisverteiler verteilt die Wärme auf Gebäudeheizung und Warmwasserspeicher. Die Druck- und Temperaturverluste in den Leitungen mit Ausnahme der Warmwasserleitungen werden in dem Modell vernachlässigt. Die Funktion und Abstimmung der einzelnen Teilsysteme wird in den folgenden Kapiteln erläutert. Gestrichelte Linien in den Modellbildern bedeuten, dass die Leitungen außerhalb der Abbildung weiter verlaufen. Dies ist im eigentlichen Gesamtsystem nicht so und ist in den Bildern im Nachhinein bearbeitet. Alle Parameter die im Folgenden nicht angegeben sind, werden erst bei der Optimierung der Anlage festgelegt.

#### 3.4.1 Gebäudeheizung

Die Gebäudeheizung gibt zusammen mit der Warmwasserbereitung die Wärmelast für die Wärmeversorgung im Gebäude vor. Abbildung 3.10 zeigt den Ausschnitt aus dem Gesamtmodell, der die Gebäudeheizung simuliert.

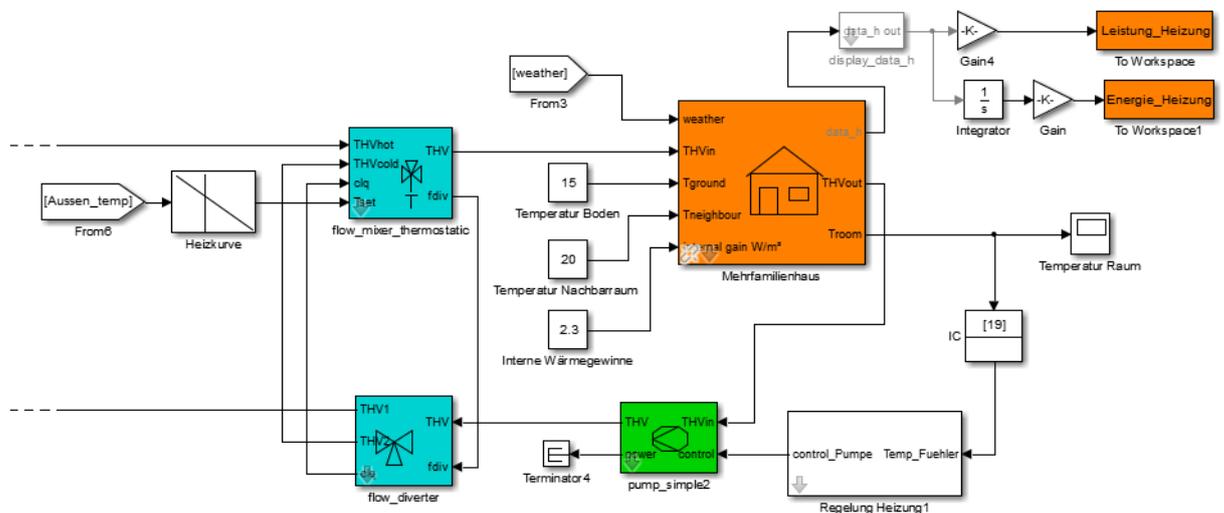


Abbildung 3.10: Modellausschnitt Gebäudeheizung

Den Kern der Gebäudeheizung bildet der CARNOT-Block „simple house“, der hier in „Mehrfamilienhaus“ umbenannt ist. In diesem Block wird ein Haus mit integrierter Heizung definiert. Für die Berechnung benötigt der Block vor allem Angaben zu den Abmessungen und baulichen Kennwerten des Hauses, wie z.B.: Bodenfläche, Raumhöhe,

Wärmedurchgangskoeffizienten für Wände, Fenster, Boden und Decke, Fensterflächen, Ausrichtung des Hauses, Luftwechselrate, usw. Auch Werte wie Bodentemperatur oder interne Wärmegewinne, sowie Anfangsraumtemperatur werden berücksichtigt.

Durch einen ankommenden Heizwasserstrom (THVin) wird eine bestimmte Menge an Wärme übertragen und das Haus geheizt. Der Block berechnet daraus mit Hilfe von Wetterdaten die aktuelle Raumtemperatur im Haus. Der abgekühlte Heizwasserstrom (THVout) wird wieder ausgegeben. Auch die aktuelle Raumtemperatur (Troom) wird aus dem Block geleitet. Die Temperatur des ankommenden Heizwasserstroms wird über ein Mischventil geregelt, das dem warmen Vorlauf kälteres Wasser aus dem Rücklauf beimischt. Die Temperatur wird durch eine Außentemperaturabhängige Heizkurve vorgegeben. Für die Pumpen wird der CARNOT-Block „pump\_simple“ verwendet. In der Pumpe wird der Wärmeträger im jeweiligen Heizkreis definiert, hier Wasser. Außerdem wird der Nennmassenstrom der Pumpe bei Vollast vorgegeben. Die Heizwasserpumpe wird im Lastbereich von 30% bis 100% modulierend nach der vorgegebenen Raumtemperatur geregelt. Unterhalb von 30% Last schaltet die Pumpe ab, wenn die vorgegebene Temperatur 0,5 K überschreitet und schaltet an, wenn die vorgegebene Temperatur 0,5 K unterschreitet. Bei der Gebäudeheizung werden die Heizleistung und die Heizenergie zur Analyse und Optimierung in den Einheiten [kW] und [kWh] mitgeloggt.

#### 3.4.2 Warmwasserbereitung

Die Warmwasserbereitung gibt zusammen mit der Gebäudeheizung die Wärmelast für die Wärmeversorgung im Gebäude vor. Abbildung 3.11 zeigt den Ausschnitt aus dem Gesamtmodell, der die Warmwasserbereitung simuliert.

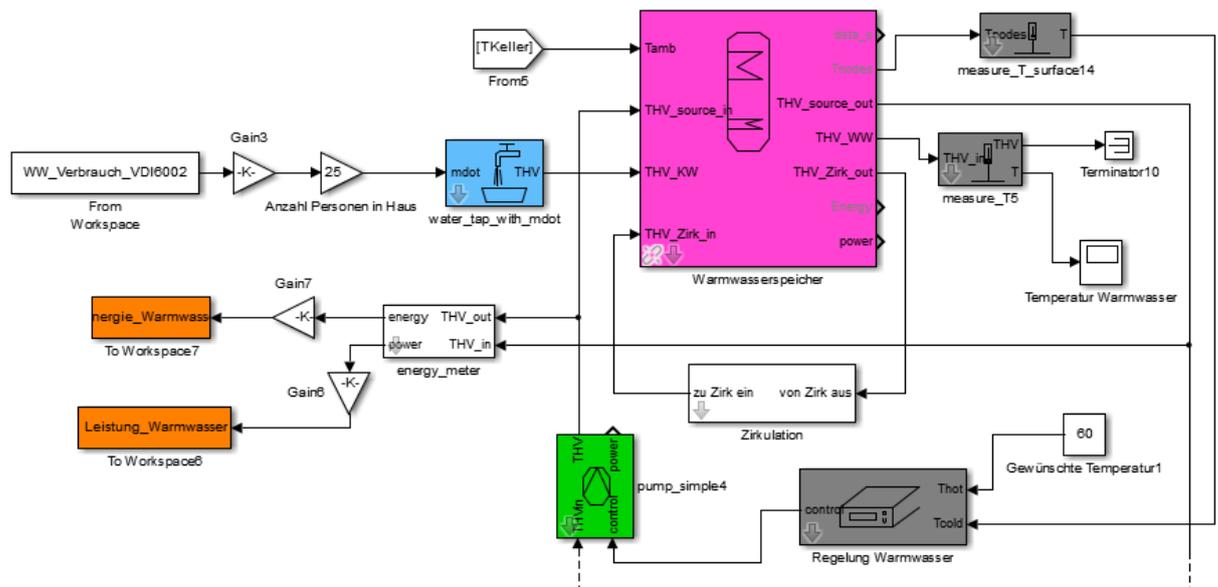


Abbildung 3.11: Modellausschnitt Warmwasserbereitung

Den Kern der Warmwasserbereitung bildet der CARNOT-Block „storage\_multiport“, der hier in „Warmwasserspeicher“ umbenannt ist. Er dient der Bevorratung von Warmwasser. In dem Block werden Angaben zu Durchmesser, Volumen, Wärmedurchgangskoeffizienten für Mantel, Boden und Deckel und Anfangstemperatur gemacht. Außerdem lässt sich Anzahl und Höhe der verschiedenen Ein- und Ausgänge definieren, sowie die Art der Wärmeübertragung auswählen. Die Genauigkeit des Rechenmodells kann durch die Angabe der Rechenknotenanzahl im Speicher vorgegeben werden. Die Anzahl der Knoten entspricht der Anzahl der berechneten Fluidschichten im Speicher. Auch die Anzahl der Temperatursensoren kann angegeben werden, was nur für die Auswertung relevant ist. Die ankommenden THVs geben je nach Temperatur Wärme an den Inhalt des Speichers ab oder nehmen Wärme auf. Die erhitzten oder abgekühlten THVs werden wieder ausgegeben. Zusätzlich verliert der Speicher je nach Umgebungstemperatur, welche dem Speicher von außen vorgegeben wird, Wärme an die Umgebung. Durch den „Tnodes“-Ausgang ist es möglich die Temperatur in der gewünschten Höhe im Speicher auszugeben.

In dem Modell kommt am ersten Eingang des Speichers der THV des Heizwasserstroms vom Heizkreisverteiler an und gibt seine Wärme über einen Wärmeübertrager an das Trinkwasser ab. Anschließend fließt das abgekühlte Heizwasser zum Heizkreisverteiler zurück. Der Eingang des Heizwassers ist bei 50% der Höhe im Speicher, der Ausgang bei 1% der Höhe im Speicher. Die Heizwasserpumpe läuft im an/aus-Betrieb. Der Massenstrom wird in der Pumpe vorgegeben. Fällt die Temperatur im Speicher unter 55°C schaltet die Pumpe ein, steigt die Temperatur auf 60°C schaltet die Pumpe wieder ab. Der Temperaturfühler dafür ist bei 80% der Höhe im Speicher. Eine Warmwassertemperatur von 60°C wird benötigt, um Legionellenbildung im Trinkwasser zu vermeiden. Am zweiten Eingang des Speichers kommt der THV des Kaltwassers an und wird direkt in den Speicher geleitet und erhitzt. Das so erhitze Warmwasser verlässt den Speicher wieder. Der Eingang des Kaltwassers liegt bei 1% der Höhe des Speichers, der Ausgang des Warmwassers bei 99% der Höhe des Speichers. Die Menge an Warmwasser wird durch ein Profil nach VDI 6002 Blatt 1 Anhang D [15] vorgegeben. Die Profile wurden mit Hilfe von Verbrauchsmessungen erstellt. Das Profil ist nach Monaten, Wochentagen und Stunden aufgelöst. Das Profil geht von einem durchschnittlichen Warmwasserverbrauch Pro Tag und Person von 28 Litern aus. Je nach Monat ist er aber etwas höher oder niedriger. In den kalten Jahreszeiten ist der Verbrauch höher als in den warmen. Ebenso ist der Verbrauch je nach Wochentag höher oder niedriger. Der Verbrauch ist an Werktagen geringer als am Wochenende. Der Verbrauch je Stunde schwankt ebenfalls stark, je nachdem welche Uhrzeit gerade ist. Hier ist allen Tagen gemein, dass in den frühen Tagesstunden, der Bedarf sehr gering ist. An Werktagen steigt der Verbrauch um die Sechste bis Siebte Stunde stark an, fällt über den Tag wieder ab und steigt am Abend wieder an. An Wochenendtagen steigt der Verbrauch etwas später am Vormittag an und wird am Abend nicht mehr so hoch. Aus diesen Angaben wird ein Jahresprofil erstellt, das über stündliche Werte verfügt. Je nach Personenanzahl im Mehrfamilienhaus wird der Warmwasserverbrauch noch multipliziert. Die Eingangstemperatur aus der öffentlichen Wasserversorgung wird mit 15°C angenommen. Am dritten Eingang und Ausgang des Speichers werden Zirkulationsverluste simuliert. Gerade in größeren Gebäuden, wie Mehrfamilienhäuser mit zentraler Warmwasserbereitung geht in den Leitungen Wärme verloren, besonders wenn kein warmes Wasser entnommen wird. Um nicht solange auf warmes Wasser warten zu müssen und um Legionellen in den Leitungen zu vermeiden zirkuliert das warme Wasser durch eine Pumpe in den Leitungen. Dies wird in dem Modell durch einen konstanten Massenstrom mit festgelegtem Temperaturabfall simuliert, der ständig bei 99% der Höhe des Speichers entnommen und bei 70% der Höhe des Speichers

wieder zugeführt wird. Die Werte werden so definiert, dass die Zirkulation zusätzlich etwa 70% des Energieverbrauchs für die Warmwasserbereitung verbraucht. Bei der Warmwasserbereitung werden die Heizleistung und die Heizenergie für den Warmwasserspeicher zur Analyse und Optimierung in den Einheiten [kW] und [kWh] mitgeloggt.

#### 3.4.3 Solaranlage

Die Solaranlage ist einer von drei Wärmeerzeugern im Mehrfamilienhaus. Ihre Leistung ist vor allem von der Einstrahlung der Sonne abhängig. Abbildung 3.12 zeigt den Ausschnitt aus dem Gesamtmodell, der die Solaranlage simuliert.

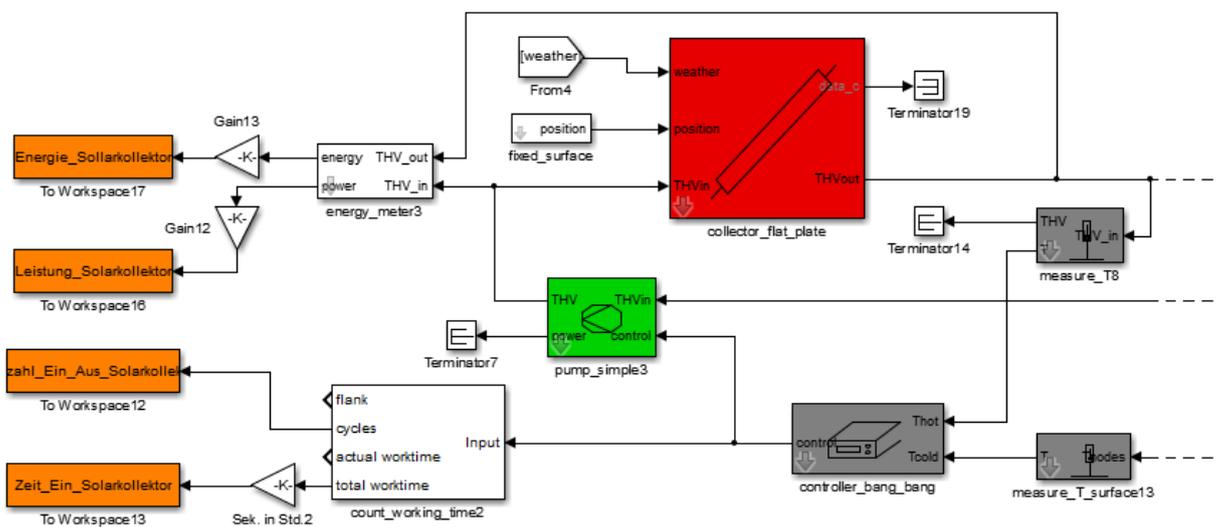


Abbildung 3.12: Modellausschnitt Solaranlage

Den Kern der Solaranlage bildet der CARNOT-Block „collector\_flat\_plate“, der die Solarkollektoren simuliert. In dem Block werden Angaben zu Fläche, optischem Wirkungsgrad, Wärmedurchgangskoeffizienten, effektiver Wärmekapazität und Anfangstemperatur gemacht. Zusätzlich werden Angaben über die Position und Ausrichtung der Solarkollektoren von außen vorgegeben. Zur Berechnung der Wärmeleistung werden außerdem Wetterdaten benötigt.

Der ankommende THV vom Wärmespeicher wird in den Solarkollektoren erhitzt und wieder ausgegeben. Die Solarpumpe läuft im an/aus-Betrieb. Der Massenstrom wird in der Pumpe vorgegeben. Ist die Temperatur am Ausgang der Solarkollektoren 2 K höher als im Wärmespeicher auf 45 % der Höhe im Speicher, schaltet die Pumpe ein. Ist die Temperatur



Temperatur in 90% der Höhe des Speichers die vorgegebene Temperatur um 2 K schalten das BHKW und die Pumpe wieder ab. Für das BHKW werden die Heizleistung, die tatsächliche Heizenergie und die theoretische Heizenergie ohne Anfahrverluste zur Analyse und Optimierung in den Einheiten [kW] und [kWh] mitgeloggt. Ebenso werden neben der Brennstoffleistung und der Brennstoffenergie auch die elektrische Leistung und die elektrische Energie in denselben Einheiten mitgeloggt. Zusätzlich werden die an/aus-Zyklen, sowie die Gesamtbetriebszeit des BHKWs mitgeloggt.

#### 3.4.5 Spitzenlastkessel

Der Spitzenlastkessel ist einer von drei Wärmeerzeugern im Mehrfamilienhaus und wird benötigt um die Spitzenlast im Gebäude abzudecken. Abbildung 3.14 zeigt den Ausschnitt aus dem Gesamtmodell, der den Spitzenlastkessel simuliert.

