



Stefan Forsthofer, BSc.

Kostenoptimierung dezentraler Energiesysteme

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik-Wirtschaft

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr. techn. Ernst Schmutzner

Dipl.-Ing. Mike Lagler

Dipl.-Ing. Thomas Wieland

Institut für Elektrische Anlagen

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird ein dezentrales Energiesystem, bestehend aus einem elektrischen und thermischen Teilsystem, mittels der Software Matlab als Simulationsmodell nachgebildet und analysiert. Das Simulationsmodell des dezentralen Energiesystems soll, bezüglich der Größe des dezentralen Energiesystems (Einfamilienhaus, Industriebetrieb) und der verwendeten Komponenten (Photovoltaikanlage, Solarthermieanlage, Wärmepumpe, elektrischer Speicher, ...), universell einsetzbar sein.

Das dezentrale Energiesystem wird mittels eines Optimierungsalgorithmus (linprog), unter Betrachtung verschiedener relevanter Szenarien, auf minimale Systemkosten optimiert. Durch Vergleich der Optimierungsergebnisse der verschiedenen relevanten Szenarien kann ein kostenoptimierter Betrieb des dezentralen Energiesystems ermittelt werden.

Ein weiteres Ziel dieser Masterarbeit ist die wirtschaftliche Bestimmung eines elektrischen Speichers bezogen auf dessen Speicherkosten (€/kWh), sowie die wirtschaftliche Analyse eines thermischen Langzeitspeichers in Abhängigkeit des Wirkungsgrades.

Schlüsselwörter: dezentrales Energiesystem, Systemoptimierung, erneuerbare Energie, fossile Energie, Kostenoptimierung, Speichertechnologien

Abstract

In this master thesis a decentralized energy system consisting of an electrical and thermal subsystem is emulated and analyzed by using the software Matlab. The simulation model should be universally applicable in relation to the different size of the decentralized energy system (single-family house, industry) and the used components (photovoltaic, solar heat system, heat pump, electric storage, ...).

To calculate the minimum system costs of the decentralized energy system, an optimization algorithm (linprog) is used by analyzing various relevant scenarios. By comparison of the optimizing results from the different relevant scenarios, the cost-optimized operation of the decentralized energy system can be determined.

Another aim of this master thesis is to determine the economic efficiency of an electric storage based on the storage costs (€/kWh) as well as the economic analysis of a long-term thermal storage depending to the efficiency.

Keywords: decentralized energy system, system optimization, renewable energies, fossil energies, cost optimization, storage technologies

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgaben und Ziele	8
2	Einleitung	9
3	Allgemeine Beschreibung elektrischer und thermischer Systemkomponenten	11
3.1	Erzeuger und Energiequellen	11
3.1.1	Photovoltaikanlage	11
3.1.2	Elektrisches Netz	13
3.1.3	Solarthermieanlage	14
3.1.4	Fernwärmanlage	16
3.1.5	Gasheizung	18
3.1.6	Wärmepumpe	20
3.1.7	Klimaanlage	22
3.2	Speicher	23
3.2.1	Elektrischer Speicher	23
3.2.2	Thermische Speicher	25
3.2.2.1	Thermischer Kurzzeitspeicher	26
3.2.2.2	Thermischer Langzeitspeicher	27
3.2.2.3	Kältespeicher	29
3.3	Verbraucher	30
3.3.1	Elektrischer Verbraucher	30
3.3.2	Thermische Verbraucher	30
3.3.2.1	Raumklima	30
3.3.2.2	Warmwasser	30
4	Modellbildung dezentrales Energiesystem	31
4.1	Schematisches Modell	31
4.2	Optimierungsvariablen	34
4.3	Last- und Erzeugungsprofile	36
4.3.1	Photovoltaikanlage	36
4.3.2	Solarthermieanlage	37
4.3.3	Elektrische Verbraucher	37
4.3.4	Raumklima	38
4.3.5	Warmwasser	43
4.4	Systemgleichungen	45
4.5	Optimierung	48
5	Programmablauf	49
6	Simulationsergebnisse	51

6.1	Szenario A: Elektrisches System.....	52
6.2	Szenario B: Elektrisches System + Warmwasserbedarf	58
6.3	Szenario C: Gesamtsystem ohne Kühlbedarf.....	62
6.3.1	Verschiedene Kombinationen (Erzeuger und Energiequellen).....	63
6.3.2	Kombination aus Photovoltaikanlage, Solarthermieanlage, elektrischem Speicher und thermischem Langzeitspeicher	65
6.3.3	Kombination aus Photovoltaikanlage, Wärmepumpe, elektrischem Speicher und thermischem Langzeitspeicher	75
6.4	Szenario D: Gesamtsystem mit Kühlbedarf	81
6.4.1	Kombination aus Photovoltaikanlage, Gasheizung und elektrischem Speicher	83
6.4.2	Kombination aus Photovoltaikanlage, Wärmepumpe und elektrischem Speicher	84
7	Zusammenfassung.....	86
8	Literaturverzeichnis	88

Abkürzungsverzeichnis

BK	Betriebskosten
DG	Duschgang
FW	Fernwärmanlage
Ins	Installation
IK	Investitionskosten
Kalt	Kältespeicher
KA	Klimaanlage
KE	Kosteneinsparungen
KF	Kollektorfläche
KS	Kurzzeitspeicher
LS	Langzeitspeicher
PV	Photovoltaikanlage
RK	Raumklima
RW	Raumwärme
SA	Solarthermieanlage
SS	Solarspeicher
SP	Speicher
Ver	Verbraucher
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser

1 Aufgaben und Ziele

Das Ziel dieser Masterarbeit ist die Gesamt-Kostenoptimierung dezentraler Energiesysteme. Mittels der Software Matlab wird ein dezentrales Energiesystem, bestehend aus einem elektrischen und thermischen Teilsystem, nachgebildet. Das Simulationsmodell soll hierbei universell einsetzbar, das heißt vom Einfamilienhaus bis zum Industriebetrieb anwendbar sein. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden mit Hilfe des erstellten Simulationsmodells, unterschiedliche Szenarien analysiert:

- Szenario A: Elektrisches System - Im Szenario A wird der elektrische Teil des dezentralen Energiesystems betrachtet. Der thermische Teil des dezentralen Energiesystems wird bei der Systemoptimierung nicht berücksichtigt und verursacht daher keine Kosten. Mit Hilfe dieser Analyse wird die optimale elektrische Speichergröße ermittelt bei welcher sich ein elektrischer Speicher in einem dezentralen Energiesystem wirtschaftlich rentiert.
- Szenario B: Elektrisches System + Warmwasserbedarf - Im Szenario B wird zusätzlich zum elektrischen System der Warmwasserbedarf inklusive einem thermischen Kurzzeitspeicher berücksichtigt. Es werden Simulationen mit Kombinationen unterschiedlicher Erzeuger und Energiequellen durchgeführt, wobei die resultierenden Gesamtkosten der verschiedenen Kombinationen (Erzeuger und Energiequellen) analysiert werden. Die Kombination (Erzeuger und Energiequellen) bei welcher die Gesamtkosten am geringsten sind, ergibt die beste Möglichkeit den vorgegebenen Energiebedarf wirtschaftlich zu decken.
- Szenario C: Gesamtsystem ohne Kühlbedarf - Im Szenario C wird das gesamte dezentrale Energiesystem bestehend aus einem elektrischen Teilsystem und einem thermischen Teilsystem (ohne Kühlbedarf) analysiert. Es werden, wie im Szenario B (Elektrisches System + Warmwasser), verschiedene Simulationen mit unterschiedlichen Kombinationen (Erzeuger und Energiequellen) durchgeführt. Des Weiteren wird ein thermischer Langzeitspeicher im dezentralen Energiesystem in Abhängigkeit unterschiedlicher Wirkungsgrade analysiert.
- Szenario D: Gesamtsystem mit Kühlbedarf - In diesem Szenario wird zusätzlich zum Wärmebedarf des dezentralen Energiesystems der Kühlbedarf berücksichtigt, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Kühlkreis liegt.

2 Einleitung

Der Verbrauch fossiler Energieträger (Erdöl, Erdgas, Kohle) ist weltweit sehr hoch. Diese fossilen Rohstoffe werden zum großen Teil dazu verwendet, um in einem Verbrennungsprozess thermische Energie zu erzeugen. Ein Teil dieser thermischen Energie wird in elektrische Energie umgewandelt, um die weltweit stetig steigende Nachfrage an elektrischer Energie decken zu können. Jedoch ist das fossile Rohstoffvolumen auf der Erde begrenzt. Aktuell werden pro Jahr so viele fossile Rohstoffe benötigt, wie die Erde in drei Millionen Jahre gebraucht hat, um diese zu speichern. Wenn also der Verbrauch weiterhin so hoch ist wie aktuell bzw. noch weiter ansteigt, werden die fossilen Rohstoffreserven der Erde in Zukunft ausgeschöpft sein. vor allem aber ist aber der aktuelle CO₂-Ausstoß, bzw. der Ausstoß klimarelevanter Treibhausgase zurzeit unverhältnismäßig hoch da in fossilen Rohstoffen außerdem viel CO₂ gebunden ist. Durch Verbrennung dieser Energieträger wird eine große Menge an CO₂ freigesetzt, welches maßgeblich zur Klimaerwärmung der Erde beiträgt [1].

Um den Energiebedarf der Weltbevölkerung weiterhin decken zu können, muss die zukünftige Energieerzeugung auf alternative Energiequellen fokussiert werden [1].

Wie sich der Energiepreis zukünftig entwickelt, ist nur sehr schwer vorherzusagen, doch aufgrund der Tatsache, dass das fossile Rohstoffvolumen begrenzt ist, ist anzunehmen, dass der Energiepreis in Zukunft steigen wird. Durch die steigenden Energiepreise und den bemerkbaren Klimawandel, entscheiden sich immer öfters Hausbesitzer und Unternehmen dazu, einen Teil der benötigten Energie selbst, mit Hilfe von alternativen erneuerbaren Energiequellen zu erzeugen.

Um dem Ziel einer wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Energieerzeugung näher zu kommen, werden immer mehr Photovoltaikanlagen installiert. Photovoltaikanlagen werden zukünftig in Kombination mit einem elektrischen Speicher installiert. Der wesentliche Grund für die zusätzliche Installation eines elektrischen Speichers besteht darin, dass der Bedarf der erzeugten elektrischen Energie der Photovoltaikanlage sich nicht immer mit dem Verbrauch deckt. Diese nicht verbrauchte Energie muss bei nicht vorhandenem elektrischen Speicher in das elektrische Netz zu einem niedrigen unrentablen Preis verkauft werden. Mit Hilfe eines elektrischen Speichers ist es möglich, die elektrische Energie zu einem späteren Zeitpunkt selbst zu nutzen [1].

Zusätzlich zum elektrischen Energiebedarf hat ein Haus beziehungsweise Unternehmen auch Bedarf nach thermischer Energie, wobei man zwischen Wärme- und Kälteenergie unterscheidet. Um Warmwasser zu erzeugen, wird lediglich Wärmeenergie benötigt. Möchte man jedoch auch das Raumklima regeln, also nicht nur heizen sondern auch kühlen, benötigt man zusätzlich Kälteenergie. Es gibt verschiedene Möglichkeiten thermische Energie zu

erzeugen, zum Beispiel durch eine Kältemaschine oder eine Solarthermieanlage. Hier gilt das gleiche Bedarfsproblem wie zuvor bei einer Photovoltaikanlage. Die erzeugte thermische Energie wird oftmals nicht unmittelbar benötigt, wenn diese gerade zur Verfügung steht. Abhilfe hierfür bieten thermische Speicher. Eine weitere Möglichkeit bietet die Verwendung einer Wärmepumpe. Hierbei wird thermische Energie durch Einsatz von elektrischer Energie und der Umgebungswärme erzeugt. Eine Klimaanlage in Kombination mit einem Kältespeicher bietet die Möglichkeit Kälteenergie zu erzeugen und zu speichern [1].

Wird sowohl der elektrische als auch der thermische Teil betrachtet, gibt es also eine Vielzahl von Komponenten, welche zusammen ein komplexes dezentrales Energiesystem ergeben. Es stellt sich die Frage, wie man so ein kombiniertes System betreiben muss, um ein wirtschaftliches Optimum und die Komfortziele zu erreichen. Die große Vielfalt dieses dezentrale Energiesystem zu betreiben, macht es schwierig, einen optimalen Betrieb zu finden.

3 Allgemeine Beschreibung elektrischer und thermischer Systemkomponenten

Um ein besseres Verständnis für das dezentrale Energiesystem zu bekommen, ist es notwendig, die einzelnen Komponenten und deren Eigenschaften zu verstehen. Prinzipiell kann man alle Komponenten in folgende drei Kategorien einteilen:

- Erzeuger und Energiequellen
- Speicher
- Verbraucher

3.1 Erzeuger und Energiequellen

Es gibt eine Vielzahl an Möglichkeiten, elektrische oder thermische Energie zu beziehen bzw. selbst zu erzeugen. Zu den Erzeugern und Energiequellen, welche für das Simulationsmodell relevant sind, gehören die Photovoltaikanlage, das elektrische Netz, die Solarthermieanlage, die Fernwärme, die Gasheizung, die Wärmepumpe und die Klimaanlage.

3.1.1 Photovoltaikanlage

Eine Photovoltaikanlage ermöglicht die Umwandlung der Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie. Ein Teil der Photonenenergie des Lichts wird bei Erreichen der Erdoberfläche in einer Photovoltaikzelle in elektrische Energie umgewandelt. Photonen welche auf eine Photovoltaikzelle auftreffen, können Elektronen-Loch-Paare erzeugen (siehe Abbildung 1, Nummer 1), dadurch entstehen freie Ladungsträger, welche abhängig von ihrer Polarität und dem elektrischen Feld im pn-Übergang zu verschiedenen Polen wandern. Ein Teil der freien Ladungsträger geht durch Rekombinationsprozesse verloren (siehe Abbildung 1, Nummer 2). Aufgrund dieser Ladungstrennung ergibt sich ein von außen messbarer Potentialunterschied, wodurch die Photovoltaikzelle als Energiequelle wirkt [2].

In Abbildung 1 ist der Aufbau und die Funktion einer Photovoltaikzelle dargestellt.