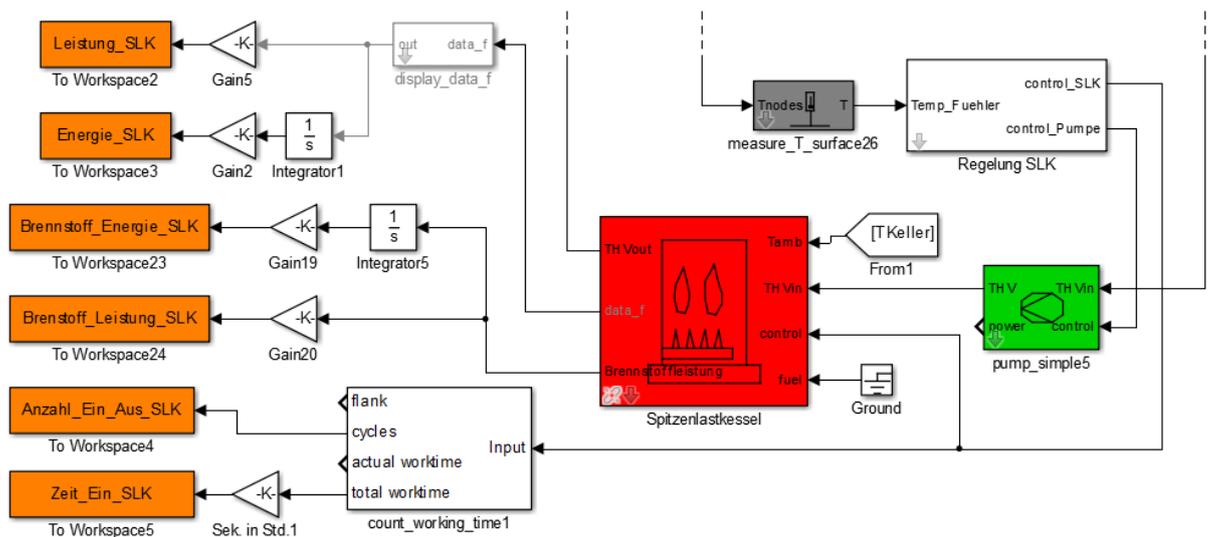


Abbildung 3.14: Modellausschnitt Spitzenlastkessel

Den Spitzenlastkessel bildet der vorgefertigte CARNOT-Block „furnace“, der hier in „Spitzenlastkessel“ umbenannt und leicht modifiziert ist. Angegeben werden Nennwärmeleistung, eine Wärmeverlustkoeffizient, das Volumen des Kessels und die Anfangstemperatur. Von außen werden dem SLK die Umgebungstemperatur und die Art des Brennstoffs vorgegeben. Der „furnace“-Block hat standardmäßig eine Funktion zur Berechnung der aktuellen Brennstoffleistung. Dabei müssen eine Wirkungsgrad-Kurve, die von mehreren Faktoren abhängig ist, angegeben werden. Außerdem müssen genaue Angaben zur Brennstoffzusammensetzung gemacht werden. Diese Funktion wird hier nicht

genutzt, stattdessen ist der Block leicht modifiziert, was eine vereinfachte Berechnung der Brennstoffleistung zur Folge hat.

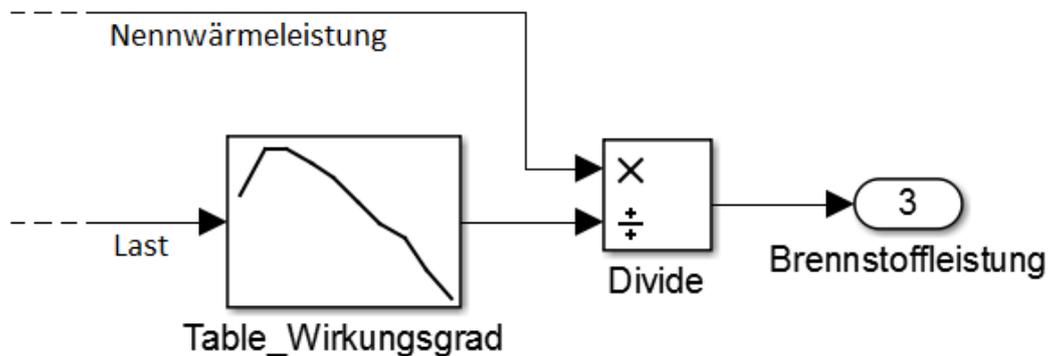


Abbildung 3.15: Berechnung Brennstoffleistung Spitzenlastkessel

Wie in Abbildung 3.15 zu sehen, wird die Brennstoffleistung innerhalb des „Spitzenlastkessel“-Blocks durch den Quotienten von Nennwärmeleistung und Lastabhängigem Wirkungsgrad berechnet. Der Lastabhängige Wirkungsgrad wird in dem Lookup „Table\_Wirkungsgrad“ vorgegeben.

Der ankommenden THV vom Heizkreisverteiler wird im Spitzenlastkessel erhitzt und wieder ausgegeben. Die Pumpe läuft im an/aus-Betrieb. Der durchströmende Wärmeträger ist Wasser und wird ebenso wie der Massenstrom in der Pumpe definiert. Der Spitzenlastkessel wird im Lastbereich von 25% bis 100% modulierend nach der vorgegebenen Heizwassertemperatur geregelt. Unterhalb von 25% Last schaltet der Spitzenlastkessel an wenn die vorgegebene Heizwassertemperatur unterschritten wird und schaltet aus wenn die Temperatur um 2 K überschritten wird. Die Heizwassertemperatur wird im Heizkreisverteiler gemessen. Die Pumpe schaltet an, wenn der Spitzenlastkessel in Betrieb ist und schaltet aus, wenn der Spitzenlastkessel außer Betrieb ist. Für den Spitzenlastkessel werden die Heizleistung und die Heizenergie zur Analyse und Optimierung in den Einheiten [kW] und [kWh] mitgeloggt. Ebenso werden die Brennstoffleistung und die Brennstoffenergie in denselben Einheiten mitgeloggt. Zusätzlich werden die an/aus-Zyklen, sowie die Gesamtbetriebszeit des Spitzenlastkessels mitgeloggt.

#### 3.4.6 Wärmespeicher

Der Wärmespeicher dient der Bevorratung von Wärme aus der Solaranlage und dem BHKW, um mit beiden Wärmeerzeugern längere Laufzeiten zu erzielen. Abbildung 3.16 zeigt den Ausschnitt aus dem Gesamtmodell, der den Wärmespeicher simuliert.

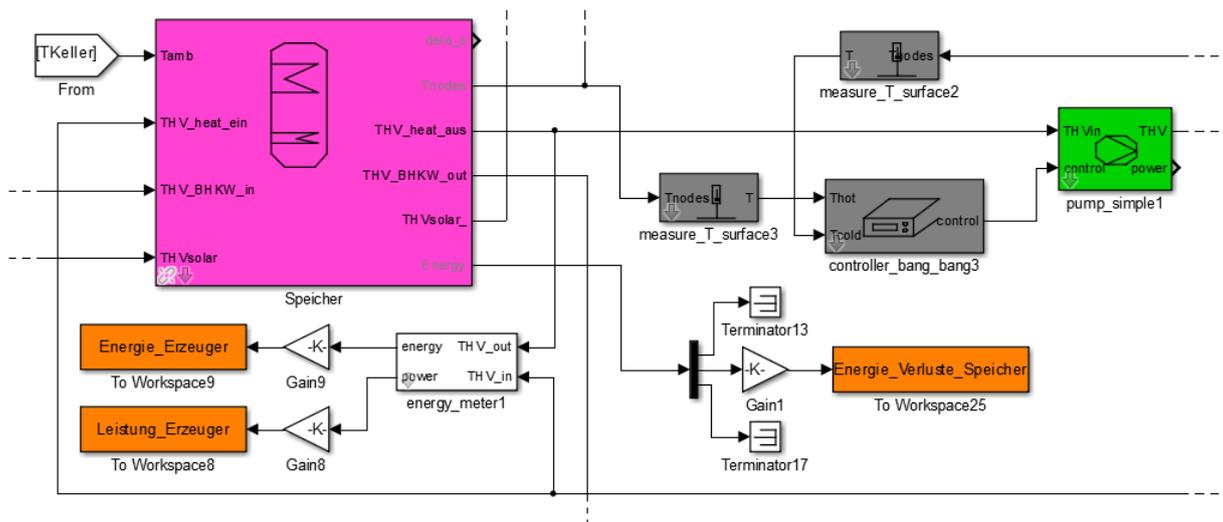


Abbildung 3.16: Modellausschnitt Wärmespeicher

Der Wärmespeicher wird durch einen „storage\_multiport“-Block simuliert. Wie beim Warmwasserspeicher werden Angaben zu Durchmesser, Volumen, Wärmedurchgangskoeffizienten für Mantel, Deckel und Boden und Anfangstemperatur gemacht. Von außen wird die Umgebungstemperatur vorgegeben. Ebenso die Rechenknoten- und Schichtenanzahl wird definiert.

Der erste THV kommt vom Heizkreisverteiler und wird ohne Wärmeübertrager in den Speicher geleitet. Der aufgeheizte THV verlässt den Speicher wieder Richtung Heizkreisverteiler. Die Eingangshöhe liegt bei 50%, die Ausgangshöhe bei 99% des Speichers. Die Pumpe, die den Massenstrom zwischen Wärmespeicher und Heizkreisverteiler regelt läuft im an/aus-Betrieb. Als Wärmeträger wird Wasser benutzt. Ist die Temperatur im Heizkreisverteiler 2 K kälter als die Temperatur bei 95% der Höhe im Speicher, schaltet die Pumpe an. Ist die Temperatur im Heizkreisverteiler gleich der Temperatur bei 95% der Höhe im Speicher, schaltet die Pumpe aus. Der zweite THV kommt vom BHKW und wird ohne Wärmeübertrager in den Speicher geleitet. Der abgekühlte THV verlässt den Speicher wieder

Richtung BHKW. Die Eingangshöhe liegt bei 99%, die Ausgangshöhe bei 60% des Speichers. Die Regelung des Kreises wird in Abschnitt 3.4.4 erklärt. Der dritte THV kommt von der Solaranlage gibt seine Wärme über einen Wärmeübertrager im Speicher ab. Der abgekühlte THV verlässt den Speicher wieder Richtung Solaranlage. Die Eingangshöhe liegt bei 45%, die Ausgangshöhe bei 1% des Speichers. Die Regelung des Kreises wird in Abschnitt 3.4.3 erklärt. Das getrennte Einleiten des BHKWs oben und der Solaranlage unten sorgt dafür, dass die Solaranlage auch bei niedrigen Kollektortemperaturen Wärme bereitstellen kann. Durch eine Simulationsreihe mit verschiedenen Eingangs- und Ausgangshöhen sind diese Werte als sehr gut bestätigt worden, da so insgesamt am meisten Wärmeenergie aus der Kombination von Solaranlage und BHKW gewonnen wurde, unabhängig von anderen Parametern. Für den Wärmespeicher werden Wärmeleistung und Wärmeenergie, die an den Heizkreisverteiler übergeben werden zur Analyse und Optimierung in den Einheiten [kW] und [kWh] mitgeloggt. Zusätzlich wird die Wärmeverlustenergie in der Einheit [kWh] mitgeloggt.

#### 3.4.7 Heizkreisverteiler

Der Heizkreisverteiler dient der Verteilung der Wärme von den Erzeugern zu den Verbrauchern. Abbildung 3.17 zeigt den Ausschnitt aus dem Gesamtmodell, der den Heizkreisverteiler simuliert.

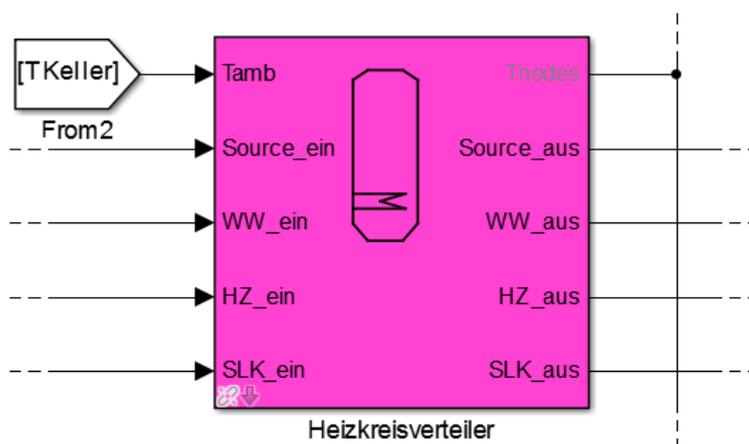


Abbildung 3.17: Modellausschnitt Heizkreisverteiler

In der CARNOT-Bibliothek ist kein Modell eines Heizkreisverteilers vorhanden. Darum fungiert stattdessen ein Wärmespeicher als Heizkreisverteiler. Als Modell wird der „storage\_multiport“, wie bei den beiden anderen Speichern verwendet. Die Werte für Durchmesser und Volumen werden klein genug gewählt, dass das System noch gut

funktioniert, aber der Einfluss des Speichers minimal ist. Hier wird für das Volumen  $0,1 \text{ m}^3$  und den Durchmesser  $0,349 \text{ m}$  gewählt. Die Rechengenauigkeit wird auf 3 Rechenknoten festgelegt. Für die Wärmedurchgangskoeffizienten für Mantel, Boden und Decke werden Standardisolierungswerte verwendet. Mit der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,04 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$  und der Dicke  $d = 10 \text{ cm}$  ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient von  $k = 0,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$ . Von außen wird dem Speicher die Umgebungstemperatur mitgegeben. Alle THVs geben ihre Wärme direkt ohne Wärmeübertrager an den Speicher ab oder nehmen sie auf. Für die Regelung des Spitzenlastkessels und der Wärme aus dem Wärmespeicher wird die Temperatur im Heizkreisverteiler benötigt, die durch den Ausgang „Tnodes“ bereitgestellt wird. Die Regelung der einzelnen Kreise wird in den jeweiligen Kapiteln erklärt.

#### 3.4.8 Stromverbrauch

Neben dem Wärmeverbrauch, wird zusätzlich der Stromverbrauch im Mehrfamilienhaus betrachtet. Abbildung 3.18 zeigt den Ausschnitt aus dem Gesamtmodell, der den Stromverbrauch simuliert.

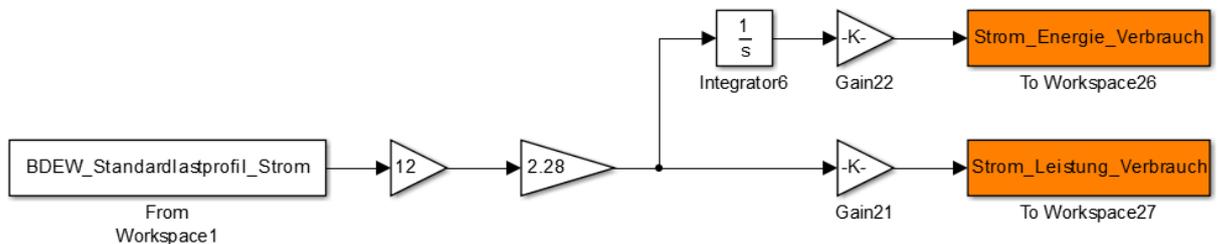


Abbildung 3.18: Modellausschnitt Stromverbrauch

Der Stromverbrauch im Mehrfamilienhaus wird durch das Standardstromlastprofil H0 des BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.) abgebildet. Das Profil H0 gilt dabei für Haushalte [16]. Das Profil wird vor allem von Energieversorgern genutzt um bei nicht vorhandenen Lastganglinien, eine Prognose über den zeitlichen Verlauf der Stromabnahme geben zu können. Der Stromverbrauch einzelner Komponenten wird nicht näher betrachtet.

Das Profil gibt Werte alle 15 Minuten vor. Der Verlauf eines Tages an einem Wochentag, sowie Samstag und Sonntag ist jeweils unterschiedlich. Außerdem werden Sommer, Winter und Übergangszeit unterschieden. Winter ist dabei von 1.11. bis 20.3. Sommer ist von 15.5. bis 14.9. Dazwischen ist jeweils Übergangszeit. Das Standardstromlastprofil ist auf

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

1.000 kWh im Jahr normiert und muss je nach Verbrauch mit einem Faktor multipliziert werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass Haushalte im Normalfall eine Stromgrundlast haben und der Stromverbrauch damit bei mehreren Personen nicht proportional ansteigt. Für den Stromverbrauch werden elektrische Leistung und elektrische Energie zur Analyse und Optimierung in den Einheiten [kW] und [kWh] mitgeloggt.

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

Zur Optimierung des Systems steht eine große Anzahl an Parametern zur Verfügung. Dies birgt einerseits den Vorteil die Anlage bis ins Detail optimieren zu können, andererseits nimmt es sehr viel Zeit in Anspruch sämtliche Varianten zu simulieren und ein Optimum zu finden. Im Folgenden wird ein sinnvoller Ausgangspunkt des Systems gewählt und die dazugehörigen Parameter festgehalten. Dann werden einige wichtige Parameter variiert und die Ergebnisse dokumentiert. Daraus wird versucht eine optimale Abstimmung des Systems, hinsichtlich energetischem und ökonomischen Nutzen zu finden.

### 4.1 Simulation verschiedene Varianten

Ziel der verschiedenen Varianten ist, die verschiedenen Wärmeerzeuger und den Wärmespeicher variieren zu könne, ohne am Rest des Systems viel verändern zu müssen. Dazu werden die Werte einiger Parameter im System sinnvoll festgelegt oder durch probieren die besten Werte ermittelt. Ausgangspunkt ist die Auswahl des Gebäudes. Dann werden nach und nach die restlichen Werte des Systems auf die Anforderungen der Heizlast, des Warmwasserverbrauchs und des Stromverbrauchs abgestimmt. Hat man ein gut funktionierendes System gefunden werden schließlich verschiedene Varianten für die Größe der Wärmeerzeuger und den Wärmespeicher simuliert und die Ergebnisse festgehalten.

#### 4.1.1 Auswahl Mehrfamilienhaus

Die Ausgangslage ist die Definition des Mehrfamilienhauses. Dazu werden Datensätze des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) herangezogen [17]. Die Datensätze unterteilen die Wohngebäude in Einfamilienhäuser, Reihenhäuser, Mehrfamilienhäuser, große Mehrfamilienhäuser und Hochhäuser. Außerdem sind sie in verschiedene Baujahrgruppen eingeteilt. Die baulichen Werte stellen dabei typische Werte für die Art des Gebäudes und den Zeitraum des Baujahres dar.

#### 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

Für diese Arbeit wird ein Mehrfamilienhaus aus dem Zeitraum 1995-2001 gewählt und die Daten für das Gebäude größtenteils aus den Dokumenten des IWU übernommen. Folgende Werte in Tabelle 4.1 werden für das simulierte Mehrfamilienhaus verwendet:

**Tabelle 4.1: Werte Mehrfamilienhaus [17]**

	Wert
Baujahr	1995-2001
Beheizte Wohnfläche	759 m <sup>2</sup>
Mittlere lichte Raumhöhe	2,71 m
Anzahl Vollgeschosse	4
Anzahl Wohneinheiten	12
Oberer Gebäudeabschluss	
Art	OG-Decke
Fläche	283,7 m <sup>2</sup>
U-Wert	0,21 W/m <sup>2</sup> K
Wandflächen	
Fläche	697,8 m <sup>2</sup>
U-Wert	0,28 W/m <sup>2</sup> K
Unterer Gebäudeabschluss	
Fläche	283,7 m <sup>2</sup>
U-Wert	0,34 W/m <sup>2</sup> K
Südfenster	
Fläche	77,5 m <sup>2</sup>
U-Wert (Gesamt-Fenster)	1,6 W/m <sup>2</sup> K
g-Wert (Senkrechter Strahlungseinfall)	0,63
Ost/West-Fenster	
Fläche	45,4 m <sup>2</sup>
U-Wert (Gesamt-Fenster)	1,6 W/m <sup>2</sup> K
g-Wert (Senkrechter Strahlungseinfall)	0,63
Nordfenster	
Fläche	39,9 m <sup>2</sup>
U-Wert (Gesamt-Fenster)	1,6 W/m <sup>2</sup> K
g-Wert (Senkrechter Strahlungseinfall)	0,63

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

Da der „simple house“-Block einen großen Raum berechnet, wird für realistischere Werte die Wohnfläche durch 4 (Anzahl Vollgeschosse) geteilt und die Raumhöhe mit 4 multipliziert.

Die Fensterfläche der Ost- und Westrichtung aus der Tabelle wird je zur Hälfte auf die Ost- und Westseite aufgeteilt. Der g-Wert wird in dem Modell noch mit einem Anteil für die Fläche der Fensterrahmen verrechnet, der kein Licht durchlässt. Die Fläche des Fensterrahmens wird mit 20% angenommen, der g-Wert der Fenster wird daher mit 0,8 multipliziert. Die zu regelnde Raumtemperatur wird auf den Standardwert nach DIN EN 12831 Anhang D.2 für Wohnhäuser von 20 °C festgelegt [18]. Die Anfangstemperatur für die Simulation wird daher auch auf 20 °C festgelegt. Ein weiterer Parameter des Haus-Modells ist die Luftwechselrate. Hier wird der Grundluftwechsel nach DIN 4108-2 Abschnitt 8.4.2 für Wohngebäude von 0,5 1/h angenommen [19]. Da keine Lüftung eingebaut ist, gibt es auch keine Wärmerückgewinnung. Die Wärmekapazität des Gebäudes wird anhand von vorhandenen Modellen angepasst und auf die Größe des aktuellen Gebäudes übertragen. Dabei hat sich ein Wert von 750 MJ/K ergeben. Für die Wärmeübertragung des Heizungssystems wird in dem Modell ein umgekehrter Wärmewiderstand in W/K angegeben. Durch mehrmaliges Simulieren mit verschiedenen Werten hat sich der Wert von 1500 W/K als gut herausgestellt.

Dem Modell werden von außen Wetterdaten vorgegeben. Die hier verwendeten Wetterdaten, stellen einen Durchschnitt aus 10 Jahren für den Standort Ingolstadt dar. Sie werden am Institut für erneuerbare Energien für verschiedene Zwecke genutzt. Die Wetterdaten werden im gesamten Modell verwendet. Außerdem werden dem Modell von außen die Bodentemperatur und die Temperatur eines Nachbarrums vorgegeben. Die Bodentemperatur wird mit 15 °C angenommen. Die Temperatur eines Nachbarrums wird verwendet, wenn mehrere Räume einzeln simuliert werden und Wärmeaustausch zwischen den Räumen stattfindet. Da in diesem Fall nur ein großer Raum simuliert wird, wird für die Temperatur des Nachbarrums die gewünschte Raumtemperatur von 20 °C angenommen um die simulierten Wärmeverluste oder Gewinne gering zu halten. Zusätzlich werden dem Modell von außen interne Wärmegewinne vorgegeben. Das CARNOT-Tool gibt einen Standardwert von 2,3 W/m<sup>2</sup> vor, der hier übernommen wird.

### 4.1.2 Auswahl Parameter Gesamtmodell

Bei der Auswahl der Parameter wird mit den Wärmeverbrauchern, also Heizung und Warmwasserbereitung begonnen. Anschließend werden die Parameter des SLK bestimmt

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

und zuletzt die Parameter des Wärmespeichers, der Solarthermie-Anlage, des BHKWs und des Stromverbrauchs.

Eine wichtige Entscheidung ist die Festlegung der Heizwassertemperatur. Diese wird in diesem Modell durch den Warmwasserspeicher vorgegeben. Um Legionellenbildung zu vermeiden, sollte die Warmwassertemperatur mindestens 55 °C betragen. In diesem Modell wird, wie weiter oben schon beschrieben, der Inhalt des Warmwasserspeichers auf 60 °C geheizt. Um diese Warmwassertemperatur zu erreichen wird für das Heizwasser mindestens eine Temperatur von 62 °C benötigt. Das gesamte Heizungssystem ist daher auf 62 °C Heizwassertemperatur ausgelegt.

### Gebäudeheizung

Der Regler der Heizungspumpe wird wie oben beschrieben auf eine Soll-Raumtemperatur von 20 °C eingestellt. Der Nennmassenstrom der Heizungspumpe wird so eingestellt, dass die Pumpe am kältesten Tag im Jahr zu 100% ausgelastet ist und die Raumtemperatur von 20 °C gehalten werden kann. Dies ist hier bei einem Massenstrom von 0,292 kg/s der Fall. Die Heizwassertemperatur für die Gebäudeheizung wird durch eine Außentemperatur-abhängige Heizkurve vorgegeben. Diese wird so definiert, dass zu jeder Zeit die Raumtemperatur gehalten werden kann, die Pumpe aber möglichst ausgelastet wird.

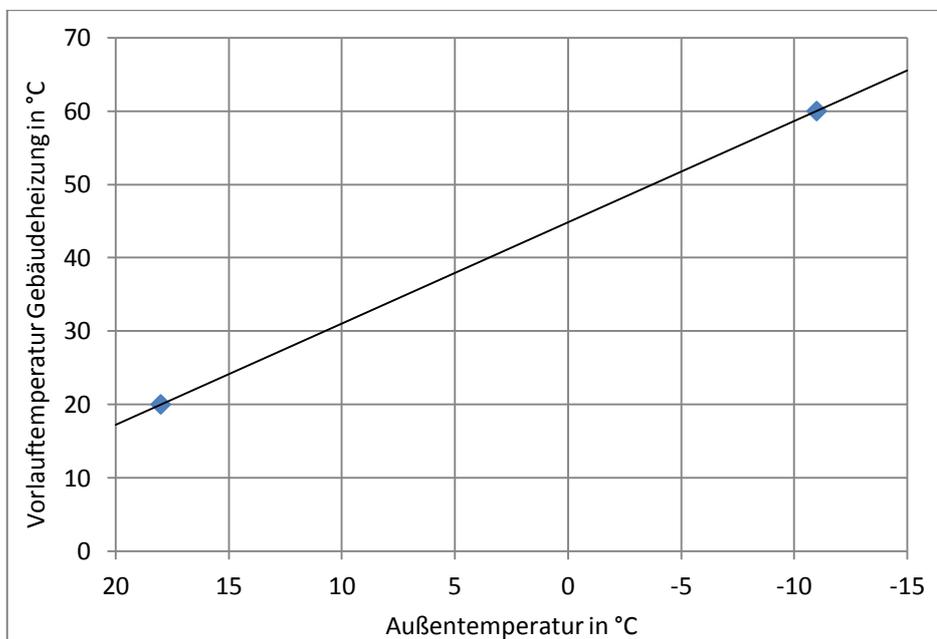


Abbildung 4.1: Heizkurve Gebäudeheizung

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

In Abbildung 4.1 sieht man die Heizkurve der Gebäudeheizung. Der Verlauf wurde zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Punkt linearisiert, was für dieses Modell ausreicht. Reale Heizkurven bilden, eine in der Mitte leicht nach oben gekrümmte Kurve.

### Warmwasserbereitung

Das Profil des Warmwasserbedarfs gilt für eine Person. Daher muss es noch mit der Anzahl der Bewohner multipliziert werden. In Bayern leben in einer Wohneinheit mit Stand 2013 im Durchschnitt 2,06 Bewohner [20]. Das ergibt bei 12 Wohneinheiten ca. 25 Bewohner.

Die Auslegung des Warmwasserspeichers erfolgt ebenso auf Basis der Bewohneranzahl. Pro Person wird mit 30 bis 50 Liter Speichervolumen gerechnet. Ist die Heizleistung der Wärmeerzeuger größer als 15 kW reichen 30 Liter pro Person [21]. Der Warmwasserspeicher hat somit ein Volumen von 25 mal 30 Liter, was 750 Liter ergibt. Bei der Wärmedämmung werden Werte von Warmwasserspeichern am Markt verwendet. Der Buderus Logalux SU750 wird mit einer Polyesterfaservlies-Dämmung mit Lambda-Wert von 0,0365 W/mK angeboten. Für den Mantel ergibt das bei einer Dämmschichtdicke von 100mm einen Wärmedurchgangskoeffizient von 0,365 W/m<sup>2</sup>K. Für Boden und Deckel ergeben sich bei einer Dämmschichtdicke von 160 mm ein Wärmedurchgangskoeffizient von 0,228 W/m<sup>2</sup>K. Der Durchmesser des Speichers beträgt 0,79 m. Der Speicher wird mit 10 Rechenknoten simuliert. Die Umgebungstemperatur wird dem Speicher von außen mitgegeben. Es wird angenommen, dass sich die Anlage in einem Raum befindet und dieser sich etwas aufheizt. Daher wird eine Umgebungstemperatur von 25 °C angenommen. Für den Wärmeübertrager des Heizungswassers im Speicher hat sich ein Wert von 2500 W/K, nach mehrmaligem testen mit anderen Werten, als geeignet herausgestellt. Um die Zirkulationsverluste im Warmwassernetz zu simulieren wird ein zirkulierender Warmwasserstrom angenommen, der einen Massenstrom von 0,240 kg/s besitzt und auf seinem Weg 2 K an Temperatur verliert.

Die Pumpe der Warmwasserbereitung wird so ausgelegt, dass bei laufender Pumpe der Inhalt des Warmwasserspeichers immer auf 60 °C geheizt werden kann. Dies ist hier bei einem Massenstrom von 0,375 kg/s der Fall.

### Spitzenlastkessel

Die Leistung des Spitzenlastkessels und der Massenstrom der Pumpe werden in Kapitel 4.1.3 und 4.1.4 näher betrachtet und festgelegt. Der Regler regelt den Spitzenlastkessel nach der

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

Temperatur im Heizkreisverteiler. Über 25% Last wird genau auf 62 °C geregelt, unter 25% Last schaltet der Spitzenlastkessel bei einer Temperatur unter 62 °C ein und bei einer Temperatur von über 64 °C aus. Im Standard „furnace“-Block ist ein Wert für den Wärmeverlust des Spitzenlastkessels von 3 W/K, bei einer Leistung von 20 kW angegeben. Da die Leistung des Spitzenlastkessels in diesem Modell bei ähnlichen Größen liegen wird, wird der Wert für den Wärmeverlust übernommen. In dem Modell wird auch das Volumen des Kessels angegeben. Dieser Wert verändert das Ergebnis nur sehr gering. Er wird bei der späteren Variation daher nicht verändert und auf 100 Liter festgelegt. Von außen wird dem Spitzenlastkessel die Umgebungstemperatur von 25 °C vorgegeben.

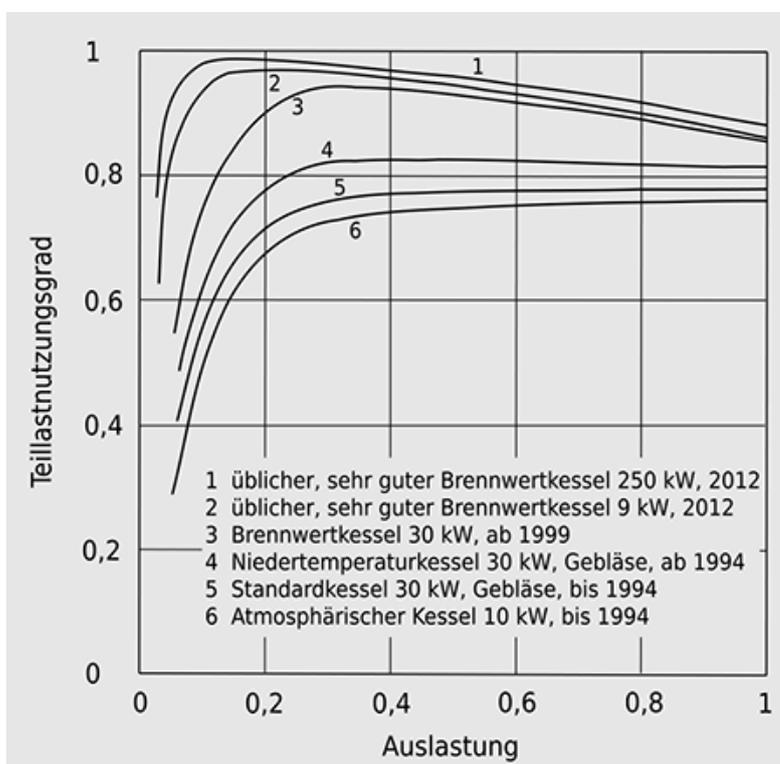


Abbildung 4.2: Teillastnutzungsgrade Heizkessel [22]

Abbildung 4.2 zeigt Teillastnutzungsgrade verschiedener Heizkesselarten. Diese werden nach DIN EN 15316-4-1:2008 berechnet. Der Teillastnutzungsgrad bezieht sich auf den Betrieb an einem Tag. Die überwiegenden Einflüsse auf den Teillastnutzungsgrad sind: [22]

- „die Auslastung (Verhältnis der mittleren, ans Heizwasser abgegebenen Leistung zur Kesselennleistung)“
- „die Kesselwirkungsgrade für Volllast und ggf. für Minimallast bei Brennerbetrieb“
- „die Bereitschaftsverlustleistung bei Brennerstillstand“

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

Obwohl hier Nutzungsgrade angegeben sind, werden die Werte für das Modell als Wirkungsgrade übernommen, da der Zeitraum von einem Tag recht kurz ist. Der Verlauf des Wirkungsgrades, bei angegebener Teillast wird nach Kurve 2 in Abbildung 4.2 modelliert, da die Leistung des Spitzenlastkessels bei ähnlicher Größenordnung liegen wird. Die Wirkungsgrade werden bei der Variation nicht angepasst, da der Einfluss sehr gering wäre. Zu beachten ist, dass sich der Teillastnutzungsgrad hier auf den Brennwert bezieht.

### Wärmespeicher

Das Volumen des Speichers, sowie der Massenstrom der Pumpe, die den Speicher mit dem Heizkreisverteiler verbindet, werden später betrachtet und festgelegt. Der Durchmesser des Speichers wird durch eine Funktion, abhängig vom Volumen angegeben. Dabei wird von einem Verhältnis von Höhe  $h$  zu Durchmesser  $d$  von 3 ausgegangen.

$$h = d \cdot 3 \quad (4.1)$$

Die Formel für das Volumen des Speichers ist folgende:

$$V = \frac{d^2}{4} \cdot \pi \cdot h \quad (4.2)$$

Setzt man die Höhe aus Formel 4.1 in Formel 4.2 ein und löst die Gleichung nach dem Durchmesser auf ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$d = \sqrt[3]{\frac{V \cdot 4}{\pi \cdot 3}} \quad (4.3)$$

Bei der Wärmedämmung werden Werte von Modellen am Markt verwendet. Der Pufferspeicher TBL der Firma TWL-Technologies nutzt als Wärmedämmung 80 mm expandiertes Polystyrol und 20 mm Polyesterfaservlies. Mit einem Lambda-Wert von 0,039 W/mK ergibt das einen Wärmedurchgangskoeffizient von 0,39 W/m<sup>2</sup>K für Mantel, Boden und Deckel des Speichers. Für den Wärmeübertrager des Solarkreises im Speicher hat sich ein Wert von 1.100 W/K, nach mehrmaligem testen mit anderen Werten, als geeignet herausgestellt. Der Wärmespeicher wird mit 10 Rechenknoten simuliert.

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

### Solaranlage

Die Fläche der Solarkollektoren und der Massenstrom der Pumpe werden später betrachtet und festgelegt. Als Datengrundlage für das Simulationsmodell dient der Flachkollektor SKR500 der Firma Sonnenkraft. Die Daten werden dem Datenblatt, sowie dem Datenbankeintrag von Solar Keymark entnommen. Solar Keymark ist ein Qualitätslabel für solarthermische Produkte, das auf europäischen Normen basiert. Der optische Wirkungsgrad des Solarkollektors beträgt 82 %. Der lineare Wärmeverlustkoeffizient beträgt  $3,821 \text{ W/m}^2\text{K}$ , der quadratische Wärmeverlustkoeffizient beträgt  $0,011 \text{ W/m}^2\text{K}^2$ . Die effektive Wärmekapazität des Solarkollektors beträgt  $4.500 \text{ J/m}^2\text{K}$ .