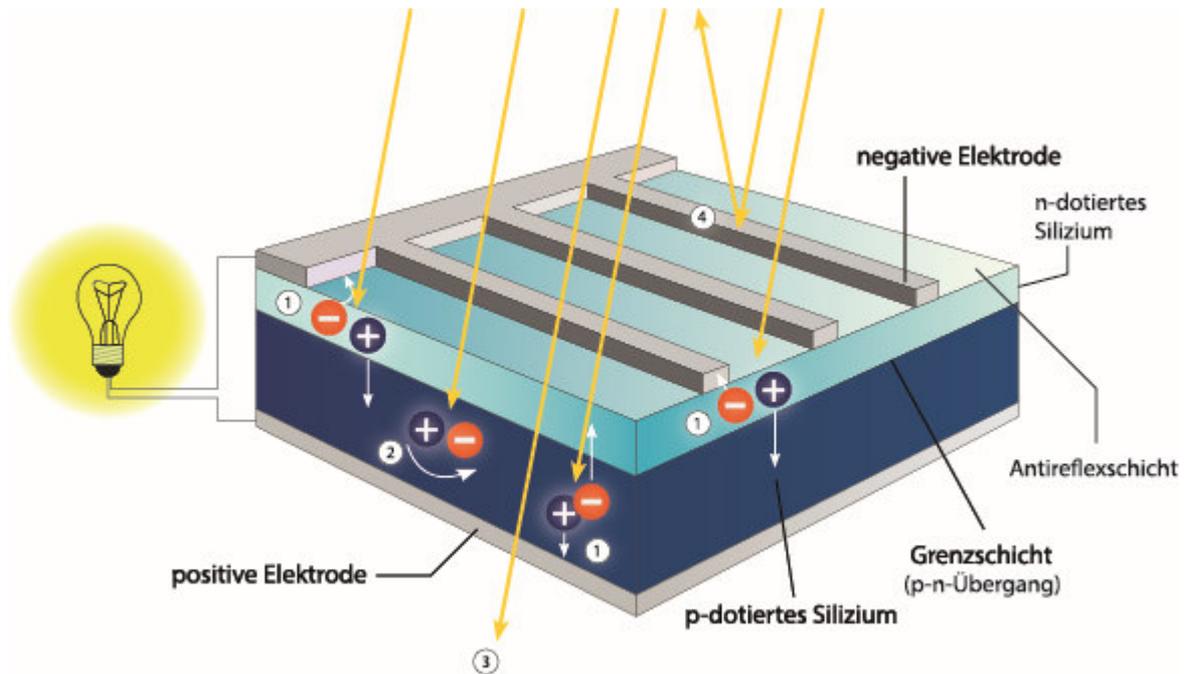


Abbildung 1: Aufbau und Funktionsweise einer Photovoltaikzelle [3]

Wie zuvor erwähnt wird nur ein Teil der Photonenenergie in elektrische Energie umgewandelt, die ungenutzte Photonenenergie ist in Abbildung 1 mit der Nummer 3 gekennzeichnet. Außerdem wird ein geringer Teil der Photonenenergie (circa 2,5 %) durch die Kontakte der negativen Elektrode reflektiert und abgeschottet, dieser Anteil ist in der Abbildung 1 mit Nummer 4 gekennzeichnet. Durch Zusammenschalten vieler Photovoltaikzellen ist es möglich, eine höhere Leistung zu erzeugen. Ein großer Vorteil einer Photovoltaikanlage ist, dass durch die Umwandlung der Solarstrahlung in elektrische Energie kein CO_2 in die Atmosphäre freigesetzt wird. Der Nachteil dieser Anlage besteht allerdings darin, dass die Erzeugung der elektrischen Energie dargebotsabhängig ist. Es ist also nicht möglich jederzeit elektrische Energie zu erzeugen, da diese nur erzeugt werden kann, wenn die Sonne scheint [2].

Kosten einer Photovoltaikanlage

Die Investitionskosten $C_{IK,PV}$ einer 7 kWp Photovoltaikanlage werden mit 14.000 € angenommen. Die Betriebskosten $C_{BK,PV}$ einer Photovoltaikanlage liegen zwischen 1-1,5 %/a der Investitionskosten. Im Simulationsmodell werden Betriebskosten $C_{BK,PV}$ von 1,5 %/a der Investitionskosten $C_{IK,PV}$ angenommen [4].

Die Betriebskosten $C_{BK,PV}$ pro Jahr ergeben somit

$$C_{BK,PV} = C_{IK,PV} \cdot 1,5 \% / a = 14000 \text{ €} \cdot 1,5 \% / a = \underline{\underline{210 \text{ €/a}}} \quad (1)$$

$C_{BK,PV}$... Betriebskosten der Photovoltaikanlage
 $C_{IK,PV}$... Investitionskosten der Photovoltaikanlage

Die Gesamtkosten $C_{pro \text{ Jahr},PV}$ der Photovoltaikanlage pro Jahr ergeben sich aus dem Verhältnis der Investitionskosten $C_{IK,PV}$ zur Lebensdauer T_{PV} und den Betriebskosten $C_{BK,PV}$ der Photovoltaikanlage:

$$C_{pro \text{ Jahr},PV} = \frac{C_{IK,PV}}{T_{PV}} + C_{BK,PV} = \frac{14000 \text{ €}}{25 \text{ a}} + 210 \text{ €/a} = \underline{\underline{770 \text{ €/a}}} \quad (2)$$

$C_{BK,PV}$... Betriebskosten der Photovoltaikanlage
 $C_{IK,PV}$... Investitionskosten der Photovoltaikanlage
 $C_{pro \text{ Jahr},PV}$... Kosten der Photovoltaikanlage pro Jahr
 T_{PV} ... Lebensdauer der Photovoltaikanlage

Um die Kosten im Simulationsmodell korrekt zu berücksichtigen, werden die Kosten auf ein 15-min-Zeitintervall umgerechnet.

$$C_{pro \text{ 15 min},PV} = \frac{C_{pro \text{ Jahr},PV}}{24 \frac{h}{d} \cdot 4 \frac{15 \text{ min}}{h} \cdot 365 \frac{d}{a}} = \frac{770 \frac{\text{€}}{a}}{35040 \frac{15 \text{ min}}{a}} = \underline{\underline{0,022 \text{ €/15 min}}} \quad (3)$$

$\triangleq 2,2 \text{ Cent} / 15 \text{ min}$

$C_{pro \text{ 15 min},PV}$... Kosten der Photovoltaikanlage pro 15 min
 $C_{pro \text{ Jahr},PV}$... Kosten der Photovoltaikanlage pro Jahr

3.1.2 Elektrisches Netz

Über das elektrische Netz kann elektrische Energie von Energieversorgungsunternehmen (Verteilernetzbetreibern) gekauft bzw. verkauft werden. Wenn der Verbrauch höher als die Erzeugung der Photovoltaikanlage und der elektrische Speicher leer ist, kann die Differenzenergie vom elektrischen Netz bezogen werden. Dieses Prinzip funktioniert auch umgekehrt, falls ein Überschuss vorhanden bzw. die tarifliche Situation es ermöglicht, kann Energie in das elektrische Netz verkauft werden.

Kosten des elektrischen Netzes

Für eine gekaufte kWh elektrische Energie aus dem elektrischen Netz, wird ein Preis von 0,20 €/kWh festgelegt. In diesen Kosten sind auch die jährlichen Fixkosten inkludiert. Der Verkaufspreis in das elektrische Netz wird mit 0,035 €/kWh angenommen. Bei manchen

Auswertungen sind diese Preise nicht festgelegt sondern werden variiert, um verschiedene Abhängigkeiten darzustellen. Sind die Preise nicht explizit anders angegeben, wird von den zuvor genannten Preisen ausgegangen [5].

3.1.3 Solarthermieanlage

Eine Solarthermieanlage erzeugt durch Absorption der Solarstrahlung thermische Energie, welche zur Brauch- und Trinkwassererwärmung sowie zur Heizungsunterstützung verwendet werden kann. Da eine Solarthermieanlage dargebotsabhängig ist, im Sommer eine höhere Erzeugung als im Winter erfolgt und der Wärmebedarf im Winter am höchsten ist, ist eine nur auf Solarthermie ausgelegte Heizung eines Einfamilienhauses in Österreich nur mit hohem Investitionsaufwand zu realisieren. Eine Solarthermieanlage wird deshalb meistens als Heizungsunterstützung vorgesehen. Durch die von der Solarthermieanlage erzeugte Wärme, wird die Rücklauftemperatur einer Heizung erhöht. Aufgrund dieser Temperaturanhebung in der Heizungsanlage ist die Temperaturdifferenz zwischen der „warmen“ und „kalten“ Seite der Heizung geringer, wodurch die primäre Heizungsanlage weniger Energie bereitstellen muss [6].

In Abbildung 2 ist der prinzipielle Aufbau eines Flachdachkollektors zu sehen.

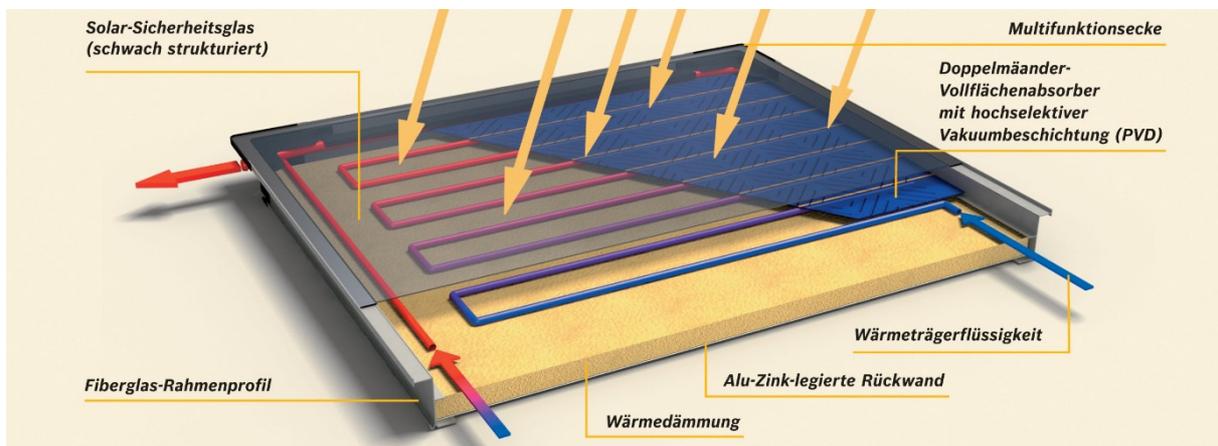


Abbildung 2: Aufbau eines Flachkollektors [7]

Die Solarstrahlung soll vom Absorber (Sonnenkollektor) maximal absorbiert werden und minimal durch Wärmestrahlung wieder abgegeben werden. Als Wärmeträgerflüssigkeit wird meist ein Wasser-Glykol-Gemisch verwendet, da dieses im Winter nicht gefriert. Das Wasser-Glykol-Gemisch fließt durch den Sonnenkollektor, erwärmt sich und gibt anschließend die gespeicherte Wärme entweder in einem Trinkwasserpufferspeicher oder in einem Heizungswasserpuffer wieder ab. Um einerseits Tag- und Nachtschwankung und andererseits bewölkte Tage auszugleichen, ist ein Wärmespeicher mit circa 300 Liter Speichervolumen notwendig [6].

Wird eine Solarthermieanlage nur zur Trinkwassererwärmung verwendet, so wird in Österreich mit 1-1,5 m² Flachkollektorfläche pro Person gerechnet. In einem 4 Personen Haushalt ergibt sich somit eine Flachkollektorfläche von etwa 6 m² [8].

Kosten einer Solarthermieanlage

Die Kosten einer Solarthermieanlage hängen stark von der installierten Kollektorfläche ab. Die Installationskosten $C_{Inst.,SA}$ und die Kosten für den Solarspeicher $C_{SS,SA}$ belaufen sich auf etwa 2700 €. Die Kosten für einen Quadratmeter Kollektorfläche $C_{KF,SA}$ betragen in etwa 300 €. Bei einer Solarthermieanlage mit einer Kollektorfläche A_{SA} von 6 m² ergeben sich Investitionskosten $C_{IK,SA}$ in einer Höhe von circa 4500 € [9].

$$C_{IK,SA} = C_{Inst.,SA} + C_{SS,SA} + C_{KF,SA} \cdot A_{SA} = 2700 \text{ €} + 300 \text{ €/m}^2 \cdot 6 \text{ m}^2 = \underline{\underline{4500 \text{ €}}} \quad (4)$$

A_{SA} ... Installierte Kollektorfläche der Solarthermieanlage
 $C_{IK,SA}$... Investitionskosten der Solarthermieanlage
 $C_{Inst.,SA}$... Installationskosten der Solarthermieanlage
 $C_{KF,SA}$... Kosten für einen Quadratmeter Kollektorfläche
 $C_{SS,SA}$... Kosten für den Solarspeicher

Die Betriebskosten $C_{BK,SA}$ einer Solarthermieanlage pro Jahr liegen bei circa 1,5 %/a der Investitionskosten [8].

Die Betriebskosten $C_{BK,SA}$ pro Jahr werden in Formel (5) berechnet.

$$C_{BK,SA} = C_{IK,SA} \cdot 1,5 \% / a = 4500 \text{ €} \cdot 1,5 \% / a = \underline{\underline{67,5 \text{ €/a}}} \quad (5)$$

$C_{BK,SA}$... Betriebskosten der Solarthermieanlage
 $C_{IK,SA}$... Investitionskosten der Solarthermieanlage

Die Lebensdauer einer Solarthermieanlage T_{SA} liegt bei etwa 25 Jahren. Das Verhältnis der Investitionskosten $C_{IK,SA}$ einer Solarthermieanlage zur Lebensdauer T_{SA} , und den Betriebskosten $C_{BK,SA}$, ergibt die jährlichen Kosten einer Solarthermieanlage.

$$C_{pro \text{ Jahr},SA} = \frac{C_{IK,SA}}{T_{SA}} + C_{BK,SA} = \frac{4500 \text{ €}}{25 \text{ a}} + 67,5 \text{ €/a} = \underline{\underline{247,5 \text{ €/a}}} \quad (6)$$

$C_{BK,SA}$... Betriebskosten der Solarthermieanlage
 $C_{IK,SA}$... Investitionskosten der Solarthermieanlage
 $C_{pro \text{ Jahr},SA}$... Kosten der Solarthermieanlage pro Jahr
 T_{SA} ... Lebensdauer der Solarthermieanlage

Um die Kosten im Simulationsmodell korrekt zu berücksichtigen, werden die Kosten auf ein 15-min-Zeitintervall umgerechnet.

$$C_{pro\ 15\ min,SA} = \frac{C_{pro\ Jahr,SA}}{24 \frac{h}{d} \cdot 4 \frac{15\ min}{h} \cdot 365 \frac{d}{a}} = \frac{247,5 \frac{€}{a}}{35040 \frac{15\ min}{a}} = \underline{\underline{0,0071\ €/15\ min}} \quad (7)$$

$$\cong 0,71\ Cent/15\ min$$

$C_{pro\ 15\ min,SA}$... Kosten der Solarthermieanlage pro 15 min
 $C_{pro\ Jahr,SA}$... Kosten der Solarthermieanlage pro Jahr

3.1.4 Fernwärmeanlage

In vielen Ballungszentren gibt es die Möglichkeit, Fernwärme zu nutzen. Befindet man sich in keinem Ballungsgebiet, gibt es dennoch immer öfters die Möglichkeit, Wärme über ein Leitungsnetz zu beziehen, man spricht dann von Nahwärme. Vergleicht man die Fernwärme mit anderen Wärmeerzeugern, wie zum Beispiel Heizöl oder Erdgas, ist der CO₂ Ausstoß um ein Vielfaches geringer. Viele Städte haben durch den stetig wachsenden Verkehr und die oft ineffizienten Heizungssysteme ein Feinstaubproblem. Dieser Feinstaubgehalt kann durch die Verwendung von Fernwärmeenergie reduziert werden [10].