Die Position des Solarkollektors wird dem Modell von außen vorgegeben. Hier wird ein Aufstellwinkel von  $30^\circ$ , der auch gleichzeitig die Dachschräge darstellt, angenommen. Die Ausrichtung des Kollektors ist exakt nach Süden und es ist keine Rotation vorhanden.

### BHKW

Die Wärmeleistung, die elektrische Leistung und der thermische Wirkungsgrad werden wie der Massenstrom der Pumpe später betrachtet und festgelegt.

Das Teillastverhalten des BHKW-Modells wird anhand von am Markt verfügbaren BHKWs modelliert. Dazu werden die Daten von 3 unterschiedlichen BHKWs, die ungefähr in der zu erwartenden Leistungsgröße liegen ausgewertet, gemittelt und in das BHKW-Modell übernommen. Tabelle 4.2 zeigt die ausgewerteten BHKWs.

**Tabelle 4.2: Ausgewertete BHKWs Teillastverhalten**

Modell	Elektrische Leistung	Wärmeleistung	Brennstoffleistung
Vaillant EcoPower 3.0	3 kW	8 kW	12 kW
Viessman Vitobloc 200 EM-6/15	6 kW	14,9 kW	22,2 kW
Viessman Vitobloc 200 EM-9/20	8,5 kW	18 kW	28,6 kW

Für die 3 BHKWs sind Daten zu den Wirkungsgraden oder Leistungen bei Teillast vorhanden. Für jedes BHKW werden die 3 Wirkungsgrade für Nenn- und Teillast berechnet. Anschließend werden die Wirkungsgrade bei Teillast auf den Wirkungsgrad bei Nennlast bezogen. Tabelle 4.3 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für das BHKW Vitobloc 200 EM-6/15.

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

**Tabelle 4.3: Teillastwirkungsgrade Vitobloc 200 EM-6/15**

	50 % Last	75 % Last	100 % Last
Thermischer Wirkungsgrad	65,5 %	65,6 %	67,0 %
Normierter th. Wirkungsgrad	0,978	0,979	1
Elektrischer Wirkungsgrad	20,3 %	23,8 %	27,0 %
Normierter el. Wirkungsgrad	0,913	0,951	1
Gesamtwirkungsgrad	85,8 %	89,4 %	94,0 %
Normierter ges. Wirkungsgrad	0,913	0,951	1

Im Gegensatz zum Vitobloc 200 EM-6/15 steigt bei den anderen beiden BHKWs der thermische Wirkungsgrad bei Teillast etwas an. Aus den normierten Werten der 3 BHKWs wird der Durchschnitt gebildet. Die endgültigen Werte sind in Tabelle 4.4 abgebildet.

**Tabelle 4.4: Normierte Wirkungsgrade BHKW Durchschnitt**

	50 % Last	75 % Last	100 % Last
Normierter th. Wirkungsgrad	1,0018	1,0007	1
Normierter el. Wirkungsgrad	0,8183	0,9234	1
Normierter ges. Wirkungsgrad	0,9492	0,9786	1

Die endgültigen Werte für den normierten thermischen und normierten elektrischen Wirkungsgrad werden in das BHKW-Modell übernommen.

### Stromverbrauch

Das BDEW Stromlastprofil ist auf 1000 kWh pro Jahr genormt. Das Profil muss, daher noch mit einem Faktor dem eigentlichen Verbrauch im Mehrfamilienhaus angepasst werden. Ein 2-Personen-Haushalt in einem Mehrfamilienhaus braucht, mit Stand 2014, durchschnittlich 2.200 kWh elektrischen Strom pro Jahr. Warmwasser wird dabei nicht durch Strom erzeugt. Ein 3-Personen-Haushalt in einem Mehrfamilienhaus braucht durchschnittlich 3.000 kWh elektrischen Strom pro Jahr [23]. Der Verbrauch steigt durch Grundlastverbraucher die unabhängig von der Personenanzahl Strom benötigen nicht linear an. Wie oben erwähnt wohnen in einem Haushalt in Bayern durchschnittlich ca. 2,1 Personen. Der Verbrauch für das Modell wird daher linear zwischen 2- und 3-Personen-Haushalten interpoliert, was einen Stromverbrauch pro Jahr und Wohneinheit von 2.280 kWh ergibt. Diese Zahl wird schließlich noch mit 12 Haushalten multipliziert.

### 4.1.3 Jahreslastgang und Jahresdauerlinie

Um die maximal benötigte Heizleistung herauszufinden wird vorerst nur der Spitzenlastkessel als Wärmeerzeuger genutzt. Die Pumpe des Spitzenlastkessels wird dabei so eingestellt, dass nach folgender Formel, bei Nennleistung, eine Temperaturdifferenz von 10 K entsteht.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{(\vartheta_2 - \vartheta_1) \cdot c_{p,Wasser}} \quad (4.4)$$

Der Wert der spezifischen Wärmekapazität wird für die Auslegung mit  $c_{p,Wasser} = 4.180 \frac{J}{kg \cdot K}$  angenommen. Am Anfang wird die Leistung des Spitzenlastkessels sehr hoch, z.B. 50 kW, gewählt und das Gesamtmodell für ein Jahr simuliert. Dabei wird darauf geachtet, ob die Wärmeleistung ausreicht um die Temperatur des Warmwassers und die Gebäudetemperatur immer über den geforderten Werten zu halten. Dann wird nach und nach die Leistung des Spitzenlastkessels gesenkt, bis die die geforderten Werte nicht mehr eingehalten werden können. Die niedrigste Leistung bei der die Werte noch gehalten werden können ergibt die maximale Heizleistung. Für das ausgewählte Mehrfamilienhaus liegt der Wert bei 30 kW.

Der Jahreslastgang für die gesamte Wärmelast wird aus Addieren der Heizleistung für Gebäudeheizung und Heizleistung für Warmwasser gebildet. Abbildung 4.3 zeigt den Jahreslastgang des Mehrfamilienhauses.

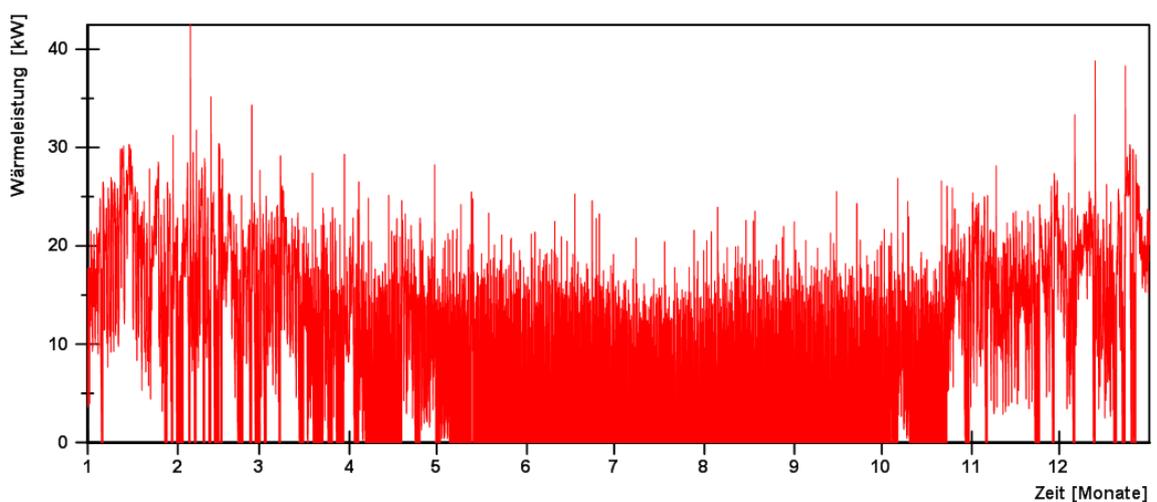
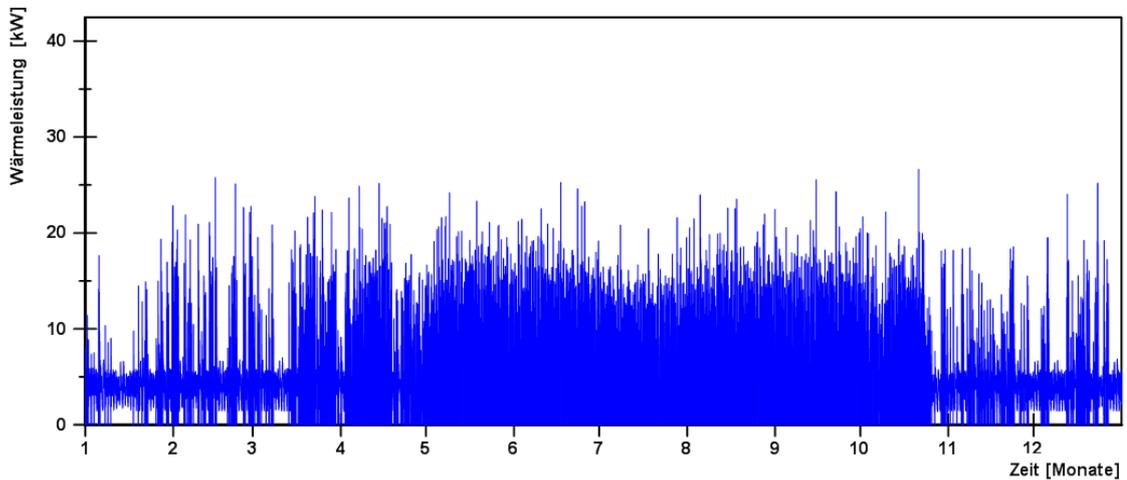


Abbildung 4.3: Jahreslastgang Mehrfamilienhaus

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

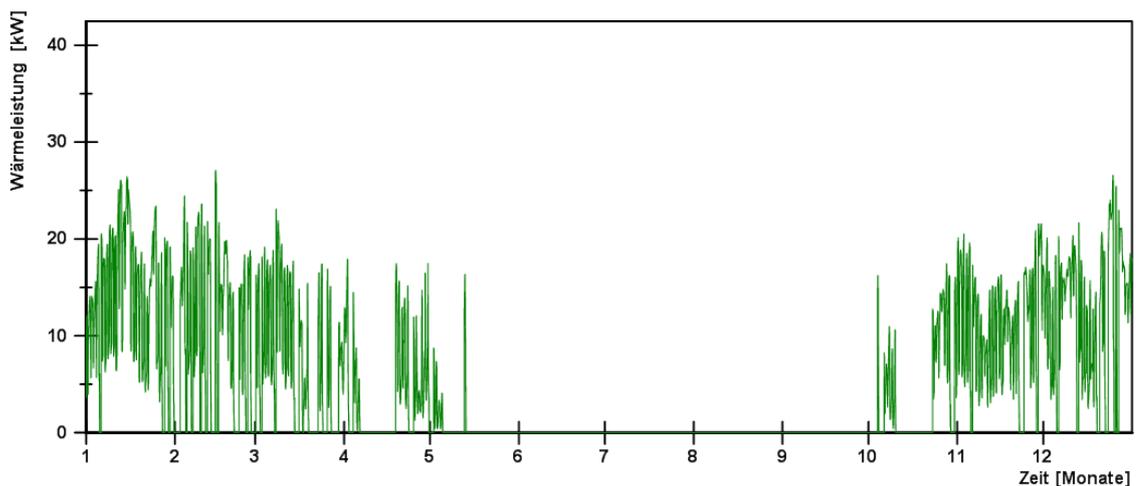
---

Die Wärmelast im Sommer wird durch die Warmwasserbereitung verursacht, die sehr oft an- und ausschaltet, was wie in Abbildung 4.4 zu sehen, den Eindruck einer hohen Wärmelast erzeugt. Die durchschnittliche Wärmeleistung für die Warmwasserbereitung beträgt ca. 3,54 kW. Die benötigte Wärmeenergie für das gesamte Jahr beträgt 30.993 kWh.



**Abbildung 4.4: Jahreslastgang Warmwasserbereitung**

Wie in Abbildung 4.5 zu sehen muss für die Gebäudeheizung von Mitte Mai bis Anfang Oktober keine Wärme bereit gestellt werden, was einen typischen Jahresverlauf darstellt. Die höchste Leistung für die Gebäudeheizung wird am 15.02. mit ca. 27 kW benötigt. Die durchschnittliche Wärmeleistung beträgt ca. 4,90 kW. Die benötigte Wärmeenergie für das gesamte Jahr beträgt 42.898 kWh.



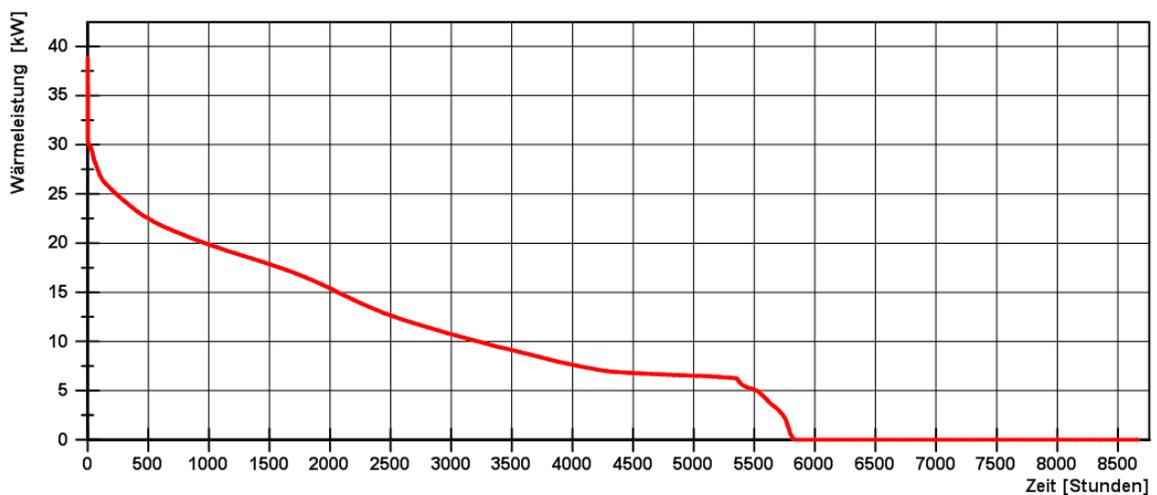
**Abbildung 4.5: Jahreslastgang Gebäudeheizung**

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

Insgesamt ergibt sich für das Mehrfamilienhaus ein Wärmebedarf von 73.891 kWh. Um den Energiestandard eines Hauses zu bestimmen, wird der Jahresheizwärmebedarf durch die Wohnfläche geteilt. In diesem Fall ergibt das einen Wert von  $\frac{42.898 \text{ kWh}}{759 \text{ m}^2} = 56,5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ . Dieser Wert ist für ein Gebäude aus dem Zeitraum 1995-2001 sehr niedrig und gilt nach heutigen Maßstäben als Niedrigenergiehaus. Das Mehrfamilienhaus hat einen Jahresstromverbrauch von 27.316 kWh. Rechnet man Strom und Wärmebedarf zusammen und lässt außer Acht, dass elektrischer Strom höherwertig als Wärme ist, so ergibt sich ein Gesamtenergieverbrauch von 101.207 kWh. Davon wird 42,4 % für die Gebäudeheizung, 30,6 % für Warmwasserbereitung und 27,0 % für elektrischen Strom verbraucht.

Durch sortieren der Werte aus dem Jahreslastgang nach Wärmeleistung erhält man die Jahresdauerlinie. In Abbildung 4.6 sieht man die Jahresdauerlinie für Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung zusammengenommen.



**Abbildung 4.6: Jahresdauerlinie Mehrfamilienhaus**

Die Jahresdauerlinie ist in den meisten Fällen eine Grundlage zur Auslegung und Dimensionierung des BHKWs. Was hier auffällt, dass trotz gleichmäßigem Warmwasserverbrauch, an fast 3.000 Stunden im Jahr keine Wärme verbraucht wird. Dies ist auf die Regelung der Warmwasserbereitung zurückzuführen, die den Speicher mit hoher Leistung aufheizt und anschließend wieder eine Zeit lang ausgeschaltet ist.

### 4.1.4 Variation Wärmeerzeuger und Wärmespeicher

Die Variation der einzelnen Wärmeerzeuger und des Wärmespeichers stellt die Basis für die energetische und ökonomische Betrachtung dar. In dieser Variation werden die Größe der Solarkollektorfläche, die Leistung des BHKWs und die Größe des Wärmespeichers variiert. Prinzipiell wäre es möglich auch noch mehr Komponenten der Anlage zu variieren, der Simulier- und Rechenaufwand steigt dabei aber exponentiell an. Hier werden 3 Komponenten je 3 Mal verändert. Um alle Varianten zu erhalten sind dafür  $3^3=27$  Jahressimulationen notwendig. Bei 4 Komponenten wären es schon  $3^4=81$  Jahressimulationen.

Insgesamt muss eine Wärmeleistung von 30 kW bereitgestellt werden. Diese wird durch das BHKW und den Spitzenlastkessel abgedeckt. Hat das BHKW eine Wärmeleistung von 3 kW, muss der Spitzenlastkessel nur noch eine Wärmeleistung von 27 kW erbringen. Die Größe der Solaranlage verändert die Größe der beiden anderen Wärmeerzeuger nicht. Wenn keine Sonne scheint und gerade 30 kW Wärme gebraucht werden, müssen das BHKW und der Spitzenlastkessel trotzdem noch die volle Leistung bereitstellen können.