In Abbildung 3 ist eine schematische Darstellung eines Fernwärmesystems zu sehen. Als Erzeuger ist in dieser Abbildung ein industrieller Produktionsprozess dargestellt.



Abbildung 3: Funktionsprinzip der Fernwärme [11]

In einem Fernwärmenetz wird thermische Energie über ein wärmegeprägtes Leitungssystem zu den Kunden verteilt. Die Temperatur des Wassers in einem Fernwärmenetz beträgt bis zu circa 90 °C. Die in dem Wasser enthaltene Wärmeenergie wird über einen Wärmehaushalt dem hausinternen Wärmesystem (Trinkwasser, Heizung) zugeführt. Da ein Fernwärmenetz viele verschiedene Versorger hat (zum Beispiel Abwärmenutzung von Industriebetrieben), ist eine erhöhte Versorgungssicherheit im Fernwärmenetz gegeben. Häufig verwendete Quellen

sind KWK-Anlagen (circa 65 %), Industriebetriebe, Müllverbrennungsanlagen, Kohlekraftwerke, Hackschnitzelheizungen etc. [10] [12].

Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen sind Kraftwerke, welche elektrische und thermische Energie erzeugen. Durch die Nutzung der thermischen Abwärme werden deutlich höhere Wirkungsgrade erzielt als in konventionellen Kraftwerken. In modernen KWK-Anlagen können Wirkungsgrade bis zu circa 90 % erreicht werden. Wird die Abwärme nicht benützt, reduziert sich der Wirkungsgrad um 30-50 %. Wenn also eine KWK-Anlage verwendet wird, wird der Energieinhalt der primären Energieträger deutlich besser ausgenutzt, das wiederum verringert den CO₂ Ausstoß deutlich. Bei vielen Industriebetrieben entsteht aufgrund unterschiedlicher Prozesse Abwärme (zum Beispiel Hochofen in der Stahlindustrie), welche meist an die Umgebung abgegeben wird. Die thermisch nutzbare Energie der Abwärme geht somit verloren. Wenn ein Industriebetrieb an das Fernwärmenetz angeschlossen ist, kann die sonst an die Umwelt verlorengelassene thermische Energie in das Fernwärmenetz eingespeist werden [10].

Kosten der Fernwärme

Die Investitionskosten einer Fernwärmanlage schwanken je nach Anbieter stark, wodurch es schwierig ist, fixe Investitionskosten anzunehmen. In dieser Masterarbeit werden diese Kosten mit Hilfe eines Rechners der Fernwärmeversorgung St.Leonhard/F.-Ruprechtshofen ermittelt. Der Anschlusswert, ist von drei Faktoren abhängig:

- Beheizte Fläche
- Raumhöhe
- Dämmung

Zur Berechnung wird eine beheizte Fläche von 120 m², eine Raumhöhe von 2,5 m angenommen. Daraus ergibt sich ein Anschlusswert der Fernwärme von 9,6 kWh. Die Investitionskosten $C_{IK,FW}$ belaufen sich dann laut dem Rechner der Fernwärmeversorgung St.Leonhard/F.-Ruprechtshofen auf 9552 €. Weitere Kosten, wie zum Beispiel für laufende Wartung, belaufen sich auf $C_{BK,FW}$ 120 €/a. Somit berechnen sich die jährlichen Fernwärmekosten $C_{pro\ Jahr,FW}$ bei einer Lebensdauer T_{FW} von 30 Jahren wie in Formel (8) [13].

$$C_{pro\ Jahr,FW} = \frac{C_{IK,FW}}{T_{FW}} + C_{BK,FW} = \frac{9552\ \text{€}}{30\ a} + 120\ \text{€/a} = \underline{\underline{438,4\ \text{€/a}}} \quad (8)$$

$C_{BK,FW}$	... Betriebskosten der Fernwärmanlage (ohne Arbeitspreis)
$C_{IK,FW}$	... Investitionskosten der Fernwärmanlage
$C_{pro\ Jahr,FW}$	... Kosten der Fernwärmanlage pro Jahr
T_{FW}	... Lebensdauer der Fernwärmanlage

Um die Kosten im Simulationsmodell korrekt zu berücksichtigen, werden die Kosten auf eine 15-min-Zeitintervall umgerechnet

$$C_{pro\ 15\ min,FW} = \frac{C_{pro\ Jahr,FW}}{24 \frac{h}{d} \cdot 4 \frac{15\ min}{h} \cdot 365 \frac{d}{a}} = \frac{438,4 \frac{\text{€}}{a}}{35040 \frac{15\ min}{a}} = \underline{\underline{0,0125\ \text{€}/15\ min}} \quad (9)$$

$$\cong 1,25\ \text{Cent}/15\ \text{min}$$

$C_{pro\ 15\ min,FW}$... Kosten der Fernwärme pro 15 min
 $C_{pro\ Jahr,FW}$... Kosten der Fernwärme pro Jahr

In diesen Kosten wird der Arbeitspreis - Kosten für die gelieferte thermische Energie - nicht berücksichtigt. Die Arbeitskosten werden in jedem Optimierungsschritt zu den Gesamtkosten dazugerechnet, da die Arbeitskosten nicht immer gleich sind. Weiters ist es möglich, variable Tarife anzunehmen.

3.1.5 Gasheizung

Wird Erdgas oder zunehmend auch Biogas in einem Gaskessel verbrannt, entsteht thermische Energie. Diese thermische Energie kann verwendet werden, um das Trinkwasser und die Räume zu heizen. In Abbildung 4 ist das Funktionsprinzip eines Gas-Brennwertkessels dargestellt.

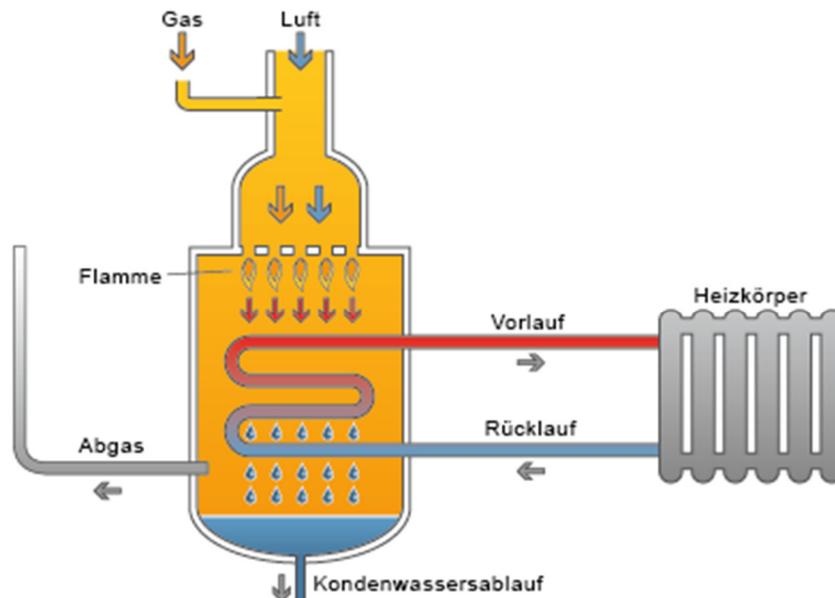


Abbildung 4: Funktionsprinzip einer Gasheizung [14]

Das bei der Verbrennung entstehende Abgas wird mit Hilfe des Rücklaufwassers abgekühlt. Der im Abgas enthaltene Wasserdampf wird dabei auskondensiert. Damit ein guter Wirkungsgrad erreicht wird, soll die Wasserrücklauftemperatur unter 50 °C sein. Das bereits vorgewärmte Wasser im Heizungssystem wird in der Brennkammer auf die gewünschte

Vorlaufemperatur erhitzt. Moderne Gaskessel mit Brennwerttechnik erreichen einen Nutzungsgrad von über 100%. Der Wirkungsgrad von über 100 % ist möglich, da sich dieser auf den Heizwert (maximal nutzbare Wärmemenge ohne Kondensationswärme des Abgases) und nicht auf den Brennwert (maximal nutzbare Wärmemenge mit Kondensation des Abgases) des Brennstoffes bezieht. Die CO₂ Emissionen sind im Vergleich zu einer Ölheizung deutlich geringer, jedoch nicht Null, wie zum Beispiel bei einer Wärmepumpe bei 100 % Ökostrom [14].

Kosten einer Gasheizung

Als Investitionskosten $C_{IK,Gas}$ einer Gasheizung werden 5000 € angenommen, sowie eine Lebensdauer T_{Gas} von circa 20 Jahren. Die jährlichen Betriebskosten $C_{BK,Gas}$ einer Gasheizung (ohne Brennstoffkosten) liegen bei circa 290 €/a. Diese Betriebskosten $C_{BK,Gas}$ beinhalten Stromkosten, Wartung und den Schornsteinfeger. Die Arbeitskosten werden wie bei der Fernwärme in jedem Optimierungsschritt dazugerechnet, somit ist es möglich, alle 15 min einen anderen Gaspreis festzulegen [15].

In der nachfolgenden Formel (10) werden die jährlichen Kosten einer Gasheizung berechnet.

$$C_{pro\ Jahr,Gas} = \frac{C_{IK,Gas}}{T_{Gas}} + C_{BK,Gas} = \frac{5000\ €}{20\ a} + 290\ €/a = \underline{\underline{540\ €/a}} \quad (10)$$

$C_{BK,Gas}$	... Betriebskosten der Gasheizung(ohne Gasverbrauch)
$C_{IK,Gas}$	... Investitionskosten der Gasheizung
$C_{pro\ Jahr,Gas}$	... Kosten der Gasheizung pro Jahr
T_{Gas}	... Lebensdauer der Gasheizung

Um die Kosten im Simulationsmodell korrekt zu berücksichtigen, werden die Kosten auf ein 15-min-Zeitintervall umgerechnet.

$$C_{pro\ 15\ min,Gas} = \frac{C_{pro\ Jahr,Gas}}{24 \frac{h}{d} \cdot 4 \frac{15\ min}{h} \cdot 365 \frac{d}{a}} = \frac{540 \frac{€}{a}}{35040 \frac{15\ min}{a}} = \underline{\underline{0,0154\ €/15\ min}} \quad (11)$$

$$\cong 1,54\ Cent/15\ min$$

$C_{pro\ Jahr,Gas}$	... Kosten der Gasheizung pro Jahr
$C_{pro\ 15\ min,Gas}$	... Kosten der Fernwärme pro 15 min

3.1.6 Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe ermöglicht das Anheben der Temperatur von einem geringen Temperaturniveau (zum Beispiel Umgebungsluft) auf ein höheres Temperaturniveau, unter dem Einsatz von elektrischer Energie (Kompressor). Durch das Anheben des Temperaturniveaus ist das Beheizen von Trinkwasser und Raumwärme möglich. In einer Wärmepumpe durchläuft ein Kühlmittel einen Kreislauf, wobei dieser Kreislauf in vier wesentliche Schritte aufgeteilt ist. Das Funktionsprinzip einer Wärmepumpe ist in Abbildung 5 dargestellt [6].

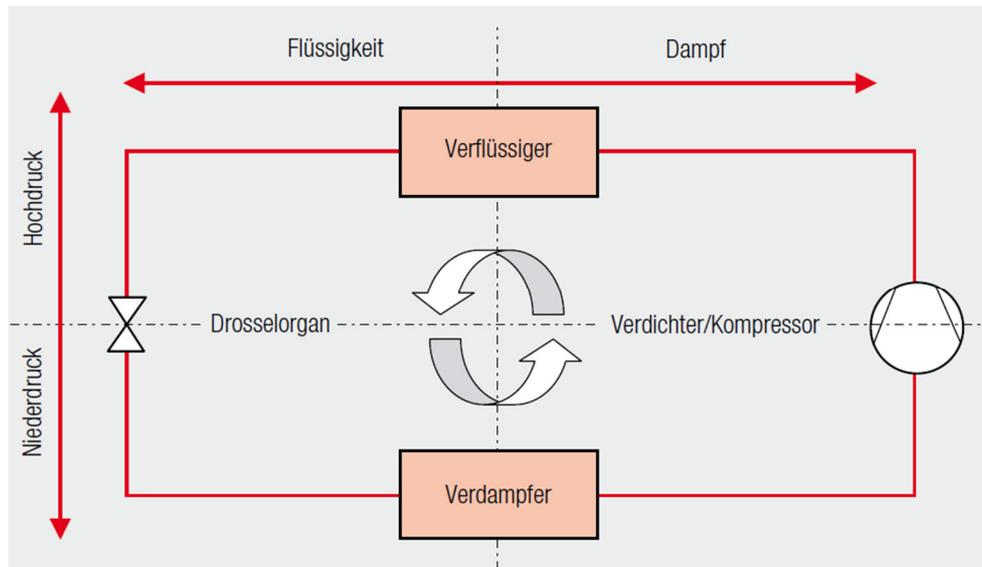


Abbildung 5: Funktionsprinzip einer Wärmepumpe [16]

Im ersten Schritt nimmt das flüssige Kältemittel Wärme aus der Umgebung auf. Das Kältemittel hat einen sehr niedrigen Siedepunkt und verdampft aufgrund der Wärmeaufnahme. Das nun gasförmige Kältemittel wird mit einem Kompressor verdichtet, wodurch die Temperatur des Kältemittels stark ansteigt. Im nächsten Schritt wird das gasförmige Kältemittel durch einen Kondensator (Verflüssiger) geführt, entspannt sich und wird wieder flüssig. Bei dieser sogenannten isothermen Kondensation wird Wärme abgegeben. Diese Wärme kann zum Heizen von Trinkwasser oder Räumen verwendet werden. Im letzten Schritt durchläuft das Kältemittel ein Expansionsventil, wodurch das Kältemittel wieder den Ausgangsdruck erreicht und anschließend durch den Verdampfer fließt, wo es erneut die Umgebungswärme aufnimmt [6].

Als Wärmequelle für eine Wärmepumpe kann z.B. Umgebungsluft oder Erdwärme verwendet werden. Der Vorteil beim Verwenden von Erdwärme besteht darin, dass die Temperatur das ganze Jahr nahezu konstant ist. Wird Umgebungsluft verwendet, schwankt die Temperatur je nach Jahreszeit. Der wichtigste Kennwert einer Wärmepumpe ist der COP-Wert (Coefficient of Performance). Dieser gibt das Verhältnis zwischen Nutzwärme und Kompressorantriebsleistung an (siehe Formel (12)) [6].

$$COP = \frac{Q_{ab}}{W_{el}} \Rightarrow Q_{ab} = COP \cdot W_{el} \quad (12)$$

COP ... Coefficient of Performance
 Q_{ab} ... Wärmeenergie von der Wärmepumpe
 W_{el} ... Benötigte elektrische Energie der

Der COP-Wert hängt stark von der Temperatur der Wärmequelle (zum Beispiel Umgebungsluft) ab. Je kleiner diese Temperatur ist, desto geringer ist der COP-Wert. Luft-Luft-Wärmepumpen (Umgebungsluft als Wärmequelle), erreichen einen COP-Wert von circa 4. Da jedoch die Temperatur der Außenluft/Umgebungsluft Schwankungen unterliegt, variiert der COP-Wert dieser Anlagen stark. Verwendet man eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe (Erdwärme als Wärmequelle), wird ein COP-Wert von 4-7 erreicht. Es ist also deutlich zu erkennen, dass Wasser-Wasser-Wärmepumpen deutlich energieeffizienter arbeiten als Luft-Luft-Wärmepumpen. Außerdem ist der COP-Wert aufgrund der relativ konstanten Temperatur der Erdwärme nicht so starken Schwankungen ausgesetzt [6].