#### Variation BHKW

BHKWs in Mehrfamilienhäusern werden auf ca. 15 bis 30 % des maximalen Wärmebedarfs ausgelegt [8]. Für diese Variation wird das BHKW auf 10 %, 25 % und 40% des maximalen Wärmebedarfs ausgelegt, was  $3 \text{ kW}_{\text{th}}$ ,  $7,5 \text{ kW}_{\text{th}}$  und  $12 \text{ kW}_{\text{th}}$  entspricht. Die Leistung des Spitzenlastkessels ist dabei  $27 \text{ kW}_{\text{th}}$ ,  $22,5 \text{ kW}_{\text{th}}$  und  $18 \text{ kW}_{\text{th}}$ . Die Pumpe des BHKWs wird nach Formel 4.4 auf eine Temperaturdifferenz von 5 K ausgelegt. Das ergibt bei einem  $c_{p,Wasser} = 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$  für die Pumpe, die zu den Leistungen passenden, Massenströme von 0,144 kg/s, 0,359 kg/s und 0,574 kg/s. Die Pumpe des Spitzenlastkessels wird wie oben beschrieben auf eine Temperaturdifferenz von 10 K bei Nennleistung eingestellt, was einen Massenstrom für die jeweilige Leistung von 0,646 kg/s, 0,538 kg/s und 0,431 kg/s ergibt. Der thermische Wirkungsgrad bei Nennleistung und die elektrische Leistung des jeweiligen BHKWs werden von realen, am Markt verfügbaren, BHKWs in der gleichen oder ähnlichen Leistungsgröße übernommen. Die Werte der realen Leistungen werden im Modell an die vorgegebene thermische Leistung angepasst. Die elektrische Leistung im Modell wird mit der Stromkennzahl und der thermischen Leistung im Modell berechnet. Tabelle 4.5 zeigt die Daten der 3 verwendeten BHKWs.

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

Tabelle 4.5: Werte Variation BHKW

	Vaillant EcoPower 1.0	Intelli Heimkraftwerk	Senertec Dachs HKA G 5.5
Reale el. Leistung	1,0 kW	2,6 kW	5,5 kW
Reale th. Leistung	2,5 kW	6,5 kW	12,5 kW
El. Leistung Modell	1,2 kW	3,0 kW	5,3 kW
Th. Leistung Modell	3,0 kW	7,5 kW	12,0 kW
Stromkennzahl	0,40	0,40	0,44
El. Wirkungsgrad	26,3 %	26,6%	27,0%
Th. Wirkungsgrad	65,7 %	63,4%	61,0%
Ges. Wirkungsgrad	92,0 %	90,0 %	88%

### Variation Solaranlage

Der verwendete Solarkollektor Sonnenkraft SKR500 hat eine Bruttofläche von 2,58 m<sup>2</sup>. Die Aperturfläche beträgt 2,26 m<sup>2</sup>. Die Fläche der Obergeschossdecke beträgt 283,7 m<sup>2</sup>. Angenommen werden ein quadratisches Haus und eine Dachneigung von 30°. Der Dachfirst wird wie üblich genau in der Mitte des Daches angenommen. Abbildung 4.7 zeigt eine Skizze des Hausdachs.

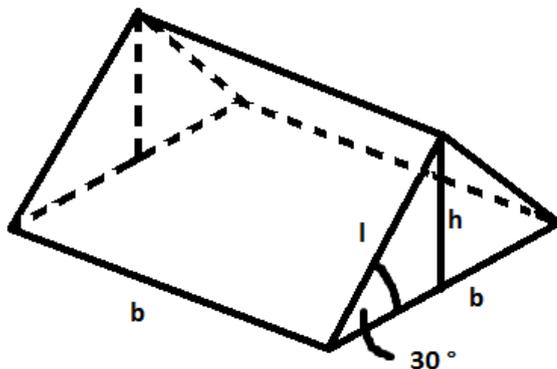


Abbildung 4.7: Skizze Hausdach

Die Seitenlänge  $b$  beträgt bei quadratischem Haus 16,8 m. Die Länge der Dachschräge  $l$  wird mit der halben Seitenlänge  $b$  und dem Cosinus von 30° berechnet und beträgt 9,7 m. Die nach Süden gerichtete Dachfläche ist somit ca. 163 m<sup>2</sup> groß. Bei der Gesamtfläche eines Solarkollektors von 2,58 m<sup>2</sup> hätten so theoretisch 63 Module Platz. Für Trinkwassererwärmung wird bei der Auslegung mit 1,25 bis 1,5 m<sup>2</sup> Kollektorfläche pro Person gerechnet. Für Heizungsunterstützung wird mit etwa dem doppelten von 2,5 bis 3,0

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

m<sup>2</sup> Kollektorfläche pro Person gerechnet [7]. Bei 25 Personen wäre das Minimum für Trinkwassererwärmung bei 31,25 m<sup>2</sup> und das Maximum für Heizungsunterstützung bei 75 m<sup>2</sup> Solarkollektorfläche. Die Rechnungen gelten nur für Flachkollektoren. Für diese Variation der Solaranlage wird mit 4, 18 und 32 Kollektoren simuliert. Das entspricht Aperturflächen von 9,04 m<sup>2</sup>, 40,68 m<sup>2</sup> und 72,32 m<sup>2</sup>. Die kleine Fläche wird gewählt um mögliche positive Effekte auf die Gesamtanlage zu untersuchen. Für die Pumpe der Solaranlage hat sich durch mehrmaliges testen ein Massenstrom von ca. 0,059 kg/s pro Solarkollektor als gut herausgestellt. Die eingestellten Massenströme für die jeweilige Kollektoranzahl sind demnach 0,236 kg/s, 1,062 kg/s und 1,889 kg/s.

### Variation Wärmespeicher

Die Größe des Wärmespeichers richtet sich meist nach der Größe der Wärmeerzeuger. Ein einschränkender Faktor in Gebäuden ist oft das Platzangebot. So hat ein Wärmespeicher mit 3 m<sup>3</sup> Volumen bereits eine Höhe von ca. 3,25 m, unter der Annahme, dass die Speicherhöhe 3 Mal so groß ist wie der Durchmesser. Um diesem Problem zu entgehen kann man mehrere Speicher parallel schalten. Bei solarthermischen Anlagen geht man von 40 bis 70 l Speichervolumen pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche aus [7]. Das ergibt hier einen Minimalwert von 413 Litern bei 4 Kollektoren und einen Maximalwert von 5.779 Litern bei 32 Kollektoren. Die Auslegung des Wärmespeichers für BHKWs erfolgt in der Regel anhand des Jahreslastgangs und der Jahresdauerlinie. Bei einer Wärmeleistung des BHKWs von 12 kW ist ein Speicher mit 750 Litern Volumen ein angemessener Wert [7]. Da der Speicher erst bei einer Höhe von 60% beladen wird, ist das genutzte Volumen für das BHKW kleiner. Um dies auszugleichen, wäre ein Speicher mit 1875 Litern nötig. Für diese Variation des Wärmespeichers wird mit Volumina von 0,6 m<sup>3</sup>, 1,8 m<sup>3</sup> und 3 m<sup>3</sup> simuliert. Die Pumpe, die den Wärmespeicher mit dem Heizkreisverteiler verbindet wird nach der Größe des BHKWs bestimmt. Ist der Massenstrom der Pumpe in der Simulation zu gering, liefert der Wärmespeicher mehr Wärme an den Heizkreisverteiler als eigentlich durch BHKW und Solaranlage erzeugt werden. Die Ursache dafür ist nicht bekannt. Durch mehrere Tests hat sich das BHKW als hauptsächlicher Einflussfaktor für den benötigten Massenstrom herausgestellt. Bei einer BHKW-Größe von 3 kW hat sich ein Wert von 0,5 kg/s als gut herausgestellt. Dementsprechend sind die Werte 1,25 kg/s bei 7,5 kW und 2,0 kg/s bei 12 kW.

### 4.2 Energetische Optimierung der Anlage

Das Ziel der energetischen Optimierung ist die Verringerung des Primärenergieeinsatzes. Zusätzlich werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet. Für den Primärenergieverbrauch wird das gesamte Mehrfamilienhaus betrachtet, wobei keine Anteile für Wärme und Strom angegeben werden. Die Basis der Optimierung bilden die 27 Simulationsvarianten. Zum Vergleich kommt noch eine Variante hinzu, in der die Wärme nur vom Brennwert-Heizkessel bereitgestellt wird und der komplette Strom vom Netz bezogen wird. In Abbildung 4.8 sind die Energieflüsse im Mehrfamilienhaus an der Häusergrenze zu sehen, die Dicke der Pfeile ist hier nur beispielhaft.

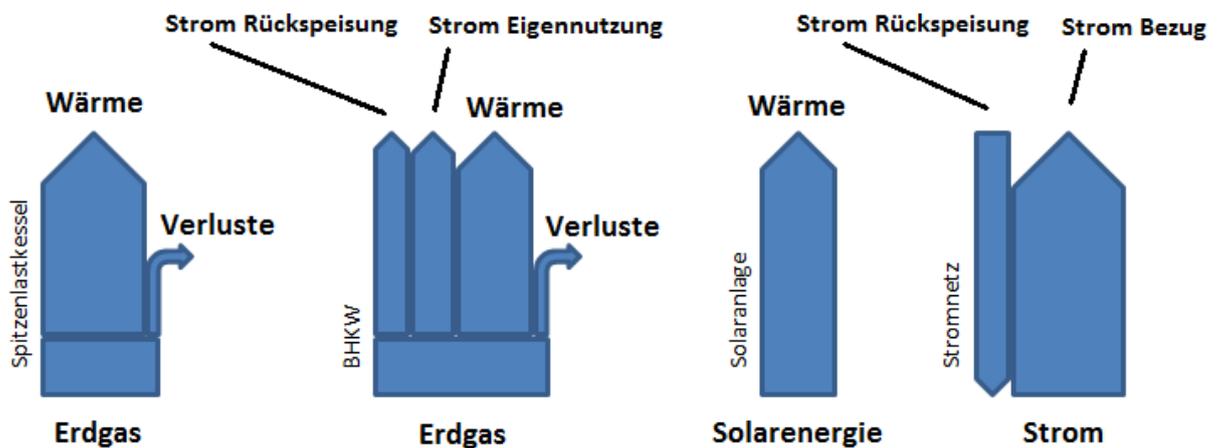


Abbildung 4.8: Energiefluss Mehrfamilienhaus

Für die Primärenergieberechnung werden Primärenergiefaktoren genutzt. Sie beziehen die eingesetzte Primärenergie auf die Endenergie. Die Endenergie ist die Energieform, die an der Gebäudegrenze ankommt und ist in Abbildung 4.8 jeweils unten zu sehen. Zwischen der Primärenergie und der Endenergie wird andere Energie eingesetzt, damit der Energieträger am Gebäude ankommt. Dieser Energieverlust wird durch den Primärenergiefaktor abgebildet. Die EnEv 2014 gibt Primärenergiefaktoren für verschiedene Energieträger an [24]. In Tabelle 4.6 sind die für diese Arbeit benötigten Primärenergiefaktoren abgebildet.

Tabelle 4.6: Primärenergiefaktoren nach EnEv 2014 [24]

Energieträger	Primärenergiefaktor nicht erneuerbarer Anteil
Erdgas H	1,1
Allgemeiner Strommix	2,0
Verdrängungsstrommix	2,8

Die Primärenergiefaktoren beziehen sich bei Brennstoffen auf den Heizwert. Der allgemeine Strommix bezieht sich auf Strom aus dem öffentlichen Stromnetz. Der Verdrängungsstrommix wird für den rückgespeisten Strom verwendet. Bei der Stromeinspeisung haben erneuerbare Energien und Strom aus KWK-Anlagen Vorrang und müssen immer eingespeist werden. Der dadurch nicht produzierte, verdrängte Strom stammt aus Prozessen die als Brennstoff z.B. Braunkohle, Steinkohle, Erdgas oder Erdöl nutzen. Der Primärenergiefaktor des Verdrängungsstrommixes ist daher schlechter, als der des Allgemeinen Strommixes. Zusätzlich zum Primärenergieverbrauch wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoß betrachtet. Dafür wird ein CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor genutzt, der in Gramm pro Kilowattstunde Endenergie angegeben ist. Die hier genutzten CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren stammen aus GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) vom Internationalen Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (IINAS). „GEMIS ist ein frei verfügbares Lebensweg- und Stoffstromanalyse-Modell mit integrierter Datenbank für Energie-, Stoff- und Verkehrssysteme“ [25]. Das Modell wird von vielen Instituten benutzt um CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren und Primärenergiefaktoren zu berechnen. Die in Tabelle 4.7 abgebildeten CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren stammen direkt von der IINAS-Homepage [26].

**Tabelle 4.7: CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren nach GEMIS [26]**

Energieträger	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor
Erdgas	228 g/kWh <sub>end</sub>
Allgemeiner Strommix	576 g/kWh <sub>end</sub>
Verdrängungsstrommix	576 g/kWh <sub>end</sub>

Für den Verdrängungsstrommix ist kein eigener Wert vorhanden. In einer Quelle des IfE (Institut für Energietechnik GmbH) werden CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für den Strommix und den Verdrängungsstrommix selbst mit GEMIS berechnet. Die beiden Werte liegen mit 566 g/kWh<sub>end</sub> und 572 g/kWh<sub>end</sub> sehr nah beieinander [27]. Daher wird für den Verdrängungsstrommix hier der gleiche Wert wie für den allgemeinen Strommix angenommen. Die Werte beziehen sich bei Brennstoffen auf den Heizwert.

Der eingespeiste Strom und der vom Netz bezogene Strom werden durch die Differenz des produzierten Stroms im BHKW vom verbrauchten Strom im Mehrfamilienhaus berechnet. Ein Beispiel für den Verlauf eines Tages ist in Abbildung 4.9 zu sehen.

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

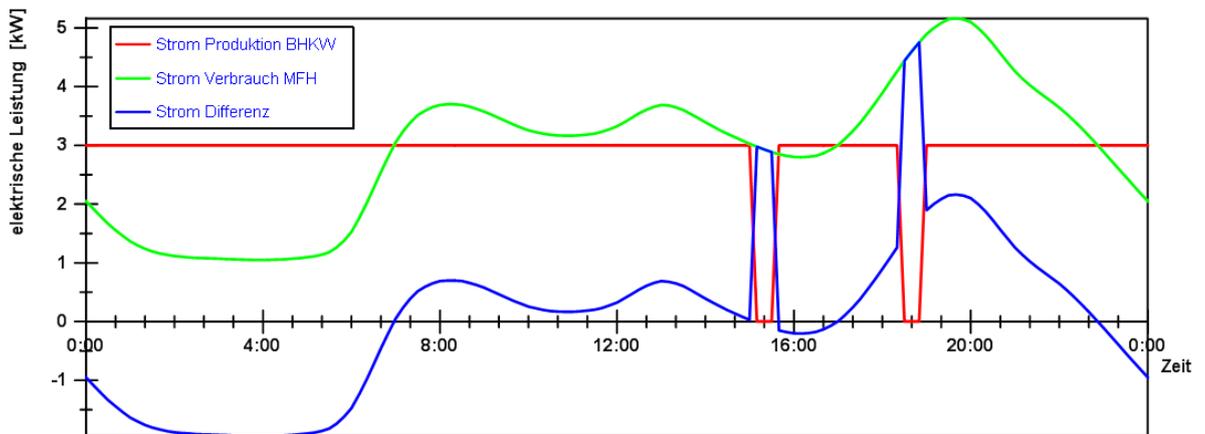


Abbildung 4.9: Beispielverlauf Stromproduktion und Stromverbrauch

Ist die Differenz aus Stromproduktion und Stromverbrauch negativ, wird Strom in das Netz eingespeist, ist sie positiv, muss zusätzlich Strom aus dem Netz bezogen werden. Durch Aufsummieren der negativen und positiven Leistungen erhält man die eingespeiste und bezogene Strommenge.

Mit den Daten für Stromeinspeisung, Strombezug und Brennstoffverbrauch für BHKW und SLK lassen sich der Primärenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emission für alle 27+1 Simulationsvarianten errechnen. In Tabelle 4.8 ist beispielhaft Durchlauf 15, mit einer thermischen Leistung des BHKWs von 7,5 kW, 18 Solarkollektoren und einem Speicher mit 3 m<sup>3</sup> Volumen, dargestellt.

Tabelle 4.8: Beispiel Primärenergieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen Variante 15

	Endenergieverbrauch	Primärenergiefaktor	Primärenergieverbrauch	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor	CO <sub>2</sub> -Emission
Brennstoff SLK	31.182 kWh	1,1	34.331 kWh	228 g/kWh <sub>end</sub>	7,11 t
Brennstoff BHKW	53.000 kWh	1,1	58.300 kWh	228 g/kWh <sub>end</sub>	12,08 t
Strom bezogen	16.123 kWh	2,0	32.247 kWh	576 g/kWh <sub>end</sub>	9,28 t
Strom eingespeist	-2.437 kWh	2,8	-6.823 kWh	576 g/kWh <sub>end</sub>	-1,40 t
Summe	97.869 kWh	-	118.025 kWh	-	27,07 t

#### 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

In Tabelle 4.9 werden die Primärenergieverbräuche und die CO<sub>2</sub>-Emissionen aller 27+1 Simulationsvarianten dargestellt und nach Primärenergieverbrauch aufsteigend geordnet.

**Tabelle 4.9: Primärenergieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emission alle Varianten**

Durchlauf	Primärenergieverbrauch	CO <sub>2</sub> -Emission
27. BHKW 12 kW, 32 Kollektoren, 3,0 m <sup>2</sup> Speicher	111.100 kWh	25,59 t
24. BHKW 12 kW, 18 Kollektoren, 3,0 m <sup>2</sup> Speicher	111.390 kWh	25,63 t
26. BHKW 12 kW, 32 Kollektoren, 1,8 m <sup>2</sup> Speicher	112.111 kWh	25,77 t
23. BHKW 12 kW, 18 Kollektoren, 1,8 m <sup>2</sup> Speicher	112.450 kWh	25,82 t
25. BHKW 12 kW, 32 Kollektoren, 0,6 m <sup>2</sup> Speicher	114.072 kWh	26,10 t
22. BHKW 12 kW, 18 Kollektoren, 0,6 m <sup>2</sup> Speicher	114.795 kWh	26,24 t
19. BHKW 12 kW, 4 Kollektoren, 0,6 m <sup>2</sup> Speicher	116.933 kWh	26,54 t
20. BHKW 12 kW, 4 Kollektoren, 1,8 m <sup>2</sup> Speicher	116.980 kWh	26,49 t
21. BHKW 12 kW, 4 Kollektoren, 3.0 m <sup>2</sup> Speicher	117.074 kWh	26,47 t
18. BHKW 7,5 kW, 32 Kollektoren, 3,0 m <sup>2</sup> Speicher	117.658 kWh	27,02 t
15. BHKW 7,5 kW, 18 Kollektoren, 3,0 m <sup>2</sup> Speicher	118.025 kWh	27,07 t
17. BHKW 7,5 kW, 32 Kollektoren, 1,8 m <sup>2</sup> Speicher	118.833 kWh	27,26 t
14. BHKW 7,5 kW, 18 Kollektoren, 1,8 m <sup>2</sup> Speicher	119.268 kWh	27,33 t
16. BHKW 7,5 kW, 32 Kollektoren, 0,6 m <sup>2</sup> Speicher	120.970 kWh	27,63 t
9. BHKW 3 kW, 32 Kollektoren, 3,0 m <sup>2</sup> Speicher	121.146 kWh	28,53 t
6. BHKW 3 kW, 18 Kollektoren, 3,0 m <sup>2</sup> Speicher	121.455 kWh	28,59 t
13. BHKW 7,5 kW, 18 Kollektoren, 0,6 m <sup>2</sup> Speicher	121.585 kWh	27,73 t
8. BHKW 3 kW, 32 Kollektoren, 1,8 m <sup>2</sup> Speicher	122.483 kWh	28,82 t
5. BHKW 3 kW, 18 Kollektoren, 1,8 m <sup>2</sup> Speicher	123.026 kWh	28,92 t
10. BHKW 7,5 kW, 4 Kollektoren, 0,6 m <sup>2</sup> Speicher	124.163 kWh	28,13 t
11. BHKW 7,5 kW, 4 Kollektoren, 1,8 m <sup>2</sup> Speicher	124.361 kWh	28,12 t
12. BHKW 7,5 kW, 4 Kollektoren, 3.0 m <sup>2</sup> Speicher	124.387 kWh	28,02 t
7. BHKW 3 kW, 32 Kollektoren, 0,6 m <sup>2</sup> Speicher	125.045 kWh	29,30 t
4. BHKW 3 kW, 18 Kollektoren, 0,6 m <sup>2</sup> Speicher	125.565 kWh	29,40 t
1. BHKW 3 kW, 4 Kollektoren, 0,6 m <sup>2</sup> Speicher	128.174 kWh	29,87 t
2. BHKW 3 kW, 4 Kollektoren, 1,8 m <sup>2</sup> Speicher	128.406 kWh	29,90 t
3. BHKW 3 kW, 4 Kollektoren, 3.0 m <sup>2</sup> Speicher	128.484 kWh	29,84 t
28. Nur SLK 30 kW	136.006 kWh	32,59 t

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

Im besten Fall (Durchlauf 27) spart man mit der kombinierten Wärme- und Stromversorgung 18,3 % Primärenergie und 21,5 % CO<sub>2</sub>-Emission gegenüber der Versorgung nur durch Heizkessel und Strombezug aus dem Netz (Durchlauf 28) ein.

### 4.3 Ökonomische Optimierung der Anlage

Das Ziel der ökonomischen Optimierung ist eine schnelle Amortisation der Anlage. Da das Gebäude aus dem Zeitraum 1995 bis 2001 stammt, wird davon ausgegangen, dass es sich um ein Bestandsgebäude handelt, dessen Heizungsanlage modernisiert wird. Dabei wird die Wirtschaftlichkeit der Wärmeversorgung aus der kombinierten Anlage mit der Wärmeversorgung durch einen neuen Brennwert-Gaskessel verglichen.

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung werden zunächst alle Investitionsposten und die Posten der laufenden Kosten aufgelistet. Folgende Investitionsposten werden berücksichtigt:

- BHKW-Modulkosten
- Installationskosten BHKW-Anlage
- Solaranlage mit Installationskosten (ohne Wärmespeicher)
- Brennwert-Kessel als Spitzenlastkessel mit Installationskosten
- Kosten für Wärmespeicher

Dazu werden jeweils einmalige Förderungen betrachtet, die die Investitionssumme verkleinern. Folgende Förderungen werden berücksichtigt:

- Förderung Mini-KWK-Anlage
- Förderung Solarkollektoranlage

Die laufenden Kosten stellen sich aus folgenden Posten zusammen:

- Instandhaltungskosten BHKW
- Wartungskosten Solaranlage
- Wartungskosten Spitzenlastkessel
- Brennstoffkosten BHKW
- Brennstoffkosten Spitzenlastkessel
- Strombezugskosten

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

Dazu werden laufende Förderungen und Einnahmen betrachtet, welche die laufenden Kosten verringern. Folgende Posten werden berücksichtigt:

- KWK-Förderung
- Erstattung Energiesteuer
- Vergütung eingespeister Strom
- Vermiedene Netznutzungsentgelte

### 4.3.1 Kosten und Einnahmen

Im Folgenden werden die Höhe und die Herkunft der einzelnen Posten erklärt.

#### BHKW-Modulkosten

Die Kosten eines BHKW-Moduls beinhalten, neben dem Modul, Kosten für Schalt- und Steuerschrank, Schmierölver- und entsorgung, Katalysator, Fernüberwachung, Abgasschalldämmkapsel und Be- und Entlüftung [28]. Die spezifischen Kosten dafür werden in BHKW-Kenndaten 2014/2015 von der ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.) durch Ausgleichsfunktionen in €/kW<sub>el</sub> angegeben [28]. Durch Multiplizieren mit der elektrischen Anlagenleistung ergeben sich die Kosten. Die Kosten für die hier genutzten BHKWs sind in Tabelle 4.10 dargestellt.

**Tabelle 4.10: BHKW-Modulkosten**

	Spezifische Modulkosten	Elektrische Leistung	Modulkosten
BHKW 1	9.000 €/kW <sub>el</sub>	1,2 kW <sub>el</sub>	9.000 €
BHKW 2	5.200 €/kW <sub>el</sub>	3 kW <sub>el</sub>	15.600 €
BHKW 3	3.800 €/kW <sub>el</sub>	5,3 kW <sub>el</sub>	20.140 €

#### Installationskosten BHKW-Anlage

Für die Installation der Anlage müssen weiter Kosten für Transport, Aufstellung und Montage, Inbetriebnahme, Probetrieb und Abnahme einkalkuliert werden. Außerdem müssen die Anbindung an die Brennstoffversorgung, die Abgasleitung und die Einbindung in das Storm- und Wärmenetz berücksichtigt werden [28]. Die ASUE teilt die Kosten in Transport bis Abnahme und Einbindung ein. Diese Kosten werden in Abhängigkeit der elektrischen Leistung des BHKW angegeben und sind für verschiedenen Leistungsklassen gestaffelt. Der hier relevante Ausschnitt aus den Kosten ist in Tabelle 4.11 dargestellt.

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

**Tabelle 4.11: Kosten für die Installation der Anlage [28]**

Elektrische Leistung in kW	Zusatzkosten BHKW (in Prozent)	
	Transport bis Abnahme	Eibindung
Unter 3	13	46
4 - 10	10	41

Die Zusatzkosten sind in Prozent des Modulpreises angegeben. Für BHKW 1 ergeben sich die Installationskosten folgendermaßen:

$$0,13 * 9.000\text{€} + 0,46 * 9.000\text{€} = 5.310\text{€}$$

Für BHKW 2 ergeben sich somit 9.204 € und für BHKW 3 ergeben sich 10.271 €.

### Solaranlage mit Installationskosten (ohne Wärmespeicher)

Die Kosten der Solaranlage mit Installationskosten, ohne Wärmespeicher, werden mit Erfahrungswerten aus anderen Solarprojekten in ähnlicher Größenordnung am Institut für erneuerbare Energie gewonnen. Dabei haben sich durchschnittliche Kosten von ca. 640 €/m<sup>2</sup> ergeben. Für 4 Flachkollektoren ergeben sich daraus Kosten von  $640 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} * 2,58 * 4 = 6605 \text{€}$ , für 18 Flachkollektoren ergeben sich Kosten von  $640 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} * 2,58 * 18 = 29.722 \text{€}$  und für 32 Flachkollektoren ergeben sich Kosten von  $640 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} * 2,58 * 32 = 52.838 \text{€}$ .

### Brennwert-Kessel als Spitzenlastkessel mit Installationskosten

Die Kosten für Brennwert-Kessel liegen im Bereich bis ca. 40 kW relativ eng beieinander. Durch Recherchen und auf Basis bestehender Kostenrechnungen haben sich Kosten von 6.000 bis 8.000 € für Gasbrennwertheizungen im Leistungsbereich von 10 bis 30 kW als realistisch herausgestellt [29]. Dabei sind die Installationskosten schon inklusive. In Tabelle 4.12 sind die Kosten der hier verwendeten Leistungsgrößen abgebildet.

**Tabelle 4.12: Kosten für Gasbrennwertheizungen**

Leistung Gasbrennwertheizung	30 kW <sub>th</sub>	27 kW <sub>th</sub>	22,5 kW <sub>th</sub>	18 kW <sub>th</sub>
Kosten mit Installation	8.000 €	7.700 €	7.250 €	6.800 €

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

### Kosten für Wärmespeicher

Auch die Kosten für den Wärmespeicher basieren auf Recherchen im Internet. Durch Preisvergleich von verschiedenen Modellen und Herstellern ergeben sich für die hier verwendeten Speichergrößen folgende Kosten:

- 600 Liter: 900 €
- 1800 Liter: 1600 €
- 3000 Liter: 2350 €

### Förderung Mini-KWK-Anlage

Die Förderung von Mini-KWK-Anlagen wird in der „Richtlinien zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kW<sub>el</sub> (Mini-KWK-Richtlinie)“ des BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle geregelt) geregelt [30]. Dabei gelten für verschiedene Leistungsstufen verschiedene Förderbeiträge, die kumuliert werden.

**Tabelle 4.13: Förderbeträge Mini-KWK-Anlagen**

Leistung Min. [kW <sub>el</sub> ].	Leistung Max. [kW <sub>el</sub> ]	Förderbetrag je kW <sub>el</sub> kumuliert über die Leistungsstufen
> 0	≤ 1	1.900 €
> 1	≤ 4	300 €
> 4	≤ 10	100 €

Der Förderbetrag wird anteilig der jeweiligen Leistungsgröße kumuliert. So wird BHKW 1 mit einer Leistung von 1,2 kW<sub>el</sub> mit  $1 * 1.900€ + 0,2 * 300€ = 1.960€$  gefördert. Dementsprechend wird BHKW 2 mit 2.500€ und BHKW 3 mit 2.930€ gefördert.

### Förderung Solarkollektoranlagen

Die Förderung von Solarkollektoranlagen des BAFA ist in verschiedene Förderarten eingeteilt. Es gibt die Basis-, Innovations- und Zusatzförderung [31]. Bis 14 m<sup>2</sup> Bruttokollektorfläche wird für neue Solaranlagen in Bestandsgebäuden eine Förderungspauschale von 2.000 € gezahlt. Für die Errichtung einer Solarkollektoranlage auf einem Bestandsgebäude mit mindestens 3 Wohneinheiten wird bei einer Bruttokollektorfläche zwischen 20 und 100 m<sup>2</sup> ein Förderbetrag von 200 €/m<sup>2</sup> bezahlt. Damit werden die 3 Solarkollektorgrößen in dieser Arbeit folgendermaßen gefördert:

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

- 4 Kollektoren (10,32 m<sup>2</sup>): 2.000 €
- 18 Kollektoren (46,44 m<sup>2</sup>): 9.288 €
- 32 Kollektoren (82,56 m<sup>2</sup>): 16.512 €

### Instandhaltungskosten BHKW

BHKWs benötigen regelmäßige Instandhaltungsmaßnahmen um die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit zu gewährleisten. In der Regel werden dazu Serviceverträge mit dem Hersteller oder Fachfirmen abgeschlossen. Der Motor muss außerdem nach einer gewissen Laufzeit einer Generalüberholung unterzogen werden, um die Funktionsweise des BHKW aufrecht zu erhalten. Die ASUE hat hierzu die Daten der Kosten für die Instandhaltung von verschiedenen Herstellern abgefragt [28]. Die Generalüberholung ist hierin schon enthalten. Die Kosten werden je nach elektrischer Leistung des BHKW in Cent/kWh<sub>el</sub> angegeben. Folgende Kosten ergeben sich für die verwendeten BHKWs:

- BHKW 1 (1,2 kW<sub>el</sub>): 0,0035 €/kWh<sub>el</sub>
- BHKW 2 (3 kW<sub>el</sub>): 0,0039 €/kWh<sub>el</sub>
- BHKW 3 (5,3 kW<sub>el</sub>): 0,0045 €/kWh<sub>el</sub>

### Wartungskosten Solaranlage

Die Wartungskosten einer Solaranlage werden mit dem Pauschalwert von 100 €/Jahr angenommen [32].

### Wartungskosten Spitzenlastkessel

Für die Wartungskosten des Spitzenlastkessels wird der Pauschalwert 200 €/Jahr angenommen, der sich aus durchschnittlichen Preisen für jährliche Wartungskosten und Kosten für Schornsteinfeger zusammensetzt [33].

### Brennstoffkosten BHKW und Spitzenlastkessel

Für die Brennstoffkosten werden die durchschnittlichen Kosten von Erdgas für 2015 angenommen [34]. Zusätzlich wird ein Teuerungsfaktor aus dem Durchschnitt der letzten Jahre berechnet um die Preissteigerung in Zukunft abzubilden. In Abbildung 4.10 sind die durchschnittlichen Gaspreise der letzten Jahre und eine Trendlinie zu sehen.

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

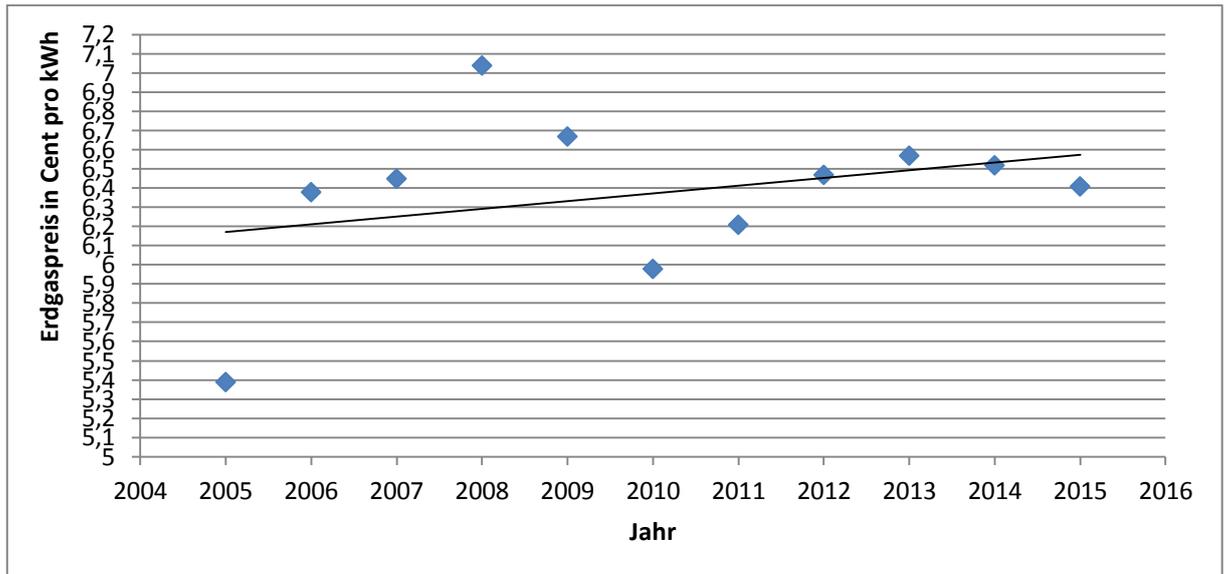


Abbildung 4.10: Durchschnittlicher Erdgaspreis Deutschland 2005 bis 2015 [34]

Der aktuelle Erdgaspreis wird mit 0,065 €/kWh angenommen. Dieser bezieht sich auf den Brennwert. In 5 Jahren ist der Gaspreis ungefähr 0,2 Cent angestiegen. Damit steigt er pro Jahr um ungefähr 0,04 Cent. Das ergibt einen aktuellen Teuerungsfaktor von ca. 1,006.

### Strombezugskosten

Für die Stromkosten wird der durchschnittliche Strompreis in Deutschland für 2015 verwendet. Zusätzlich wird ein Teuerungsfaktor aus dem Durchschnitt der letzten Jahre berechnet um die Preissteigerung in Zukunft abzubilden. In Abbildung 4.11 ist der durchschnittliche Strompreis der letzten Jahre und eine Trendlinie zu sehen.