Kosten einer Wärmepumpe

Die Investitionskosten einer Wärmepumpe sind stark von der verwendeten Technologie abhängig (Luft/Luft, Luft/Wasser, Wasser/Luft oder Wasser/Wasser). Für das Simulationsmodell werden Investitionskosten $C_{IK,WP}$ in Höhe von 15000 € angenommen. Die Betriebskosten einer Wärmepumpe $C_{BK,WP}$ betragen circa 100 € pro Jahr, wobei diese Kosten den Strombedarf nicht beinhalten [17] [18].

Bei einer Lebensdauer von 25 Jahren ergeben sich die Kosten einer Wärmepumpe pro Jahr nach Formel (13).

$$C_{pro\ Jahr,WP} = \frac{C_{IK,WP}}{T_{WP}} + C_{BK,WP} = \frac{15000\ €}{25\ a} + 100\ €/a = \underline{\underline{700\ €/a}} \quad (13)$$

$C_{BK,WP}$... Betriebskosten der Wärmepumpe ohne Stromkosten)
 $C_{IK,WP}$... Investitionskosten der Wärmepumpe
 $C_{pro\ Jahr,WP}$... Kosten der Wärmepumpe pro Jahr
 T_{WP} ... Lebensdauer der Wärmepumpe

Um die Kosten im Simulationsmodell korrekt zu berücksichtigen, werden die Kosten auf ein 15-min-Zeitintervall umgerechnet.

$$C_{pro\ 15\ min,WP} = \frac{C_{pro\ Jahr,WP}}{24\ \frac{h}{d} \cdot 4\ \frac{15\ min}{h} \cdot 365\ \frac{d}{a}} = \frac{700\ \frac{€}{a}}{35040\ \frac{15\ min}{a}} = \underline{\underline{0,02\ €/15\ min}} \quad (14)$$

$\cong 2\ Cent/15\ min$

$C_{pro\ 15\ min,WP}$... Kosten der Wärmepumpe pro 15 min
 $C_{pro\ Jahr,WP}$... Kosten der Wärmepumpe pro Jahr

3.1.7 Klimaanlage

Klimaanlagen dienen zur Erzeugung bzw. Aufrechterhaltung eines angenehmen Raumklimas. Wobei mit einer Klimaanlage nicht nur das Kühlen eines Gebäudes möglich ist, sondern auch das Heizen, Befeuchten, Filtern und Austauschen der Luft. Die Funktionsweise einer Klimaanlage ähnelt der einer Wärmepumpe (siehe Abbildung 5). Das gasförmige Kältemittel wird in einem Kompressor verdichtet, wodurch die Temperatur stark ansteigt. Das verdichtete gasförmige Kühlmittel wird durch die Außenluft abgekühlt und wieder flüssig. Anschließend wird das Kühlmittel über ein Expansionsventil zum Verdampfer weitergeleitet. Die Luft, welche gekühlt werden soll, wird über den Verdampfer geblasen und kühlt somit ab. Das Kühlmittel verdampft wieder und wird vom Kompressor wieder verdichtet [6] [19].

Kosten einer Klimaanlage

Die Investitionskosten $C_{IK,KA}$ einer Klimaanlage schwanken je nach Größe der Klimaanlage stark, daher ist es schwierig, diese Kosten im Simulationsmodell zu berücksichtigen. Die Investitionskosten $C_{IK,KA}$ werden im Simulationsmodell mit 2000 € angenommen, diese Kosten beinhalten auch die Montagekosten nicht aber die Stromkosten. Die Lebensdauer T_{KA} der Klimaanlage wird mit 15 Jahren angenommen [20].

Die jährlichen Kosten der Klimaanlage werden in Formel (15) berechnet.

$$C_{pro\ Jahr,KA} = \frac{C_{IK,KA}}{T_{KA}} = \frac{2000\ \text{€}}{15\ a} = \underline{\underline{133,3\ \text{€/a}}} \quad (15)$$

$C_{IK,KA}$	... Investitionskosten der Klimaanlage
$C_{pro\ Jahr,KA}$	... Kosten der Klimaanlage pro Jahr
T_{KA}	... Lebensdauer der Klimaanlage

Um die Kosten im Simulationsmodell korrekt zu berücksichtigen, werden die Kosten auf ein 15 min-Zeitintervall umgerechnet.

$$C_{pro\ 15\ min,KA} = \frac{C_{pro\ Jahr,KA}}{24 \frac{h}{d} \cdot 4 \frac{15\ min}{h} \cdot 365 \frac{d}{a}} = \frac{133,3 \frac{\text{€}}{a}}{35040 \frac{15\ min}{a}} = \underline{\underline{0,0038\ \text{€/15 min}}} \quad (16)$$

$$\cong 0,38\ \text{Cent}/15\ min$$

$C_{pro\ 15\ min,KA}$	... Kosten der Wärmepumpe pro 15 min
$C_{pro\ Jahr,KA}$	... Kosten der Klimaanlage pro Jahr

3.2 Speicher

Die Erzeugung elektrischer (Photovoltaik) sowie thermischer (Solarthermieanlage) Energie ist dargebotsabhängig, wodurch Bedarf und Erzeugung oft zeitlich verschieden sind. Um diese Zeitdifferenz zu überbrücken, können Speicher verwendet werden. Mit Hilfe von Speichern ist es also möglich, die erzeugte Energie zu einem späteren Zeitpunkt zu verbrauchen. Grundsätzlich wird in dieser Masterarbeit zwischen elektrischen und thermischen Speichern unterschieden.

3.2.1 Elektrischer Speicher

Ein elektrischer Speicher ermöglicht das Speichern elektrischer Energie, um diese zu einem späteren Zeitpunkt zu nutzen. Es gibt die Möglichkeit, elektrische Energie direkt in einer Spule oder einem Kondensator zu speichern. Diese direkte Energiespeicherung ist sehr effizient, besitzt jedoch eine sehr geringe Speicherkapazität (0,1 – 10 Wh/kg) und ist sehr teuer (circa 10.000 €/kWh). Aus diesem Grund ist diese Speichertechnologie in einem dezentralen Energiesystem zurzeit nicht rentabel. Für die Speicherung in einem dezentralen Energiesystem eignen sich elektrochemische Speicher (zum Beispiel Lithium-Batterien), in denen chemische Reaktionen zur Speicherung beziehungsweise Entladung erfolgen. Lithium-Batterien haben eine Speicherkapazität von 110-190 Wh/kg und kosten circa 170 – 600 €/kWh. Die Kosten von elektrochemischen Speichern sind also deutlich geringer als die von direkten elektrischen Energiespeichern (Spulen, Kondensator) [1].

Der elektrische Speicher in Kombination mit einer Photovoltaikanlage macht Sinn, wenn dieser nicht zu teuer ist. Vergleicht man das Standardlastprofil eines Haushalts mit dem durchschnittlichen Erzeugungslastprofil einer Photovoltaikanlage, erkennt man die Sinnhaftigkeit (eigentliche Notwendigkeit) des elektrischen Speichers. Die nach Süden ausgerichtete Photovoltaikanlage produziert zur Mittagszeit die meiste Energie. Ein durchschnittlicher Haushalt weist drei Lastspitzen an einem Wochentag auf (Abbildung 14). Die erste Lastspitze ist früh am Morgen, zu dieser Tageszeit produziert die Photovoltaikanlage noch wenig elektrische Energie. Die zweite Lastspitze tritt zur Mittagszeit auf und kann meistens von der Photovoltaikanlage gedeckt werden, da dort auch ein Maximum bei der Erzeugung auftritt (Ausrichtung Süd). Die dritte Lastspitze tritt am Abend auf. Zu diesem Zeitpunkt produziert die Photovoltaikanlage nur noch wenig bzw. keine Energie mehr. Wenn kein Speicher verwendet wird, muss elektrische Energie tagsüber verkauft werden und morgens beziehungsweise abends gekauft werden. Die Kosten für den Kauf von elektrischer Energie (0,2 €/kWh) sind viel höher als der Gewinn für die verkaufte elektrische Energie (0,035 €/kWh). Wird hingegen ein elektrischer Speicher verwendet, kann, vorausgesetzt der

Speicher ist optimal dimensioniert, die überschüssige erzeugte elektrische Energie zu einem späteren Zeitpunkt selbst verwendet werden.

Kosten elektrischer Speicher

Die Investitionskosten eines elektrischen Speichers $C_{IK,el.SP}$ schwanken je nach Größe und Technologie stark. Für das Simulationsmodell sind die Kosten des elektrischen Speichers bezogen auf eine Kilowattstunde (kWh) $C_{kWh,el.SP}$ von Interesse. Damit diese Kosten berechnet werden können, werden die Investitionskosten $C_{IK,el.SP}$, der Speicherkapazität $W_{max,el.SP}$, die Entladetiefe DoD und die Vollladezyklen VLZ des Speichers benötigt. Anhand eines Beispiels wird die Berechnung dieser Kosten $C_{kWh,el.SP}$ in Formel (17) gezeigt.

$$C_{kWh,el.SP} = \frac{C_{IK,el.SP}}{W_{max,el.SP} \cdot DoD \cdot VLZ} = \frac{6000 \text{ €}}{10 \text{ kWh} \cdot 0,8 \cdot 5000} = \underline{\underline{0,15 \text{ €/kWh}}} \quad (17)$$

$C_{IK,el.SP}$	... Investitionskosten des elektrischen Speichers
$C_{kWh,el.SP}$	... Kosten des elektrischen Speichers pro kWh
DoD	... Entladetiefe des elektrischen Speichers
VLZ	... Vollladezyklen des elektrischen Speichers
$W_{max,el.SP}$	... maximale Speicherkapazität des elektrischen Speichers

3.2.2 Thermische Speicher

Thermische Energiespeicher erhöhen ihren Energiegehalt durch Energiezufuhr und speichern diesen Energiegehalt über einen bestimmten Zeitraum ab. Die Speicherverluste sollen dabei so klein wie möglich sein. Wird thermische Energie benötigt, geben die thermischen Speicher die gespeicherte Energie wieder ab. Es gibt verschiedene Möglichkeiten thermische Energie zu speichern. Es wird zwischen sensiblen, latenten und thermochemischen Speichertechnologien unterschieden. In Abbildung 6 ist der Unterschied zwischen einem sensiblen (blaue Kennlinie) und einem latenten Speicher dargestellt, wobei PCM 1 (Phase Change Material) und PCM 2 zwei unterschiedliche Speichermaterialien darstellen.

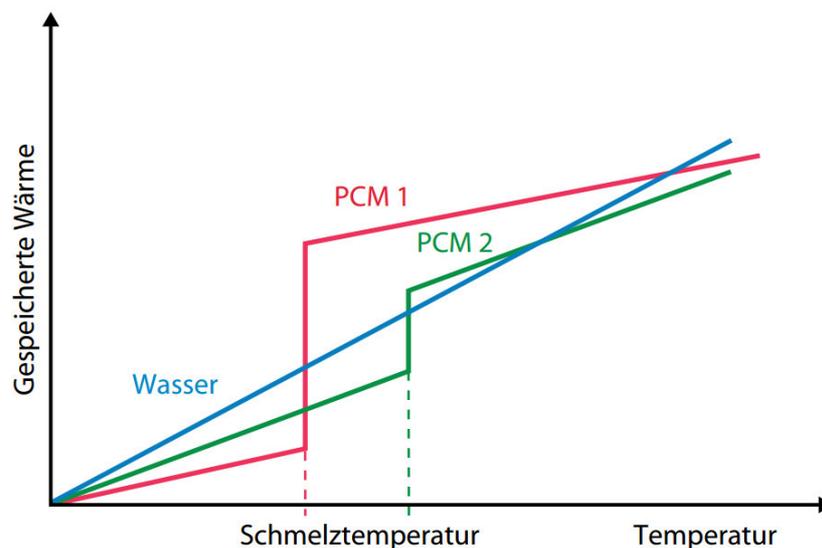


Abbildung 6: Gespeicherte Wärme in Abhängigkeit der Temperatur sensibler und latenter Wärmespeicher [1]

Bei sensiblen Speichern (blaue Kennlinie) ändert sich die Temperatur fühlbar. Wie viel Energie gespeichert werden kann, hängt von der spezifischen Wärmekapazität des verwendeten Speicherstoffes ab. Bei diesen Speichern ist die Wärmedämmung sehr wichtig, da eine große Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebung auftritt. Sehr oft wird aufgrund der großen spezifischen Wärmekapazität, Wasser als Speichermedium verwendet. Latente Wärmespeicher speichern zusätzlich zur sensiblen Wärme (fühlbare Wärme) auch thermische Energie, welche für einen Phasenwechsel des verwendeten Speichermediums notwendig ist. Die Temperatur bleibt während des Phasenübergangs des Speichermediums konstant. Meistens wird der Phasenübergang von fest auf flüssig verwendet. Die Speicherkapazität dieser Speicher ist um einiges größer als bei sensiblen Speichern [1].

In thermochemischen Wärmespeichern erfolgen chemisch reversible Reaktionen. Das Speichermedium (Reaktionsprodukt) in thermochemischen Wärmespeichern wird durch Zufuhr thermischer Energie getrennt, wird das getrennte Speichermedium wieder zusammengeführt, wird die gespeicherte thermische Energie frei. Die Energiedichte dieser Speicher ist sehr hoch, da diese Speicher jedoch noch nicht weit erforscht sind, sind die Speicher für eine praktische Anwendung noch nicht geeignet [1].

In dieser Masterarbeit wird zwischen Wärmespeichern und Kältespeichern unterschieden. Die Wärmespeicher werden in dieser Masterarbeit in zwei verschiedene Typen unterteilt. Der erste Speichertyp ist der sogenannte thermische Kurzzeitspeicher. Dieser hat die Aufgabe kurzzeitige thermische Schwankungen auszugleichen. Zwischen Lade- und Entladevorgang liegt ein Zeitraum von Stunden bis wenigen Tagen. Der zweite Speichertyp ist der thermische Langzeitspeicher. Dieser soll langfristige thermische Schwankungen ausgleichen. Der Langzeitspeicher wird für Zeiträume von einigen Wochen bis hin zu einem Jahr eingesetzt. Der im dezentralen Energiesystem verwendete Kältespeicher hat die Aufgabe, kurzzeitige thermische Schwankungen auszugleichen [1].

Die thermische Erzeugung einer Solarthermieanlage ist im Sommer um einiges größer als im Winter. Jedoch wird im Winter mehr thermische Energie als im Sommer benötigt. Aus diesem Grund kann es durchaus sinnvoll sein einen thermischen Langzeitspeicher zu verwenden. Grundsätzlich kann man sagen, dass ein thermischer Langzeitspeicher meist im Sommer geladen und im Winter entladen wird [1].