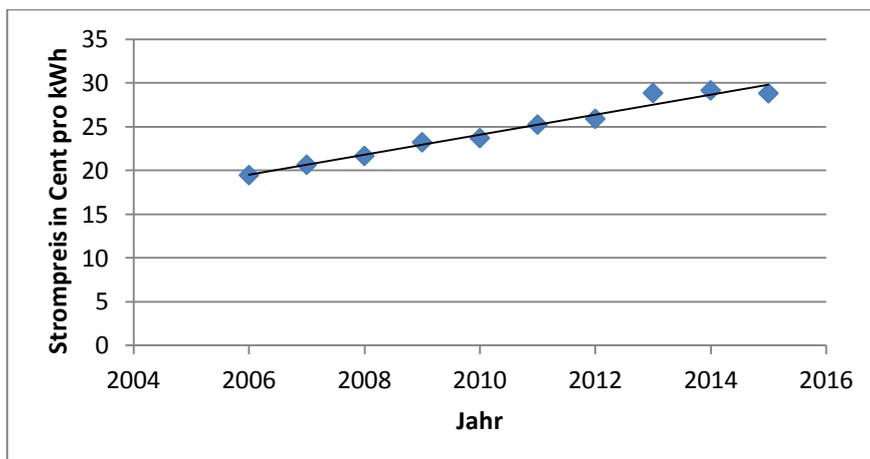


Abbildung 4.11: Durchschnittlicher Strompreis Deutschland 2006 bis 2015 [35]

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

Der aktuelle Strompreis wird mit 0,29 €/kWh angenommen. In 4 Jahren ist der Strompreis ungefähr 5 Cent angestiegen. Damit steigt er pro Jahr um ungefähr 1,25 Cent. Das ergibt einen aktuellen Teuerungsfaktor von ca. 1,05.

### KWK-Förderung

Nach dem KWKG werden KWK-Anlagen mit Leistungen bis zu 50 kW<sub>el</sub> durch 5,41 Cent pro kWh Strom (0,0541 €/kWh<sub>el</sub>) gefördert. Dabei ist egal, ob der Strom selbst verbraucht oder eingespeist wird. Die Förderung wird für die ersten 10 Jahre bezahlt [36].

### Erstattung Energiesteuer

Nach dem Energiesteuergesetz (EnStG) kann bei Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen die Energiesteuer zurückerstattet werden [37]. Die Erstattung beträgt bei Erdgas 0,55 Cent pro kWh Brennstoff (0,0055 €/kWh<sub>Br</sub>). Die Angabe bezieht sich dabei auf den Brennwert. Die Anlage muss dabei nachweislich einen Jahresnutzungsgrad über 70 % aufweisen (siehe Kapitel 5.1).

### Vergütung eingespeister Strom

Wird gerade mehr Strom produziert als im Gebäude genutzt werden kann, wird dieser ins öffentliche Stromnetz eingespeist. Diesen Strom muss der Netzbetreiber zum durchschnittlichen Preis von Grundlaststrom an der Strombörse EEX in Leipzig im jeweils vorangegangenen Quartal vergüten [37]. Im 2. Quartal 2015 lag der Preis bei 2,835 Cent pro kWh, im 3. Quartal 2015 bei 3,284 Cent pro kWh [38]. Hier wird ein Preis von 0,03 €/kWh eingespeistem Strom angenommen.

### Vermiedene Netznutzungsentgelte

Da der dezentral eingespeiste Strom die Netze und Umspannwerke entlastet, wird an den Betreiber der KWK-Anlage eine Vergütung gezahlt. Diese ist nicht fest vorgeschrieben und reicht von 0,05 Cent pro kWh bis zu 2 Cent pro kWh [37]. Für diese Arbeit wird der Durchschnitt von 0,01 €/kWh eingespeistem Strom angenommen.

### 4.3.2 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird in diesem Fall die Annuitätenmethode verwendet. Dabei werden Investitionskosten für einen bestimmten Nutzungszeitraum in gleichbleibende Zahlungen umgewandelt (Annuitäten). Die Annuität wird nach folgender Formel berechnet:

$$A = K \cdot a \quad (4.5)$$

Dabei ist A die Annuität, K sind die Investitionskosten und a ist der Annuitätsfaktor. Dieser berechnet sich nach folgender Formel:

$$a = \frac{q - 1 \cdot}{1 - q^{-T}} \quad (4.6)$$

Dabei ist T die Nutzungsdauer und q der Zinsfaktor der sich aus dem Zinssatz i mit folgender Formel berechnet.

$$q = 1 + i \quad (4.7)$$

Gibt es bei den laufenden Kosten während des Betrachtungszeitraums Preissteigerungen werden diese Kosten mit dem Annuitätsfaktor a und dem preisdynamischen Barwertfaktor b multipliziert. Der preisdynamische Barwertfaktor berechnet sich wie folgt:

$$b = \frac{1 - \left(\frac{r}{q}\right)^T}{q - r} \quad (4.8)$$

Dabei ist r der Preisänderungsfaktor. Die Annuitäten der Investitionen werden mit den laufenden Kosten verrechnet, was am Ende einen jährlichen Überschuss oder einen Verlust ergibt. In diesem Fall wird die Wirtschaftlichkeit der kombinierten Wärmeversorgung mit der Wirtschaftlichkeit der Wärmeversorgung durch einen Brennwertkessel verglichen.

Im Folgenden wird für alle Investitionen mit einer Nutzungsdauer von 15 Jahren und einem Zinssatz von 3 % gerechnet [8]. Das ergibt einen Annuitätsfaktor a von 0,08378. In der Rechnung wird ein noch genauer Wert benutzt. Zuerst werden die jährlichen Kosten der Variante nur mit Brennwertkessel berechnet. In Tabelle 4.14 sieht man die Wirtschaftlichkeitsberechnung für diesen Fall.

## 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

---

**Tabelle 4.14: Wirtschaftlichkeitsrechnung nur Brennwert-Kessel**

Annuitätsfaktor	0,08378
Investitionen	
Spitzenlastkessel	8.000 €
Investitionen Gesamt	8.000 €
Annuität Investitionen	670 €
Laufende Kosten	
Brennstoff SLK	82.112 kWh
Kosten pro kWh Erdgas	0,065 €/kWh
Teuerungsfaktor Erdgas	12,412
Brennstoffkosten SLK	5549 €
Strom bezogen	27.316 kWh
Kosten pro kWh Strom	0,29 €/kWh
Teuerungsfaktor Strom	16,719
Stromkosten	11.094 €
Laufende Kosten Gesamt	16.443 €
Jährliche Kosten Gesamt	17.114 €

Die jährlichen Kosten für die Variante nur mit Spitzenlastkessel betragen 17.114 €. Damit sich die kombinierte Versorgung irgendwann amortisieren kann, müssen die jährlichen Kosten geringer sein. In Tabelle 4.15 wird beispielhaft anhand von Durchlauf 15 die Wirtschaftlichkeitsrechnung für eine Variante der kombinierten Versorgung gezeigt. Negative Zahlen stellen dabei Gewinne dar. Die KWK-Förderung wird hier vereinfacht gerechnet und mit  $\frac{2}{3}$  multipliziert, da die Förderung nur für 10 Jahre gezahlt wird und der Betrachtungszeitraum bei 15 Jahren liegt

**Tabelle 4.15: Beispiel Wirtschaftlichkeitsrechnung Variante 15**

Annuitätsfaktor	0,08378
Investitionen	
Kosten BHKW	15.600 €
Installationskosten BHKW	9.204 €
Förderung BHKW	-2.500 €

#### 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

Kosten Solaranlage	29.722 €
Förderung Solaranlage	-9.288 €
Kosten Wärmespeicher	2.350 €
Spitzenlastkessel	7.250 €
Investitionen Gesamt	52.338 €
Annuität Investitionen	<b>4.384 €</b>
Laufende Kosten	
Brennstoff SLK	34.612 kWh
Brennstoff BHKW	58.830 kWh
Kosten pro kWh Erdgas	0,065 €/kWh
Teuerungsfaktor Erdgas	12,412
Brennstoffkosten SLK	2.339 €
Brennstoffkosten BHKW	3.976 €
Erstattung Energiesteuer pro Brennstoff BHKW	-0,0055 €/kWh
Erstattung Energiesteuer	-324 €
Elektrische Energie BHKW	13.632 kWh
Instandhaltungskosten BHKW pro elektrische Energie BHKW	0,0039 €/kWh
Instandhaltungskosten BHKW	53 €
KWK-Förderung pro elektrische Energie BHKW	-0,0541*2/3 €/kWh
KWK-Förderung	-491 €
Eingespeiste elektrische Energie	2.437 kWh
Stromvergütung pro eingespeiste elektrische Energie	-0,03 €/kWh
Stromvergütung	-73 €
Vermiedene Netznutzungsentgelte pro eingespeiste elektrische Energie	-0,01 €/kWh
Vermiedene Netznutzungsentgelte	-24
Strom bezogen	16.123 kWh
Kosten pro kWh Strom	0,29 €/kWh
Teuerungsfaktor Strom	16,719
Stromkosten	6.548 €
Laufende Kosten Gesamt	<b>11.704 €</b>
Jährliche Kosten Gesamt	<b>16.088 €</b>
Jährlich gespart gegenüber nur Brennwert-Kessel	<b>1.026 €</b>
Amortisation nach	<b>51 Jahre</b>

#### 4 Parametervariation und Optimierung Anlage

Für die Amortisation wird die Gesamtsumme der Investitionen durch die jährlichen Einsparnisse geteilt. In Tabelle 4.16 sind für alle 27 Varianten die Jährlichen Gesamtkosten, die jährliche Einsparung und die Amortisationszeit angegeben und nach Amortisation aufsteigend geordnet.

**Tabelle 4.16: Wirtschaftlichkeit alle Varianten**

Durchlauf	Jährliche Gesamtkosten	Jährliche Einsparung	Amortisation nach
12. 7,5 kW, 4 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	14.469 €	2.645 €	13,8 a
10. 7,5 kW, 4 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	14.647 €	2.466 €	14,2 a
11. 7,5 kW, 4 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	14.607 €	2.506 €	14,3 a
1. 3 kW, 4 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	15.742 €	1.371 €	18,6 a
20. 12 kW, 4 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	14.973 €	2.141 €	18,9 a
19. 12 kW, 4 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	15.020 €	2.094 €	19,0 a
21. 12 kW, 4 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	14.970 €	2.143 €	19,2 a
3. 3 kW, 4 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	15.708 €	1.406 €	19,2 a
2. 3 kW, 4 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	15.823 €	1.291 €	20,3 a
13. 7,5 kW, 18 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	16.068 €	1.045 €	48,7 a
15. 7,5 kW, 18 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	16.088 €	1.026 €	51,0 a
14. 7,5 kW, 18 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	16.123 €	991 €	52,1 a
22. 12 kW, 18 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	16.444 €	700 €	83,0 a
23. 12 kW, 18 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	16.480 €	633 €	88,9 a
24. 12 kW, 18 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	16.504 €	610 €	93,6 a
6. 3 kW, 18 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	16.960 €	153 €	279,2 a
5. 3 kW, 18 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	17.020 €	94 €	448,7 a
4. 3 kW, 18 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	17.035 €	78 €	528,0 a
16. 7,5 kW, 32 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	17.407 €	-294 €	-
18. 7,5 kW, 32 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	17.449 €	-336 €	-
17. 7,5 kW, 32 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	17.475 €	-361 €	-
25. 12 kW, 32 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	17.752 €	-639 €	-
26. 12 kW, 32 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	17.826 €	-712 €	-
27. 12 kW, 32 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	17.859 €	-745 €	-
9. 3 kW, 32 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	18.285 €	-1171 €	-
8. 3 kW, 32 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	18.344 €	-1.230 €	-
7. 3 kW, 32 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	18.355 €	-1.242 €	-

## 5 Darstellung und Bewertung Ergebnisse

---

Bei 3 Varianten findet die Amortisation noch in der Nutzungsdauer statt. Anlagen mit 32 Solarkollektoren amortisieren sich nie.

### 5 Darstellung und Bewertung Ergebnisse

Die gewonnenen Daten und Ergebnisse werden im Folgenden näher beleuchtet, um Erkenntnisse über das Zusammenspiel der einzelnen Anlagenteile zu gewinnen. Die Folgen für die energetische sowie die ökonomische Betrachtung werden analysiert und bewertet.

#### 5.1 Energetische Bewertung

Energetische Bewertungskriterien für die Solaranlage sind der solare Deckungsgrad und der solare Nutzungsgrad. Der solare Deckungsgrad gibt den Anteil der solar erzeugten Wärme an der Gesamtwärme an. Der solare Nutzungsgrad setzt die durch die Solaranlage erzeugte Wärme zur solaren Strahlung, die auf die Solarkollektoren aufgetroffen ist, ins Verhältnis. In Tabelle 5.1 sind der solare Nutzungsgrad, der solare Deckungsgrad und die absolute Wärmeerzeugung der Solaranlage für alle 27 Varianten dargestellt. In der Spalte Durchlauf steht die 1. Zahl für die Leistung des BHKW, die 2. Zahl gibt die Anzahl der Solarkollektoren an und die 3. Zahl die Größe des Wärmespeichers. Das Mehrfamilienhaus hat wie oben erwähnt einen Wärmebedarf von ca. 73.890 kWh.

**Tabelle 5.1: Solarer Deckungsgrad, solarer Nutzungsgrad und Solare Wärmeerzeugung alle Varianten**

Durchlauf	Solarer Nutzungsgrad	Solarer Deckungsgrad	Solare Wärmeerzeugung
1. 3 kW, 4 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	31,7 %	5,1 %	3.740 kWh
2. 3 kW, 4 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	33,1 %	5,3 %	3.906 kWh
3. 3 kW, 4 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	33,5 %	5,4 %	3.960 kWh
4. 3 kW, 18 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	12,4 %	8,9 %	6.595 kWh
5. 3 kW, 18 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	18,4 %	13,2 %	9.779 kWh
6. 3 kW, 18 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	22,0 %	15,8 %	11.701 kWh
7. 3 kW, 32 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	7,6 %	9,7 %	7.155 kWh
8. 3 kW, 32 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	11,0 %	14,0 %	10.370 kWh
9. 3 kW, 32 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	12,8 %	16,3 %	12.055 kWh
10. 7,5 kW, 4 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	30,9 %	4,9 %	3.653 kWh
11. 7,5 kW, 4 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	32,0 %	5,1 %	3.779 kWh
12. 7,5 kW, 4 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	32,4 %	5,2 %	3.825 kWh

## 5 Darstellung und Bewertung Ergebnisse

---

13. 7,5 kW, 18 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	12,3 %	8,8 %	6.514 kWh
14. 7,5 kW, 18 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	17,8 %	12,8 %	9.488 kWh
15. 7,5 kW, 18 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	21,0 %	15,11 %	1.1170 kWh
16. 7,5 kW, 32 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	7,6 %	9,7 %	7.178 kWh
17. 7,5 kW, 32 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	10,5 %	13,5 %	9.945 kWh
18. 7,5 kW, 32 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	12,2 %	15,6 %	11.537 kWh
19. 12 kW, 4 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	30,8 %	4,9 %	3.640 kWh
20. 12 kW, 4 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	31,8 %	5,1 %	3.761 kWh
21. 12 kW, 4 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	32,2 %	5,1 %	3.800 kWh
22. 12 kW, 18 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	12,2 %	8,8 %	6.466 kWh
23. 12 kW, 18 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	17,7 %	12,8 %	9.433 kWh
24. 12 kW, 18 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	20,9 %	15,0 %	11.118 kWh
25. 12 kW, 32 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	7,5 %	9,6 %	7.120 kWh
26. 12 kW, 32 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	10,5 %	13,4 %	9.883 kWh
27. 12 kW, 32 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	12,1 %	15,5 %	11.474 kWh

Die Anlagenvarianten mit 4 Solarkollektoren nutzen die Solarstrahlung mit jeweils über 30 % am besten aus. Anlagenvarianten mit 32 Solarkollektoren bieten zwar den höchsten Deckungsgrad, allerdings ist dieser nur etwas höher als die Anlagenvarianten mit 18 Solaranlagen, unabhängig von der Größe des BHKWs. Man kann also davon ausgehen, dass 32 Solarkollektoren deutlich zu viel für diese Gebäudeversorgung sind, da auch die Primärenergieeinsparung gegenüber 18 Solarkollektoren nicht wesentlich ist. Von größeren Wärmespeichern profitieren die Varianten mit 18 Solarkollektoren am meisten, die dabei ihren solaren Nutzungsgrad, Deckungsgrad und die solare Wärmeerzeugung fast verdoppeln können. Interessant wäre eine erneute Untersuchung der Kollektorzahl zwischen 4 und 18 Solarkollektoren, um eventuell ein Optimum aus Primärenergieverbrauch und solarer Wärmeerzeugung zu finden.

Ein energetisches Bewertungskriterium für das BHKW ist der Jahresnutzungsgrad. Dieses und die Volllaststunden, die Häufigkeit des An- und Abfahrens, sowie die Wärmeerzeugung des BHKWs werden in Tabelle 5.2 dargestellt.

## 5 Darstellung und Bewertung Ergebnisse

**Tabelle 5.2: Volllaststunden, Jahresnutzungsgrad, Häufigkeit An- und Abfahren und Wärmeerzeugung BHKW alle Varianten**

Durchlauf	Volllaststunden BHKW	Jahresnutzungsgrad	Häufigkeit an/aus BHKW	Wärmeerzeugung BHKW
1. 3 kW, 4 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	5.713	89,4 %	1.700	16.453 kWh
2. 3 kW, 4 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	5.782	89,5 %	1.624	16.690 kWh
3. 3 kW, 4 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	6.165	90,0 %	1.608	17.923 kWh
4. 3 kW, 18 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	5.342	88,9 %	1.572	15.268 kWh
5. 3 kW, 18 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	5.088	88,6 %	1.268	14.483 kWh
6. 3 kW, 18 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	5.128	88,8 %	1.075	14.650 kWh
7. 3 kW, 32 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	5.279	88,7 %	1.599	15.068 kWh
8. 3 kW, 32 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	5.012	88,4 %	1.298	14.240 kWh
9. 3 kW, 32 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	5.093	88,7 %	1.129	14.521 kWh
10. 7,5 kW, 4 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	4.991	88,5 %	3.138	36.567 kWh
11. 7,5 kW, 4 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	5.142	88,6 %	2.133	37.741 kWh
12. 7,5 kW, 4 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	5.360	88,8 %	1.844	39.425 kWh
13. 7,5 kW, 18 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	4.713	88,4 %	1.610	34.428 kWh
14. 7,5 kW, 18 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	4.572	88,3 %	1.695	33.368 kWh
15. 7,5 kW, 18 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	4.544	88,3 %	1.319	33.184 kWh
16. 7,5 kW, 32 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	4.662	88,3 %	2.809	34.034 kWh
17. 7,5 kW, 32 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	4.529	88,2 %	1.704	33.027 kWh
18. 7,5 kW, 32 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	4.513	88,3 %	1.348	32.933 kWh
19. 12 kW, 4 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	4.358	86,7 %	9.164	51.288 kWh
20. 12 kW, 4 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	4.455	86,7 %	4.364	52.477 kWh
21. 12 kW, 4 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	4.509	86,7 %	2.589	53.131 kWh
22. 12 kW, 18 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	4.147	86,6 %	8.266	48.709 kWh
23. 12 kW, 18 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	4.020	86,5 %	3.503	47.185 kWh
24. 12 kW, 18 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	3.940	86,5 %	1.957	46.244 kWh
25. 12 kW, 32 Koll., 0,6 m <sup>2</sup>	4.106	86,5 %	8.157	48.218 kWh
26. 12 kW, 32 Koll., 1,8 m <sup>2</sup>	3.988	86,5 %	3.507	46.794 kWh
27. 12 kW, 32 Koll., 3,0 m <sup>2</sup>	3.916	86,5 %	1.972	45.931 kWh

Was hier auffällt ist, dass bei großen Solarkollektorflächen die Solaranlage mehr von größeren Speichern profitiert und das BHKW in der Wärmeerzeugung verdrängt. Mit zunehmender BHKW-Größe ist erwartungsgemäß ein größerer Speicher wichtiger, vor allem

für die Häufigkeit der An- und Abfahrvorgänge. Die BHKW-Größe mit einer thermischen Leistung von 7,5 kW ist ein guter Kompromiss aus vielen Volllaststunden, wenig An- und Abfahrvorgängen und hoher Wärmeerzeugung.

### 5.2 Ökonomische Bewertung

Es fällt auf, dass die Wirtschaftlichkeit der Anlage vor allem von der Größe der Solarkollektorfläche abhängt. So kosten alle Anlagen mit 32 Solarkollektoren jährlich mehr als die Wärmeerzeugung durch einen Brennwertkessel. Dies liegt vor allem an den hohen Investitionskosten verbunden mit, relativ gesehen, wenig Einsparung. Auch sämtliche Anlagen mit 18 Kollektoren sind weit davon entfernt sich zu amortisieren. Anlagen mit 4 Kollektoren können sich noch innerhalb der Nutzungsdauern von 15 Jahren amortisieren. Die Varianten mit BHKW-Größe von 7,5 kW<sub>th</sub> sind dabei die ökonomisch besten. Hier ist die Kombination aus vielen Volllaststunden und damit auch hoher Stromproduktion und mäßigen Brennstoffkosten und Investitionskosten am besten. Der Einfluss des Speichers auf die Wirtschaftlichkeit lässt sich schwer erkennen. Durch die energetischen Vorteile, vor allem für die An- und Abfahrvorgänge es BHKWs wäre hier eher die größte Variante zu wählen. Die beste Amortisationsdauer von 13,8 Jahren ist immer noch sehr lang, kann aber wahrscheinlich durch weitere Optimierung der Anlage noch gesenkt werden.

Ökonomisch gesehen wäre es für das gewählte Mehrfamilienhaus abschließend tendenziell am besten, die Solaranlage sehr klein zu halten und das BHKW auf eine günstige Größe auszulegen. Damit kann ein Heizungssystem geschaffen werden, dass Primärenergie einspart und wirtschaftlich betrieben werden kann. Im wirtschaftlichsten Durchlauf 12 werden 8,5 % Primärenergie und 14 % CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber der Versorgung durch einen Brennwertkessel und reinem Strombezug aus dem Netz gespart.

### 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein Mehrfamilienhaus simuliert, das sowohl mit einer solarthermischen, als auch einer Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage ausgestattet ist.

In der genutzten Simulationsumgebung wurde dafür ein passendes BHKW-Modul programmiert und ein Gesamtmodell für die Energieversorgung des Gebäudes erstellt. Durch Variation mehrerer Parameter ist die Grundlage für die energetische und ökonomische Betrachtung entstanden. Dabei wurde das Augenmerk auf Primärenergieeinsparung und Wirtschaftlichkeit der Anlage gelegt. In einer Analyse wurden die energetischen und ökonomischen Aspekte untersucht und bewertet.

Energetisch gesehen wird in dem System mit Kombination von solarthermischer und KWK-Anlage im Vergleich zu einem System mit Brennwert-Kessel und reinem Strombezug aus dem öffentlichen Netz immer Primärenergie eingespart. Sowohl durch das BHKW als auch durch die solarthermische Anlage wird der Primärenergieverbrauch verringert. Bei der Variante mit dem größten BHKW und der größten solarthermischen Anlage werden 18,3 % Primärenergie und 21,5 % CO<sub>2</sub>-Emission eingespart. Bei größer werdenden Speichern nehmen große Solarkollektorflächen dem BHKW etwas die Betriebsstunden ab. Bei kleinen Solarkollektorflächen ist dieser Effekt sehr gering.

Ökonomisch gesehen sind dem System enge Grenzen gesetzt. Bei passender Auslegung des BHKW ist der Betrieb bei kleinen Solarkollektorflächen in diesem Modell wirtschaftlich. Die geringste Amortisationszeit von 13,8 Jahren ist immer noch sehr hoch, bei einer weiteren Optimierung könnte dieser Wert aber noch etwas fallen. Im wirtschaftlichsten Fall werden immer noch 8,5 % Primärenergie und 14 % CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber der Versorgung durch einen Brennwert-Kessel und reinem Strombezug aus dem Netz gespart.

Es gibt noch viele weitere Untersuchungsmöglichkeiten einer Kombination aus solarthermischer und Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage in Mehrfamilienhäusern. Hier wurde nur ein relativ kleines Mehrfamilienhaus mit hohem Energiestandard betrachtet. Durch Variation des Gebäudes könnte die Sinnhaftigkeit auch von der Größe und dem Energiestandard des Gebäudes abhängig gemacht werden. Außerdem könnte das Simulationsmodell dahingehend verändert werden, dass die Solaranlage nur zur Warmwasserbereitstellung genutzt wird und die energetischen und wirtschaftlichen Effekte betrachtet werden. In dem Modell in dieser Arbeit werden keine Wärmeverluste in

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

---

Leitungen betrachtet. Durch die Betrachtung von Wärmeverlusten würde das Modell die Realität noch genauer nachbilden. Hier wird als Vergleichssystem nur die Versorgung durch den Brennwert-Kessel und den Strombezug aus dem öffentlichen Netz genutzt. Hier wäre es auch möglich in Zukunft Varianten von Solarthermie und Spitzenlastkessel oder BHKW und Spitzenlastkessel als Alternativen zu betrachten.

### Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Die Energiewende gemeinsam zum Erfolg führen.  
<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/die-energiewende-gemeinsam-zum-erfolgfuehren,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>,  
abgerufen: 06.10.2015, Berlin, 2015
- [2] Umweltbundesamt (Hrsg.): Energieverbrauch der privaten Haushalte.  
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/energieverbrauch-der-privaten-haushalte>  
abgerufen: 06.10.2015, Dessau-Roßlau, 2015
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Erneuerbare Energien im Jahr 2014.  
<https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/erneuerbare-energien-im-jahr-2014,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>,  
abgerufen: 06.10.2015, Berlin, 2015
- [4] Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (Hrsg.): Daten und Infos zur deutschen Solarbranche.  
<http://www.solarwirtschaft.de/presse/marktdaten.html>,  
abgerufen: 07.07.2015, Berlin, 2015
- [5] Statista GmbH (Hrsg.): Anteil der KWK-Stromerzeugung an der Gesamtnettostromerzeugung in Deutschland in den Jahren 2003 bis 2014.  
<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/307108/umfrage/anteil-der-kwk-stromerzeugung-an-der-gesamtstromerzeugung-in-deutschland/>,  
abgerufen: 07.10.2015, Hamburg, 2015
- [6] Loga Tobias; u.a.: Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden.  
[http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE\\_TABULA\\_TypologyBrochure\\_IWU.pdf](http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf),  
abgerufen: 27.09.2015, Darmstadt, 2015

- [7] Eicker Ursula : Solare Technologien für Gebäude.  
2. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- [8] Suttor Wolfgang: Blockheizkraftwerke – Ein Leitfaden für den Anwender.  
8. Auflage, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2014
- [9] Ohne Verfasser - deutsches-energieportal.de: Heizen heute - Blockheizkraftwerk (BHKW), Mini-BHKW und Micro-BHKW.  
<http://www.deutsches-energieportal.de/heizung-heute/heizung-bhkw.html>,  
abgerufen 10.10.2015
- [10] Thomas Bernd: Mini-Blockheizkraftwerke.  
2. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2011
- [11] Rogatty Wolfgang: Brennstoffzellen für die Haus-Energieversorgung -Neue Technologien für die SHK-Branche.  
<http://www.ikz.de/1996-2005/2004/21/0421030.php>,  
abgerufen: 12.10.2015, Allendorf, 2004
- [12] Lohmann Sandra: Einführung in die Software MATLAB®-Simulink® und die Toolboxen CARNOT und Stateflow® zur Simulation von Gebäude- und Heizungstechnik.  
[http://zies.hs-duesseldorf.de/Lehre/Downloads/Documents/CARNOT\\_Anfaenger\\_Anleitung.pdf](http://zies.hs-duesseldorf.de/Lehre/Downloads/Documents/CARNOT_Anfaenger_Anleitung.pdf),  
abgerufen: 13.10.2015, Düsseldorf, 2013
- [13] Michelsen Claus, Neuhoff Karsten, Schopp Anne: Wärmemonitor Deutschland 2013: Gesunkener Heizenergiebedarf, gestiegene Kosten  
[https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.484244.de/14-41-1.pdf](https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.484244.de/14-41-1.pdf),  
abgerufen: 13.10.2015, Berlin, 2014
- [14] ASEW GbR (Hrsg.): Warmes Wasser - energieeffizient erzeugen und rationell verwenden.  
<http://www.estw.de/de/Energie-sparen-Shop/Heiztechnik/Warmwasser/Warmwasser/ASEW-Broschuere-Warmes-Wasser-estw.pdf>,  
abgerufen: 27.09.2015, Köln, 2008
- [15] Richtlinie VDI 6002 Blatt 1: Solare Trinkwassererwärmung - Allgemeine Grundlagen, Systemtechnik und Anwendung im Wohnungsbau, März 2014

- [16] Zoerner Thorsten: Wir bauen uns ein Lastprofil...  
<https://blog.stromhaltig.de/2013/01/wir-bauen-uns-ein-lastprofil/>  
abgerufen: 03.06.2015, Berlin, 2013
- [17] Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.): Deutsche Gebäudetypologie – Systematik und Datensätze.  
[http://www.iwu.de/fileadmin/user\\_upload/dateien/energie/klima\\_altbau/Gebaeudetypologie\\_Deutschland.pdf](http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Gebaeudetypologie_Deutschland.pdf),  
abgerufen: 24.03.2015, Darmstadt, 2005
- [18] Norm DIN EN 12831: Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast, August 2003
- [19] Norm DIN 4108 Teil 2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Februar 2013
- [20] Statische Ämter des Bundes und der Länder (Hrsg.): Gebiet und Bevölkerung – Haushalte.  
[http://www.statistik-portal.de/statistik-portal/de\\_jb01\\_jahrtab4.asp](http://www.statistik-portal.de/statistik-portal/de_jb01_jahrtab4.asp),  
abgerufen: 09.10.2015, Stuttgart, 2014
- [21] Ohne Verfasser – Heizungsbau.net: Warmwasserspeicher: Größe bedarfsgerecht bestimmen & Energie sparen!.  
<http://www.heizungsbau.net/warmwasserspeicher-groesse-20131373>,  
abgerufen: 09.10.2015
- [22] Schmid Christoph: Heizung, Lüftung, Elektrizität – Energietechnik im Gebäude. 4. Auflage, Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich 2013
- [23] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Stromspiegel für Deutschland 2014: Vergleichswerte für den Stromverbrauch.  
[http://www.die-stromsparinitiative.de/fileadmin/bilder/Stromspiegel/Brosch%C3%BCre/Stromspiegel2014web\\_final.pdf](http://www.die-stromsparinitiative.de/fileadmin/bilder/Stromspiegel/Brosch%C3%BCre/Stromspiegel2014web_final.pdf),  
abgerufen: 10.07.2015, Berlin, 2014
- [24] Verordnung über energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) vom 24. Juli 2007, letzte Änderung vom 31. August 2015

- [25] Ohne Verfasser – iinas.org: GEMIS - (Globales Emissions-Modell integrierter Systeme).  
<http://www.iinas.org/gemis-de.html>,  
abgerufen: 12.10.2015
- [26] Ohne Verfasser - iinas.org: Ausgewählte Ergebnisse von GEMIS.  
[http://www.iinas.org/tl\\_files/iinas/downloads/GEMIS/2015\\_GEMIS-Ergebnisse-Auszug.xlsx](http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2015_GEMIS-Ergebnisse-Auszug.xlsx),  
abgerufen: 02.10.2015
- [27] IfE Institut für Energietechnik GmbH: Integriertes Klimaschutzkonzept für das Bistum Eichstätt.  
[http://www.bistum-eichstaett.de/fileadmin/dioezesanrat/Klimaschutzkonzept/IKSK\\_Bistum\\_Eichstaett.pdf](http://www.bistum-eichstaett.de/fileadmin/dioezesanrat/Klimaschutzkonzept/IKSK_Bistum_Eichstaett.pdf),  
abgerufen: 02.10.2015, Amberg, 2012
- [28] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. [Hrsg.]: BHKW-Kenndaten 2014/2015 – Module, Anbieter, Kosten.  
Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch, Essen, 2014
- [29] Ohne Verfasser - heizungsfinder.de: Was eine Gasbrennwertheizung kostet.  
<http://www.heizungsfinder.de/gasheizung/gasbrennwertheizung-preise>,  
abgerufen: 02.10.2015
- [30] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA): Zuschuss für Mini-KWK-Anlagen.  
[http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft\\_waerme\\_kopplung/mini\\_kwk\\_anlagen/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/mini_kwk_anlagen/index.html),  
abgerufen: 13.10.2015, Berlin, 2014
- [31] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA): Förderübersicht Solar (Basis-, Innovations- und Zusatzförderung)  
[http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare\\_energien/solarthermie/publikationen/uebersicht\\_solar.pdf](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare_energien/solarthermie/publikationen/uebersicht_solar.pdf),  
abgerufen: 13.10.2015, Berlin, 2015

- [32] Ohne Verfasser - heizsparer.de: Solarthermie Wirtschaftlichkeit.  
<http://www.heizsparer.de/solar/solarthermie/solarthermie-wirtschaftlichkeit>,  
abgerufen: 13.10.2015
- [33] Ohne Verfasser - thermondo.de: Brennwertkessel: Kosten im Vergleich.  
<https://www.thermondo.de/brennwerttechnik/brennwertkessel-kosten/>,  
abgerufen: 13.10.2015
- [34] Ohne Verfasser – verivox.de: Verivox – Verbrauchergaspreisindex Gas.  
<http://www.verivox.de/verbraucherpreisindex-gas/>,  
abgerufen: 13.10.2015
- [35] Ohne Verfasser – strom-report.de: Strompreise in Deutschland.  
<http://strom-report.de/strompreise/#strompreisentwicklung>,  
abgerufen: 13.10.2015
- [36] Ohne Verfasser – bhkw-jetzt.de: Förderung nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz.  
<http://www.bhkw-jetzt.de/foerderung/nach-kwk-g/>,  
abgerufen: 13.10.2015
- [37] Ohne Verfasser – bhkw-infothek.de: Einsparungen und Einnahmen.  
<http://www.bhkw-infothek.de/bhkw-informationen/wirtschaftlichkeit-foerderung/einsparungen-und-einnahmen/>,  
abgerufen: 13.10.2015
- [38] Ohne Verfasser – bhkw-infothek.de: KWK-Index Q3/2015: Stabil auf zu niedrigem Niveau.  
<http://www.bhkw-infothek.de/nachrichten/23208/2015-10-02-kwk-index-q32015-stabil-auf-zu-niedrigem-niveau/>  
abgerufen: 13.10.2015
- [39] Prof. Dr.-Ing. Bernd Biffar: Vorlesungsskript Fach Kraft-Wärme-Kopplung,  
Masterstudiengang Energietechnik, Hochschule Kempten, Wintersemester 2014/15

**Erklärung und Ermächtigung**

Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit selbstständig angefertigt, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, alle benutzten Quellen und Hilfsmittel angegeben, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate gekennzeichnet habe.

Kempton, den .....  
.....  
Unterschrift

Hiermit ermächtige ich die Hochschule Kempton zur Veröffentlichung der Kurzzusammenfassung meiner Arbeit, z.B. auf gedruckten Medien oder auf einer Internetseite.

Kempton, den .....  
.....  
Unterschrift