3.2.2.1 Thermischer Kurzzeitspeicher

Die Erzeugung der Solaranlage weist denselben Verlauf wie jene der Photovoltaikanlage auf. Das bedeutet also, dass mittags die meiste thermische Energie erzeugt wird. Der Großteil des Warmwassers wird hingegen morgens beziehungsweise abends benötigt. Deshalb ist die Verwendung eines thermischen Kurzzeitspeichers sinnvoll. Die Größe des thermischen Kurzzeitspeichers hängt stark von der Anzahl der Bewohner eines Haushalts ab. Je mehr Bewohner in einem Gebäude oder in einer Wohnung leben, desto größer ist der Warmwasserbedarf, wodurch sich auch die Speichergröße vergrößert.

Kosten eines thermischen Kurzzeitspeichers

Die Investitionskosten inklusive der Installationskosten eines 300-Liter-Warmwasserspeichers werden mit $C_{IK,th.KS} = 800 \text{ €}$ sowie die Lebensdauer $T_{th.KS}$ mit 20 Jahren angenommen.

Daraus ergeben sich für einen thermischen Kurzzeitspeicher jährliche Kosten von 40 € (siehe Formel (18)).

$$C_{pro\ Jahr,th.KS} = \frac{C_{IK,th.KS}}{T_{th.KS}} = \frac{800\ \text{€}}{20\ a} = \underline{\underline{40\ \text{€/a}}} \quad (18)$$

- $C_{IK,th.KS}$... Investitionskosten des thermischen Kurzzeitspeichers
- $C_{pro\ Jahr,th.KS}$... Kosten des thermischen Kurzzeitspeichers pro Jahr
- $T_{th.KS}$... Lebensdauer des thermischen Kurzzeitspeichers

Um die Kosten im Simulationsmodell korrekt zu berücksichtigen, werden die Kosten auf ein 15-min-Zeitintervall umgerechnet.

$$C_{pro\ 15\ min,th.KS} = \frac{C_{pro\ Jahr,th.KS}}{24\ \frac{h}{d} \cdot 4\ \frac{15\ min}{h} \cdot 365\ \frac{d}{a}} = \frac{40\ \frac{\text{€}}{a}}{35040\ \frac{15\ min}{a}} = \underline{\underline{0,00114\ \text{€/15 min}}} \quad (19)$$

$\cong 0,11\ \text{Cent/15 min}$

- $C_{pro\ 15\ min,th.KS}$... Kosten thermischen Kurzzeitspeichers pro 15 min
- $C_{pro\ Jahr,th.KS}$... Kosten des thermischen Kurzzeitspeichers pro Jahr

3.2.2.2 Thermischer Langzeitspeicher

Wie zuvor erwähnt, ist die erzeugte thermische Energie einer Solaranlage im Sommer größer als im Winter. Das Problem dabei ist, dass der Verbrauch von thermischer Energie im Winter größer ist als im Sommer. In Abbildung 7 ist der Kreislauf der saisonalen Wärmespeicherung dargestellt [1].

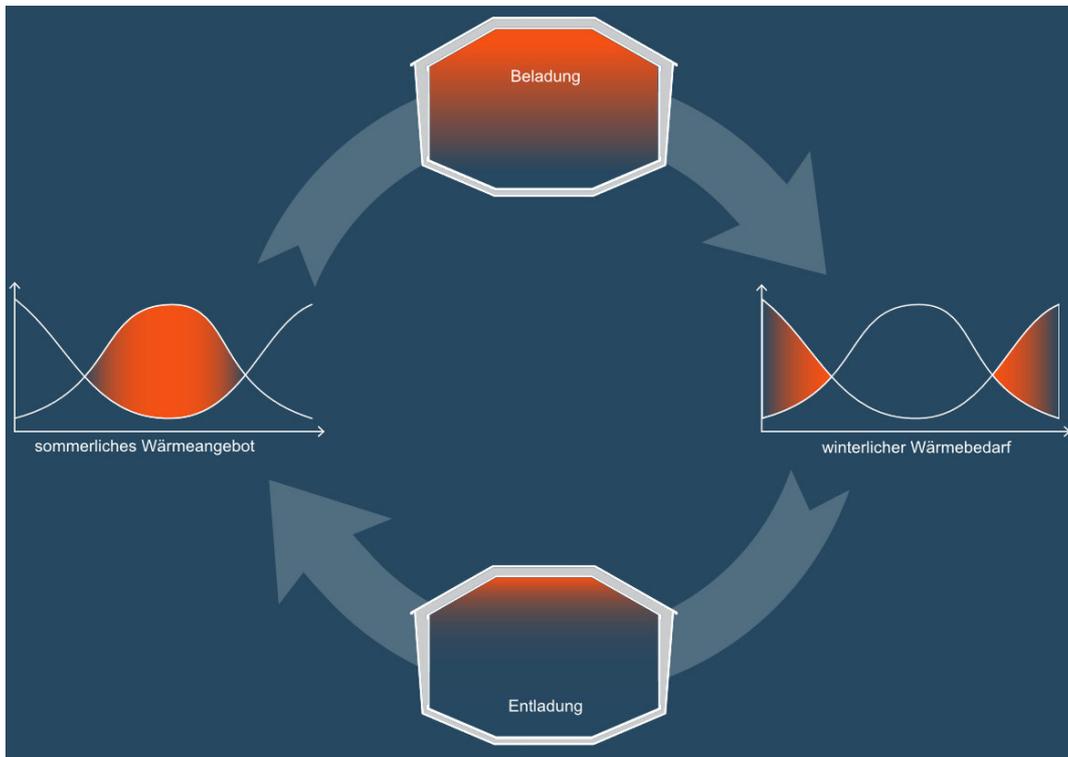


Abbildung 7: Kreislauf der saisonalen Wärmespeicherung [21]

Die Aufgabe eines thermischen Langzeitspeichers besteht darin, diese Schwankung auszugleichen. Das bedeutet, dass im Sommer der Speicher gefüllt wird, um im Winter die gespeicherte thermische Energie wieder abzugeben. Die Isolierung ist bei diesen Speichern sehr wichtig, da die Verluste möglichst gering sein müssen, damit so ein Speicher rentabel ist. Sind die Verluste des thermischen Langzeitspeichers zu groß, kann die thermische Energie nicht lang genug gespeichert werden. Das Problem der thermischen Langzeitspeicher besteht aktuell darin, dass der Wirkungsgrad noch relativ unbekannt ist [1].

Es gibt verschiedene Möglichkeiten einen thermischen Langzeitspeicher zu realisieren (zum Beispiel Heißwasserspeicher in Erdbecken mit schwimmender Abdeckung). In Abbildung 8 ist ein Heißwasserspeicher in Erdbecken mit schwimmender Abdeckung dargestellt.

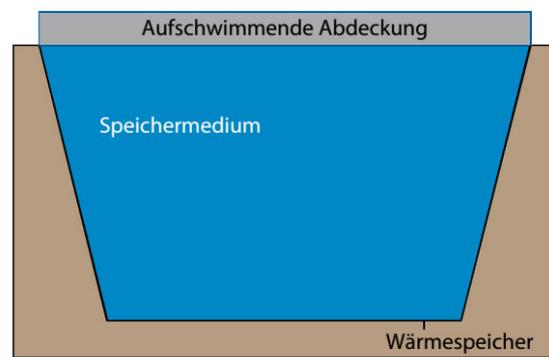


Abbildung 8: Heißwasserspeicher in Erdbecken [1]

Als Speichermedium wird Wasser verwendet. Ein Heißwasserspeicher mit einer aufschwimmenden Abdeckung kann nicht befahren werden, ist jedoch günstiger als ein Heißwasserspeicher mit einer selbsttragenden Abdeckung [1].

Kosten des thermischen Langzeitspeichers

Die Kosten thermischer Langzeitspeicher hängen stark von der verwendeten Technologie (zum Beispiel Erdsondenspeicher, Erdbecken) ab. Die Investitionskosten thermischer Langzeitspeicher sind aktuell noch unbekannt. Es ist daher schwierig, Investitionskosten thermischer Langzeitspeicher für das Simulationsmodell anzugeben. Bei welchen Kosten und Wirkungsgrad sich ein thermischer Langzeitspeicher rentiert, wird mit Hilfe des Simulationsmodells ermittelt (siehe Kapitel 6.3).

3.2.2.3 Kältespeicher

Im Kältespeicher wird im Gegensatz zum Wärmespeicher Kälteenergie gespeichert. Die Speichertemperatur variiert zwischen 5 und 18 °C, wenn der Speicher für die Klimatisierung und Kühlung des Raumklimas verwendet wird. Es werden dieselben Speichertechnologien wie beim Wärmespeicher verwendet [1].

Kosten eines Kältespeichers

Für einen Kältespeicher werden im Simulationsmodell dieselben Investitionskosten wie für einen thermischen Kurzzeitspeicher angenommen. Die Investitionskosten inklusive der Installationskosten eines 300 Liter Kältespeichers werden mit $C_{IK,th.Kalt} = 800 \text{ €}$ sowie die Lebensdauer $T_{th,Kalt}$ wird mit 20 Jahren angenommen. Daraus ergeben sich für einen Kältespeicher die jährlichen Kosten von

$$C_{pro\ Jahr,th.Kalt} = \frac{C_{IK,th.Kalt}}{T_{th,Kalt}} = \frac{800 \text{ €}}{20 \text{ a}} = \underline{\underline{40 \text{ €/a}}} \quad (20)$$

$C_{IK,th.Kalt}$	... Investitionskosten des Kältespeichers
$C_{pro\ Jahr,th.Kalt}$	... Kosten des Kältespeichers pro Jahr
$T_{th,Kalt}$	... Lebensdauer des Kältespeichers

Um die Kosten im Simulationsmodell korrekt zu berücksichtigen, werden die Kosten auf ein 15-min-Zeitintervall umgerechnet.

$$C_{pro\ 15\ min,th.Kalt} = \frac{C_{pro\ Jahr,th.Kalt}}{24 \frac{h}{d} \cdot 4 \frac{15\ min}{h} \cdot 365 \frac{d}{a}} = \frac{40 \frac{\text{€}}{a}}{35040 \frac{15\ min}{a}} = \underline{\underline{0,0011 \text{ €/15 min}}} \quad (21)$$

$$\cong 0,11 \text{ Cent/15 min}$$

$C_{pro\ 15\ min,th.Kalt}$	... Kosten des Kältespeichers pro 15 min
$C_{pro\ Jahr,th.Kalt}$	... Kosten des Kältespeichers pro Jahr

3.3 Verbraucher

Die in einem Haushalt wesentlichen zwei Verbrauchertypen sind die elektrischen Verbraucher und die thermischen Verbraucher. Die thermischen Verbraucher werden in Warmwasserbedarf und Raumklima aufgeteilt, wobei Warmwasser nur Wärmeenergie und das Raumklima zusätzlich zur Wärme- auch Kälteenergie benötigt.

3.3.1 Elektrischer Verbraucher

Alle elektrischen Verbraucher in einem Haushalt werden zu einem Verbraucher zusammengefasst. Um den elektrischen Verbrauch eines Haushalts in dem Modell darzustellen wird ein H0-Standardlastprofil herangezogen. Dieses Standardlastprofil bildet den durchschnittlichen Verbrauch eines Haushalts ab [22].

3.3.2 Thermische Verbraucher

Die thermischen Verbraucher eines Haushalts werden in die zwei Verbrauchertypen, Raumklima und Warmwasser, unterteilt.

3.3.2.1 Raumklima

Der Begriff Raumklima umfasst nicht nur das thermische Klima sondern auch die Raumluftqualität. Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit sind wesentliche Wohlfühlfaktoren für den Menschen. Die wesentliche Aufgabe besteht also darin, eine angenehme Umgebung für den Menschen zu schaffen. Eine wichtige Rolle dabei spielt auch die Frischluftzufuhr. Die Raumluft soll ständig mit schadstofffreier Luft belüftet werden. Die optimale Raumtemperatur liegt zwischen 19 °C bis 22 °C. Die Luftfeuchtigkeit sollte zwischen 40 % und 60 % liegen [23].

3.3.2.2 Warmwasser

Der Warmwasserbedarf hängt sehr stark von den Gewohnheiten der Bewohner ab. Der größte Verbrauch entsteht beim Baden oder Duschen. Pro Person und Tag kann mit circa 40 Liter Warmwasserbedarf gerechnet werden [24].

4 Modellbildung dezentrales Energiesystem

Als Grundlage für das Simulationsmodell (Matlab) wird ein schematisches Modell des dezentralen Energiesystems erstellt (elektrischer und thermischer Teil eines Haushalts). Aus diesem schematischen Modell, werden anschließend die Systemgleichungen für das Simulationsmodell formuliert.

4.1 Schematisches Modell

Das schematische Modell umfasst die elektrischen und thermischen Energieflüsse eines Haushalts. Um ein möglichst universelles Modell zu schaffen, ist es notwendig alle relevanten Komponenten des dezentralen Energiesystems zu berücksichtigen. Zum besseren Verständnis, wird das schematische Modell in folgende drei Teile aufgeteilt:

- Elektrischer Stromkreis
- Wärmekreis
- Kältekreis

In Abbildung 9 ist der **elektrische Stromkreis** des schematischen Modells dargestellt.

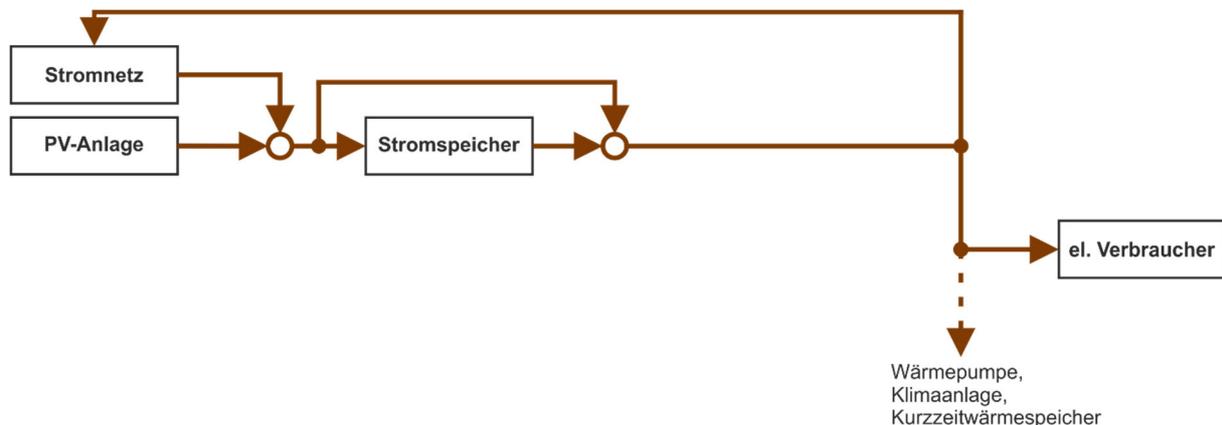


Abbildung 9: Schematisches Modell des elektrischen Stromkreises

Die Erzeuger und Energiequellen, die in den elektrischen Teil des Systems einspeisen befinden sich in Abbildung 9 auf der linken Seite. Der elektrische Speicher (Stromspeicher) ermöglicht das Speichern elektrischer Energie, befindet sich kein elektrischer Speicher im dezentralen Energiesystem, ändern sich die Systemgleichungen welche das Simulationsmodell beschreiben geringfügig. (siehe Kapitel 4.4).

Zu den Verbrauchern der elektrischen Energie zählen Wärmepumpe, Kurzzeitwärmespeicher, Klimaanlage sowie elektrische Verbraucher im Haushalt (el. Verbraucher), des Weiteren besteht die Möglichkeit, elektrische Energie in das elektrische Netz zu verkaufen.

Die Wärmepumpe, die Klimaanlage und der thermische Kurzzeitspeicher sind in Abbildung 9 nicht dargestellt, diese Elemente werden erst im Gesamtsystem sichtbar berücksichtigt.

In nachfolgender Abbildung 10 ist der **Wärmekreis** des schematischen Modells dargestellt.

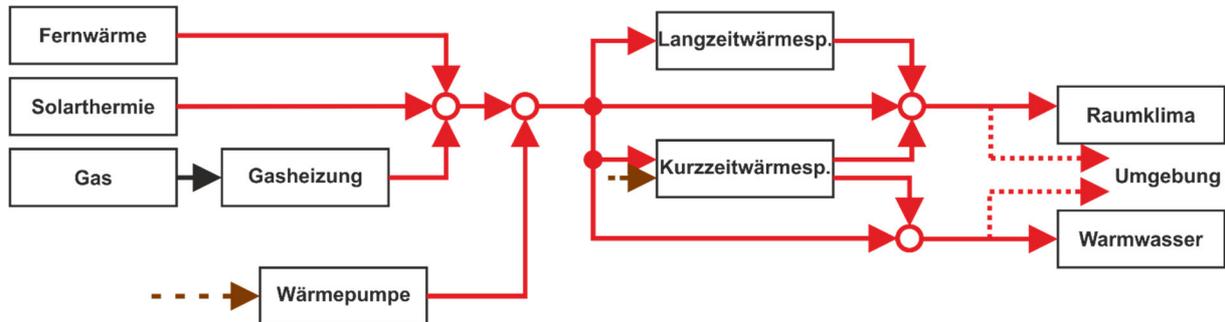


Abbildung 10: Schematisches Modell des Wärmekreises

Im schematischen Modell sind fünf unterschiedliche Wärmequellen vorgesehen (Fernwärme, Solarthermieanlage, Gasheizung, Heizelement im thermischen Kurzzeitspeicher und Wärmepumpe), davon können alle Wärmequellen, bis auf die Solarthermieanlage, je nach Bedarf jederzeit thermische Energie in den Wärmekreis einspeisen. Welche Wärmequelle verwendet wird, um die benötigte thermische Energie zu erzeugen entscheidet die Optimierung. Die Solarthermieanlage ist dargebotsabhängig und kann daher nicht von der Optimierung gesteuert werden. Aufgrund der Dargebotsabhängigkeit der Solarthermieanlage, ist es nicht möglich (ohne Speicher) das thermische System einzig mit der Solarthermieanlage zu versorgen.

Zum Speichern thermischer Energie, werden im schematischen Modell zwei unterschiedliche Speicherarten vorgesehen (thermischer Kurzzeitspeicher, thermischer Langzeitspeicher). Der thermische Kurzzeitspeicher (Kurzzeitwärmespeicher), hat im Vergleich zum thermischen Langzeitspeicher (Langzeitwärmespeicher) eine kleine Speicherkapazität. Die thermische Energie wird im betrachteten Einfamilienhaushalt für die Erwärmung des Trinkwassers und des Raumklimas benötigt. Der thermische Wärmebedarf des Raumklimas kann direkt von den thermischen Quellen, oder von einem der beiden Speicher gedeckt werden, vorausgesetzt die Speicher sind geladen. Das Warmwasser kann entweder vom thermischen Kurzzeitspeicher oder direkt von den thermischen Quellen gespeist werden. Die Temperatur des thermischen Langzeitspeichers ist zu gering, um das Warmwasser hoch genug (circa 55 °C) zu erwärmen, weshalb dieser nicht beim Warmwasser berücksichtigt wird.

Erzeugt eine Solarthermieanlage thermische Energie, die im dezentralen Energiesystem nicht verbraucht werden kann, muss die überschüssige erzeugte thermische Energie, an die Umgebung abgegeben werden, damit die Optimierung in jedem Zeitschritt eine Lösung findet. Die Abgabe, der zu viel erzeugten thermischen Energie, ist im schematischen Modell (Abbildung 10) mittels rot-strichlierten Pfeilen dargestellt.

Die Umwandlung der elektrischen Energie in thermische Energie kann mittels Wärmepumpe oder thermischen Kurzzeitspeicher (Heizelement) erfolgen. Im Simulationsmodell sind für diese beiden Komponenten des dezentralen Energiesystems (Wärmepumpe und thermischer Kurzzeitspeicher) fixe Umwandlungsfaktoren notwendig. Der Umwandlungsfaktor des thermischen Kurzzeitspeichers (Heizelement) wird mit eins ($P_{th} = P_{el}$), der Umwandlungsfaktor der Wärmepumpe mit vier ($P_{th} = 4 \cdot P_{el}$), angenommen.

In Abbildung 11 ist der **Kältekreis** des schematischen Modells dargestellt.

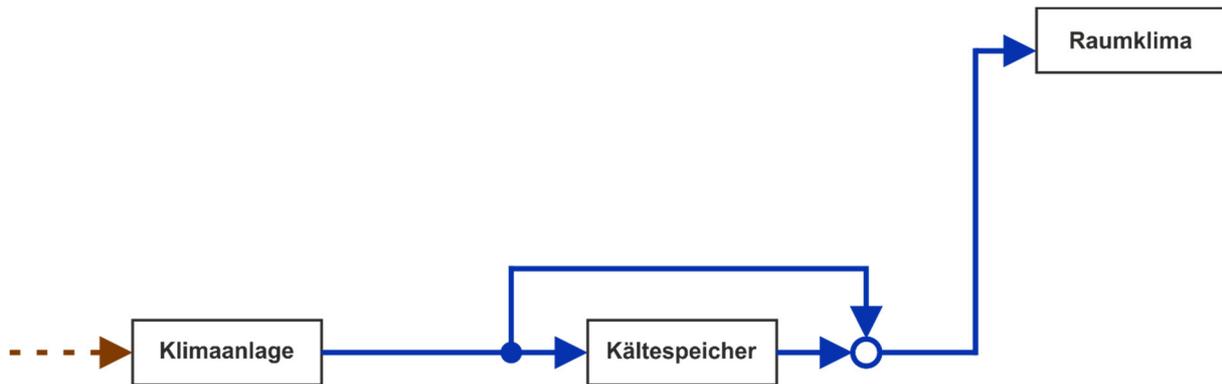


Abbildung 11: Schematisches Modell des Kältekreises

Die Kälteenergie für das Raumklima wird mit einer Klimaanlage erzeugt. In einem Kältespeicher kann die erzeugte Kälteenergie gespeichert werden. Für die Klimaanlage wird, wie bei der Wärmepumpe ein Umwandlungsfaktor benötigt, dieser Umwandlungsfaktor wird im Simulationsmodell mit drei angenommen ($P_{th} = 3 \cdot P_{el}$) [25].

In Abbildung 12 ist das **schematische Modell des dezentralen Energiesystems**, bestehend aus Wärmekreis, Kältekreis und elektrischen Stromkreis, dargestellt.

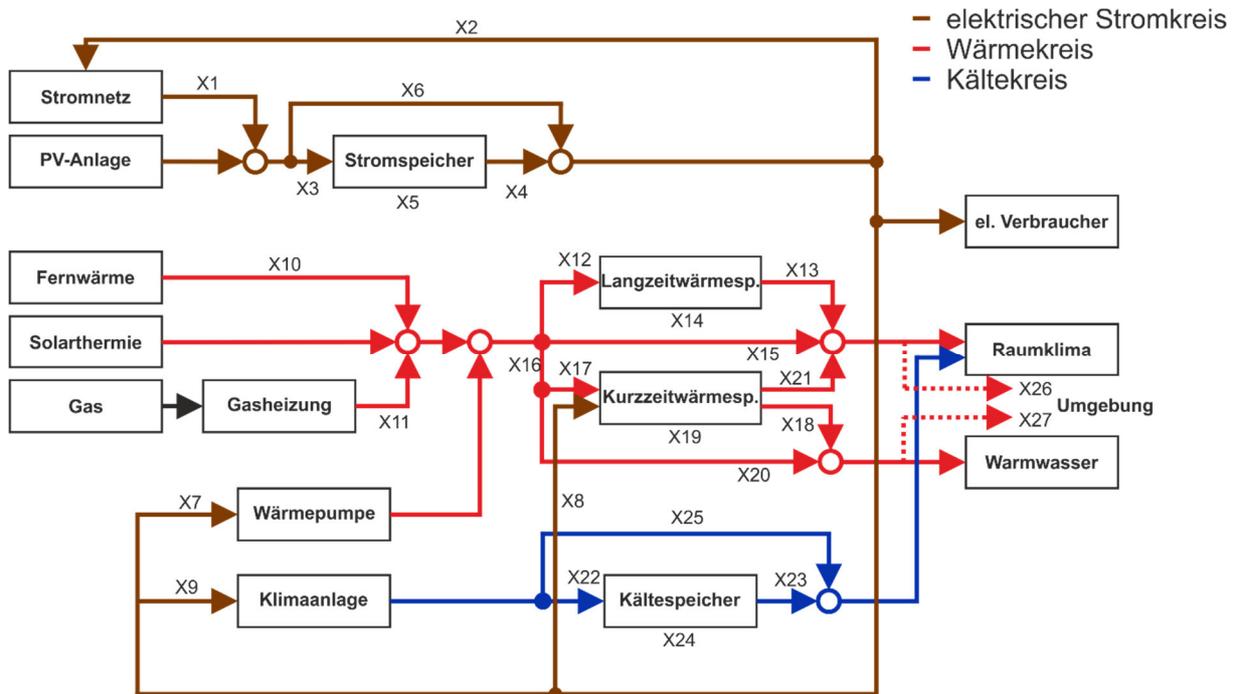


Abbildung 12: Schematisches Modell des dezentralen Energiesystems

Jeder Komponente im schematischen Modell, wird wie in Abbildung 12 dargestellt, eine Optimierungsvariable zugeteilt, welche im Kapitel 4.2 näher erläutert werden.

4.2 Optimierungsvariablen

Jene Variablen, welche von dem Optimierungsalgorithmus so variiert werden, sodass die Kosten des dezentralen Energiesystems minimal werden, nennt man Optimierungsvariablen. Jeder Optimierungsvariablen wird eine Unter- und Obergrenze zugeordnet. Um das gesamte dezentrale Energiesystem zu beschreiben werden insgesamt 27 Optimierungsvariablen verwendet. Diese Optimierungsvariablen inklusive einer Beschreibung und den dazugehörigen Grenzen (Unter- und Obergrenzen) sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Beschreibung der Optimierungsvariablen

Optimierungsvariable	Beschreibung	Untergrenze	Obergrenze
X1	elektrisches Netz (Kauf)	0 kW	Anschlussleistung
X2	elektrisches Netz (Verkauf)	0 kW	Anschlussleistung
X3	elektrischer Speicher (Ladeleistung)	0 kW	maximale Ladeleistung
X4	elektrischer Speicher (Entladeleistung)	0 kW	maximale Entladeleistung
X5	elektrischer Speicher (Speicherstand)	minimaler Speicherstand	maximaler Speicherstand
X6	Leistung um den elektrischen Speicher	0 kW	∞
	Wärmepumpe (elektrische Leistung)	0 kW	maximale Leistung
X8	Kurzzeitwärmespeicher (elektrische Leistung)	0 kW	maximale Leistung
X9	Klimaanlage (elektrische Leistung)	0 kW	maximale Leistung
X10	Fernwärme (thermische Leistung)	0 kW	Anschlussleistung
X11	Gasheizung (thermische Leistung)	0 kW	Anschlussleistung
X12	thermischer Langzeitspeicher (Ladeleistung)	0 kW	maximale Ladeleistung
X13	thermischer Langzeitspeicher (Entladeleistung)	0 kW	maximale Entladeleistung
X14	thermischer Langzeitspeicher (Speicherstand)	minimaler Speicherstand	maximaler Speicherstand
X15	Leistung um den thermischen Langzeitspeicher	0 kW	∞
X16	Kurzzeitspeicher (thermische Leistung)	0 kW	∞
X17	thermischer Kurzzeitspeicher (Ladeleistung)	0 kW	maximale Ladeleistung
X18	thermischer Kurzzeitspeicher (Entladeleistung)	0 kW	maximale Entladeleistung
X19	thermischer Kurzzeitspeicher (Speicherstand)	minimaler Speicherstand	maximaler Speicherstand
X20	Leistung um den thermischen Kurzzeitspeicher	0 kW	∞
X21	Kurzzeitspeicher zum Raumklima (Wärmeleistung)	0 kW	∞
X22	Kältespeicher (Ladeleistung)	0 kW	maximale Ladeleistung
X23	Kältespeicher (Entladeleistung)	0 kW	maximale Entladeleistung
X24	Kältespeicher (Speicherstand)	minimaler Speicherstand	maximaler Speicherstand
X25	Leistung um den Kältespeicher	0 kW	∞
X26	thermischer Langzeitspeicher an Umgebung	0 kW	∞
X27	thermischer Kurzzeitspeicher an Umgebung	0 kW	∞

4.3 Last- und Erzeugungsprofile

Für die Simulation werden für die im dezentralen Energiesystem vorhandenen Komponenten (Photovoltaikanlage, Solarthermieanlage, elektrische Verbraucher, Raumklima und Warmwasser) verschiedene Last- und Erzeugungsprofile verwendet. Damit die Kostenoptimierung aussagekräftige Ergebnisse ermittelt, muss ein Zeitraum von einem Jahr simuliert werden.

4.3.1 Photovoltaikanlage

Das jährliche Erzeugungsprofil der Photovoltaikanlage ergibt sich aus den Daten des Joint Research Center der europäischen Kommission PVGIS. PVGIS enthält die gemessenen gemittelten Globalstrahlungswerte von Europa, Afrika und Südwestasien. Als Standort wird Graz ausgewählt. Die installierte Leistung der Photovoltaikanlage wird mit 7 kWp ausgewählt, die Systemverluste werden mit 15 % angenommen. Die gewählte Photovoltaikanlage hat bei den gewählten Einstellungen eine durchschnittliche Jahreserzeugung von circa 7700 kWh/Jahr, da die Erzeugung nicht immer gleich ist, wird die Erzeugung der Photovoltaik in die einzelnen Monate unterteilt. Die Auflösung der Daten beträgt 15 Minuten, wodurch sich bei einer Simulationsdauer von einem Jahr 35040 Werte ergeben [26].

Das Jahreserzeugungsprofil der Photovoltaikanlage ist in Abbildung 13 dargestellt.

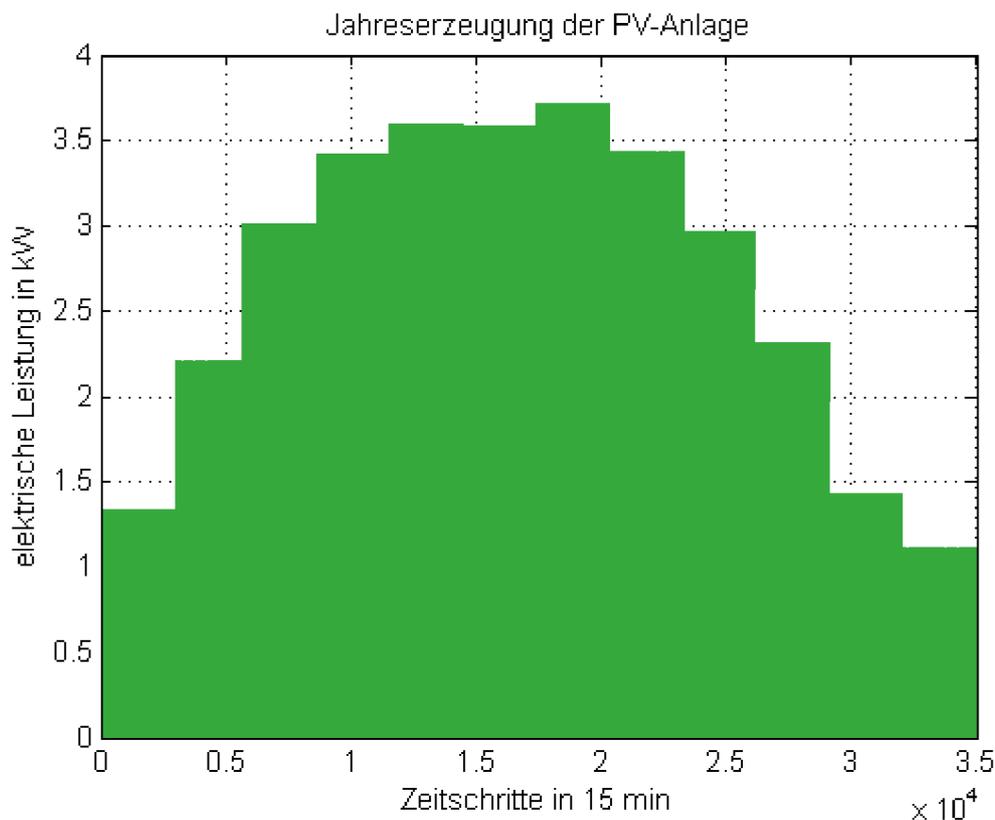


Abbildung 13: Jahreserzeugung der PV-Anlage

4.3.2 Solarthermieanlage

Es ergibt sich bei der Solarthermieanlage dasselbe Erzeugungsprofil als wie bei der Photovoltaikanlage (siehe Abbildung 13), da angenommen wird, dass beide Anlagen unmittelbar nebeneinander liegen. Lediglich die eingespeisten Leistungen unterscheiden sich bei den beiden vorgegebenen Erzeugungsprofilen (Photovoltaikanlage und Solarthermieanlage).

4.3.3 Elektrische Verbraucher

Der elektrische Verbrauch wird im Simulationsmodell mit 4000 kWh pro Jahr angenommen (4-Personen-Haushalt). Zur Abbildung des elektrischen Verbrauchs wird ein standardisiertes H0-Lastprofil mit einer zeitlichen Auflösung von 15 min verwendet [27].

In Abbildung 14 ist das H0-Lastprofil eines Haushalts eines Wintertags (Wochentag) dargestellt.

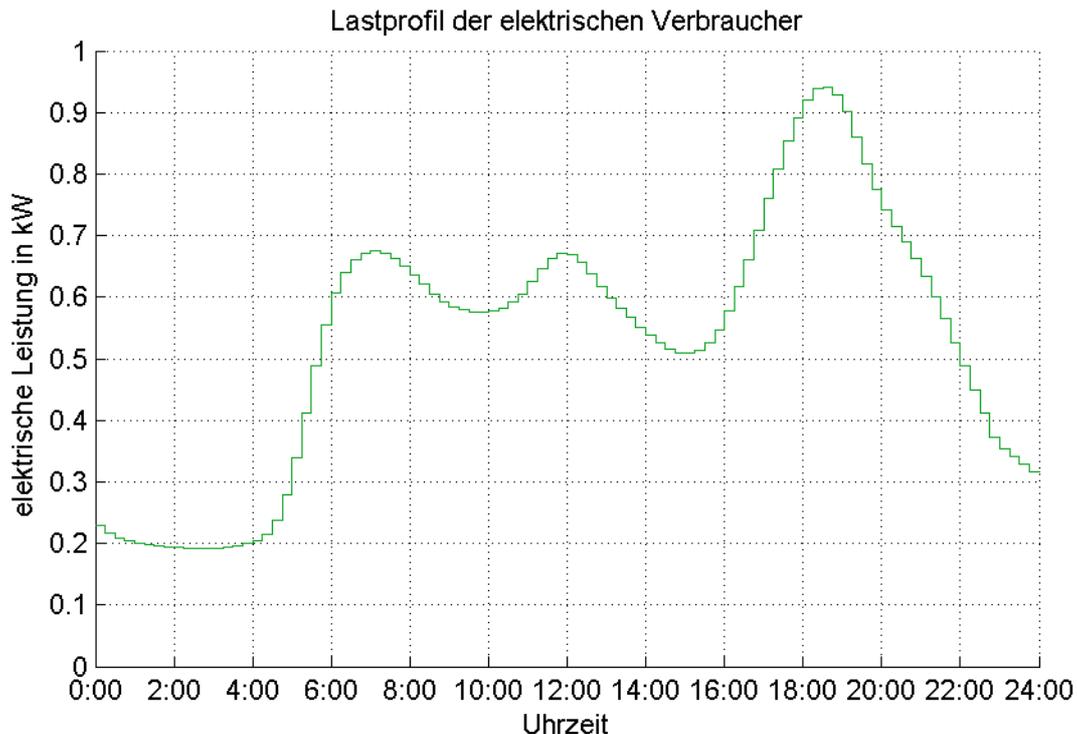


Abbildung 14: Lastprofil der elektrischen Verbraucher (Wochentag) [28]

Wie aus Abbildung 14 ersichtlich, treten an einem Wochentag drei Lastspitzen auf. Am Wochenende treten aufgrund eines unterschiedlichen Verbraucherverhaltens nur noch zwei Lastspitzen auf.

4.3.4 Raumklima

Für die benötigte thermische Energie ist das thermische Klima ausschlaggebend. Die Luftfeuchtigkeit und die Raumluftqualität werden im Simulationsmodell daher nicht berücksichtigt. Für die Darstellung des Raumklimas im Simulationsmodell sind zwei unterschiedliche thermische Kennlinien notwendig, welche sich aus der thermischen Kennlinie der benötigten Wärmeleistung und der thermischen Kennlinie der benötigten Kälteleistung ergeben.

Wärmeleistung

In Abbildung 15 ist der Tagesverlauf der benötigten thermischen Wärmeleistung des Raumklimas eines beispielhaften Tags im Jänner dargestellt.

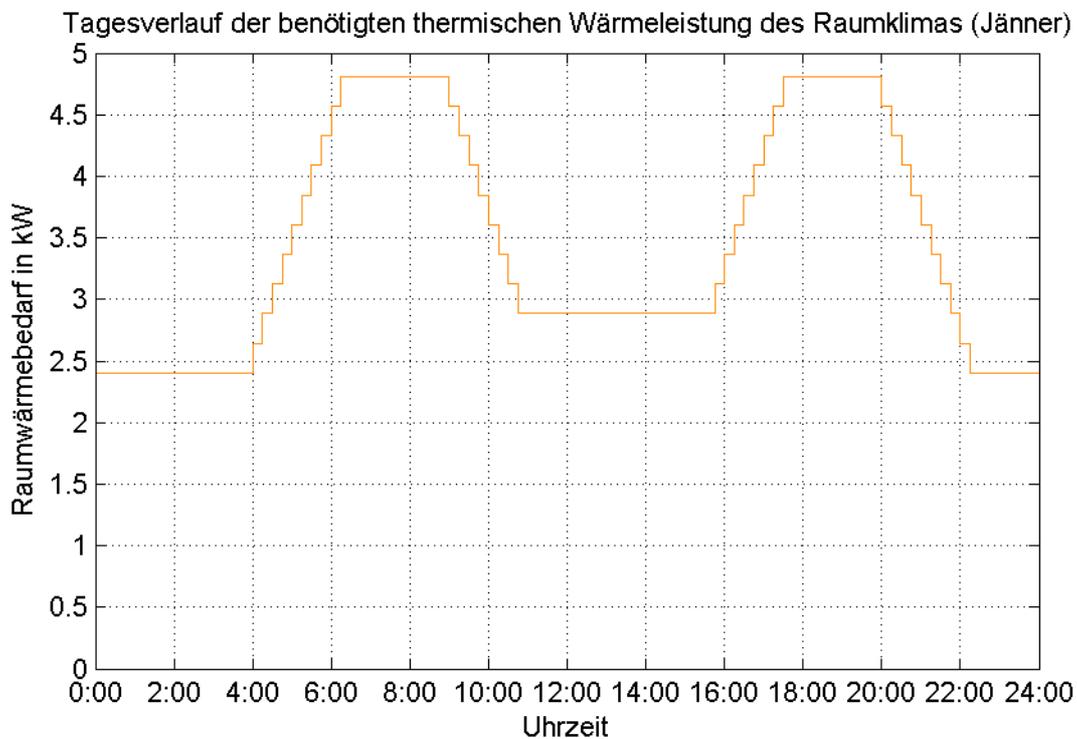


Abbildung 15: Tagesverlauf der benötigten thermischen Wärmeleistung des Raumklimas

Damit die Raumtemperatur nicht zu stark abfällt, wird für die benötigte Wärmeleistung des Raumklimas eine Grundleistung von 2,4 kW angenommen. In der Früh steigt die thermische Wärmeleistung auf das doppelte des Grundverbrauches an, da angenommen wird, dass das Raumklima am Tag wärmer sein soll als Nachts. Die gewünschte Raumtemperatur wird, aufgrund relativ großer Zeitkonstanten nicht sofort erreicht, daher ist es notwendig früh genug mit dem Heizen der Räume zu beginnen. Am Tag ist die benötigte thermische Energie etwas geringer, da die Außentemperatur unter Tags höher ist. Abends fällt die Außentemperatur ab, deshalb steigt die benötigte thermische Leistung an. In der Nacht fällt der thermische

Wärmebedarf wieder auf den Grundbedarf ab. Der thermische Energiebedarf eines Tages im Jänner beträgt in etwa 83 kWh.

In Abbildung 16 ist das Jahresprofil der benötigten Raumwärme für das Raumklima dargestellt.

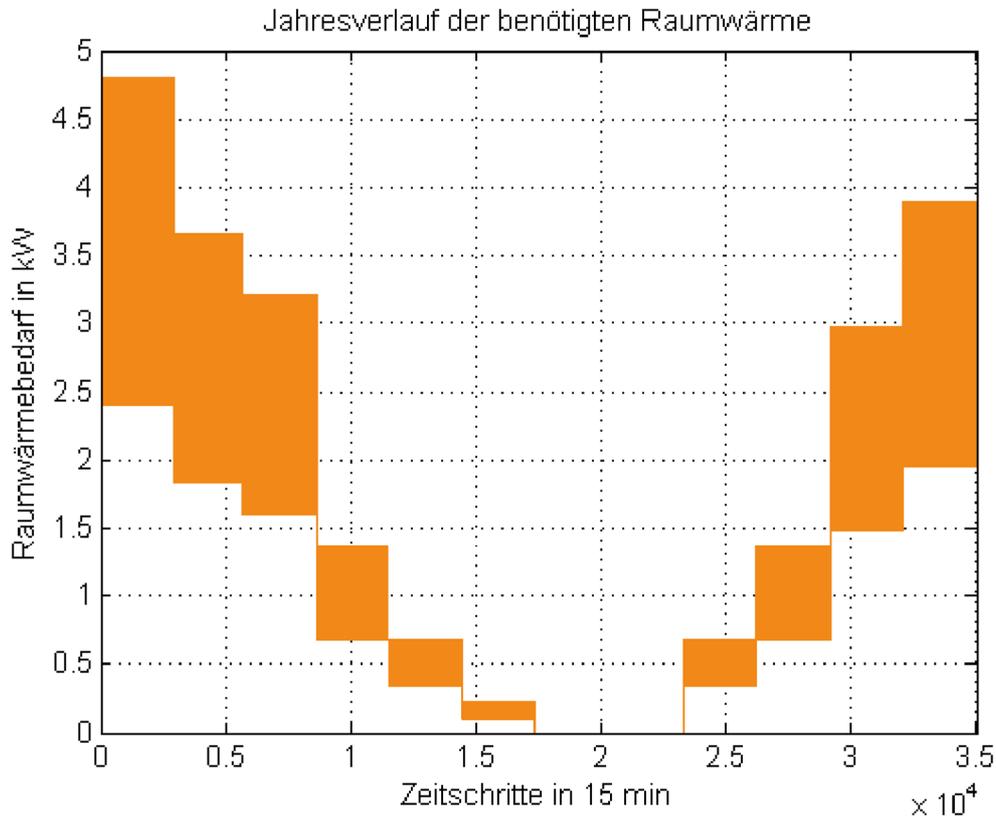


Abbildung 16: Jahresverlauf der benötigten Raumwärme

Der Bedarf thermischer Energie hängt stark von der Außentemperatur ab, deshalb wird der Wärmebedarf des Raumklimas im Simulationsmodell nicht jeden Tag gleich angenommen (siehe Abbildung 16). Im Winter ist die Außentemperatur geringer als im Sommer, dadurch wird mehr thermische Energie zum Heizen benötigt. Der Verlauf der benötigten Raumwärme ist jeden Tag gleich (siehe Abbildung 15), unterscheidet sich jedoch in der Skalierung des Profils (Abhängig vom betrachteten Monat). Im Juli und August wird keine thermische Energie für das Raumklima benötigt, da die Außentemperatur hoch genug ist. An allen anderen Monaten wird thermische Energie benötigt, um eine angenehme Raumtemperatur zu erreichen [26].

Für das Simulationsmodell wird mit einem Wärmebedarf $W_{\text{pro Jahr}\cdot\text{m}^2,\text{RW}}$ von $100 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ gerechnet. Bei einer beheizbaren Fläche A_{RW} von 120 m^2 , ergibt sich ein Wärmebedarf $W_{\text{pro Jahr},\text{RW}}$ von 12000 kWh pro Jahr (siehe Formel (22)) [29].

$$W_{\text{pro Jahr},\text{RW}} = W_{\text{pro Jahr}\cdot\text{m}^2,\text{RW}} \cdot A_{\text{RW}} = 100 \text{ kWh/m}^2\text{a} \cdot 120 \text{ m}^2 = \underline{\underline{12000 \text{ kWh/a}}} \quad (22)$$

- A_{RW} ... beheizte Fläche
- $W_{\text{pro Jahr},\text{RW}}$... Raumwärmebedarf pro Jahr
- $W_{\text{pro Jahr}\cdot\text{m}^2,\text{RW}}$... Raumwärmebedarf pro Quadratmeter und Jahr

Der Wärmebedarf pro Jahr $W_{\text{pro Jahr},\text{RK}}$ wird, wie in Tabelle 2 dargestellt, auf die einzelnen Monate verteilt.

Tabelle 2: Aufteilung der benötigten thermischen Energie für das Raumklima [30]

Monat	Prozent
Jänner	21
Februar	16
März	14
April	6
Mai	3
Juni	1
Juli	0
August	0
September	3
Oktober	6
November	13
Dezember	17

Im Jänner wird am meisten thermische Energie für das Raumklima benötigt, da die durchschnittliche Außentemperatur in diesem Monat am geringsten ist [26].

Kälteleistung

Es gibt kaum Angaben darüber, wie viel Kühlenergie ein Haushalt im Jahr benötigt, dadurch ist die Berücksichtigung im Simulationsmodell schwierig. Damit die benötigte Kühlenergie dennoch im Simulationsmodell berücksichtigt werden kann, wird die benötigte Kühlenergie in dieser Masterarbeit über das Verhältnis der Heizgradtage zu den Kühlgradtagen berechnet (siehe Formel (23)). Die Jahressumme der Heizgradtage HGT in Graz ergibt in etwa 3100 Kd (Kelvin day), die der Kühlgradtage KGT in etwa 150 Kd [31] [32].

$$W_{\text{pro Jahr},\text{RK}} = W_{\text{pro Jahr},\text{RW}} \cdot \frac{\text{KGT}}{\text{HGT}} = 12000 \text{ kWh/a} \cdot \frac{150 \text{ Kd}}{3100 \text{ Kd}} = \underline{\underline{580,65 \text{ kWh/a}}} \quad (23)$$

- HGT ... Heizgradtage pro Jahr
- KGT ... Kühlgradtage pro Jahr
- $W_{\text{pro Jahr},\text{RK}}$... benötigte thermische Kühlenergie pro Jahr
- $W_{\text{pro Jahr},\text{RW}}$... Raumwärmebedarf pro Jahr

Im Simulationsmodell wird ein Kühlbedarf $W_{\text{pro Jahr,RK}}$ von etwa. 580 kWh pro Jahr angenommen. Dieser Kühlenergiebedarf wird auf die beiden Monate Juli und August aufgeteilt, da in diesen beiden Monaten nicht geheizt wird.

In Abbildung 17 ist der Tagesverlauf der benötigten thermischen Kälteleistung eines Tags im Juli dargestellt.

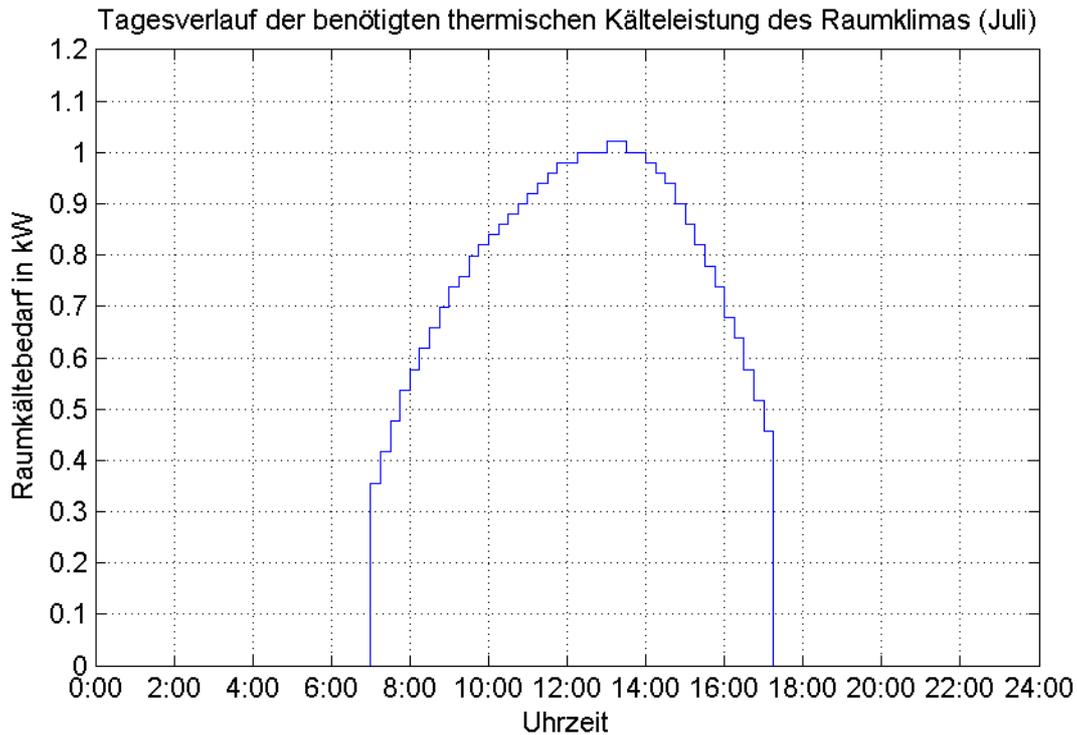


Abbildung 17: Tagesverlauf der benötigten thermischen Kälteleistung des Raumklimas

Der in Abbildung 17 dargestellte Verlauf der benötigten thermischen Kälteleistung, wird aufgrund der durchschnittlichen Außentemperatur im Monat Juli berechnet. Der Kühlenergiebedarf eines Tages im Juli beträgt in etwa 8 kWh [26].

In Abbildung 18 ist der Jahresverlauf der benötigten thermischen Kälteleistung für das Raumklima dargestellt.

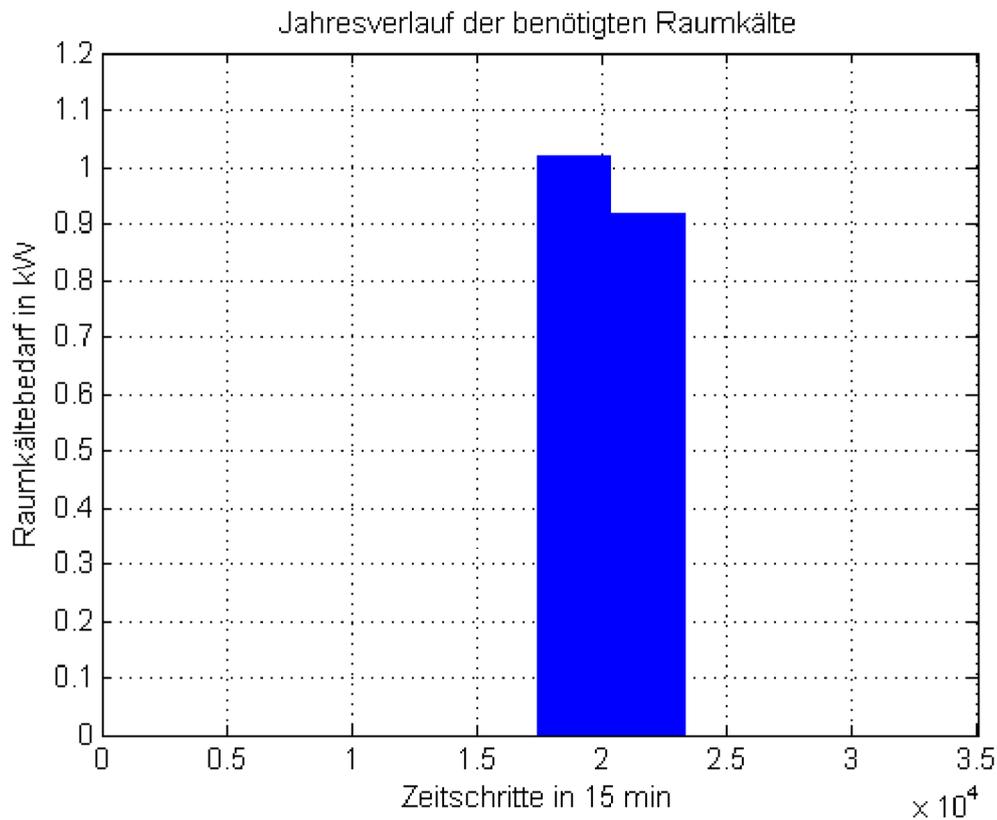


Abbildung 18: Jahresverlauf der benötigten Raumkälte

Wie zuvor erwähnt und in Abbildung 18 gut erkennbar ist, wird angenommen, dass die thermische Kälteenergie nur in den beiden Monaten Juli und August benötigt wird. Die Durchschnittstemperatur im August ist etwas niedriger als im Juli (circa $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), weshalb im Simulationsmodell angenommen wird, dass im Juli etwas mehr thermische Kälteenergie benötigt wird [26].

4.3.5 Warmwasser

In diesem Kapitel wird der Leistungsverlauf des Warmwasserbedarfs für das Simulationsmodell erstellt. Im Simulationsmodell wird mit $V_{\text{ges.Wasser},55^\circ\text{C}} = 40$ Litern Warmwasserbedarf pro Person und Tag gerechnet. Werden 300 Liter Wasser in einem thermischen Wärmespeicher von 5°C auf 55°C erwärmt ($\Delta\vartheta = 50\text{ K}$), wird dafür eine thermische Energie von $\Delta Q = 17,2\text{ kWh}$ (siehe Formel (24)) benötigt [1].

$$\Delta Q = c \cdot V_{\text{th.Speicher}} \cdot \rho_{55^\circ\text{C}} \cdot \Delta\vartheta = \frac{4186,8\text{ J}}{\text{kgK}} \cdot 300\text{ l} \cdot 0,98569\text{ kg/l} \cdot 50\text{ K} \quad (24)$$

$$= 61,9\text{ MJ} \triangleq \underline{\underline{17,2\text{ kWh}}}$$

$\Delta\vartheta$	... Temperaturdifferenz
ΔQ	... benötigte Wärmeenergie zum Heizen von Warmwasser
$\rho_{55^\circ\text{C}}$	... spezifisches Gewicht von Wasser bei 55°C
c	... spezifische Wärmekapazität von Wasser
$V_{\text{th.Speicher}}$	... Speichervolumen des thermischen Speichers in Liter

Pro Duschgang wird mit einem Wasserverbrauch V_{DG} von 40 Liter gerechnet. Eine angenehme Duschtemperatur ist knapp über der Körpertemperatur, die Wassertemperatur wird im Simulationsmodell mit $\vartheta_{\text{DG}} = 38^\circ\text{C}$ angenommen. Das Mischverhältnis zwischen dem 5°C kalten und 55°C warmen Wasser wird in der Formel (25) berechnet [33] [34].

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{warm}} \cdot V_{\text{DG,Wasser},55^\circ\text{C}} + \vartheta_{\text{kalt}} \cdot V_{\text{DG,Wasser},5^\circ\text{C}} &= \vartheta_{\text{DG}} \cdot V_{\text{DG}} \\ 55^\circ\text{C} \cdot V_{\text{DG,Wasser},55^\circ\text{C}} + 5^\circ\text{C} \cdot V_{\text{DG,Wasser},5^\circ\text{C}} &= 38^\circ\text{C} \cdot 40\text{ l} \\ \Rightarrow V_{\text{DG,Wasser},55^\circ\text{C}} &= \underline{\underline{26,4\text{ l}}} \quad \text{und} \quad V_{\text{DG,Wasser},5^\circ\text{C}} = \underline{\underline{13,6\text{ l}}} \end{aligned} \quad (25)$$

ϑ_{DG}	... Duschtemperatur
ϑ_{kalt}	... Kaltwassertemperatur
ϑ_{warm}	... Warmwassertemperatur
$V_{\text{DG,Wasser},5^\circ\text{C}}$	... Kaltwasseranteil pro Duschgang
$V_{\text{DG,Wasser},55^\circ\text{C}}$	... Warmwasseranteil pro Duschgang
V_{DG}	... Wassermenge pro Duschgang

Pro Duschgang werden $V_{\text{Wasser},55^\circ\text{C}} = 26,4$ Liter Warmwasser benötigt (siehe Formel (25)), die benötigte thermische Energie pro Duschgang wird in der Formel (26) berechnet.

$$W_{\text{Dusche}} = \frac{V_{\text{DG,Wasser},55^\circ\text{C}}}{V_{\text{th.Speicher}}} \cdot \Delta Q = \frac{26,4\text{ l}}{300\text{ l}} \cdot 17,2\text{ kWh} = \underline{\underline{1,51\text{ kWh}}} \quad (26)$$

ΔQ	... benötigte Wärmeenergie zum Heizen von Warmwasser
$V_{\text{DG,Wasser},55^\circ\text{C}}$	... Warmwasseranteil pro Duschgang
W_{Dusche}	... Energieverbrauch pro Duschgang

Duscht jede Person einmal pro Tag, ergibt das Lastspitzen im Warmwasserbedarf. Je weiter sich die tatsächlichen Duschgewohnheiten (Wasserverbrauch und Duschtemperatur) von den Annahmen unterscheiden, desto mehr ändern sich die resultierenden Lastspitzen im Warmwasserbedarf.

In Formel (27) wird der restliche Warmwasseranteil berechnet.

$$V_{Rest,Wasser,55^{\circ}C} = V_{ges.Wasser,55^{\circ}C} - V_{DG,Wasser,55^{\circ}C} = 40 \text{ l} - 26,4 \text{ l} = \underline{\underline{13,6 \text{ l}}} \quad (27)$$

- $V_{DG,Wasser,55^{\circ}C}$... Warmwasseranteil pro Dusgang
- $V_{ges.Wasser,55^{\circ}C}$... gesamter Warmwasseranteil pro Person
- $V_{Rest,Wasser,55^{\circ}C}$... restlicher Warmwasseranteil

Die restlichen 13,6 Liter Warmwasser pro Person, werden im Leistungsverlauf des Warmwasserbedarfs in der Früh und auf den Abend aufgeteilt. Wie viel thermische Energie notwendig ist, um das restliche Warmwasser zu heizen wird in Formel (28) ausgerechnet.

$$W_{Rest,WW} = \frac{V_{Rest,Wasser,55^{\circ}C}}{V_{th.Speicher}} \cdot \Delta Q = \frac{13,6 \text{ l}}{300 \text{ l}} \cdot 17,2 \text{ kWh} = \underline{\underline{0,78 \text{ kWh}}} \quad (28)$$

- ΔQ ... Benötigte Wärmeenergie zum Heizen von Warmwasser
- $V_{th.Speicher}$... Speichervolumen des thermischen Speichers in Liter
- $V_{Rest,Wasser,55^{\circ}C}$... restlicher Warmwasseranteil
- $W_{Rest,WW}$... Benötigte Energie zum Heizen des restlichen Warmwassers

In Abbildung 19 ist der thermische Leistungsverlauf des Warmwasserbedarfs eines Haushalts pro Tag dargestellt (vier Personen Haushalt).

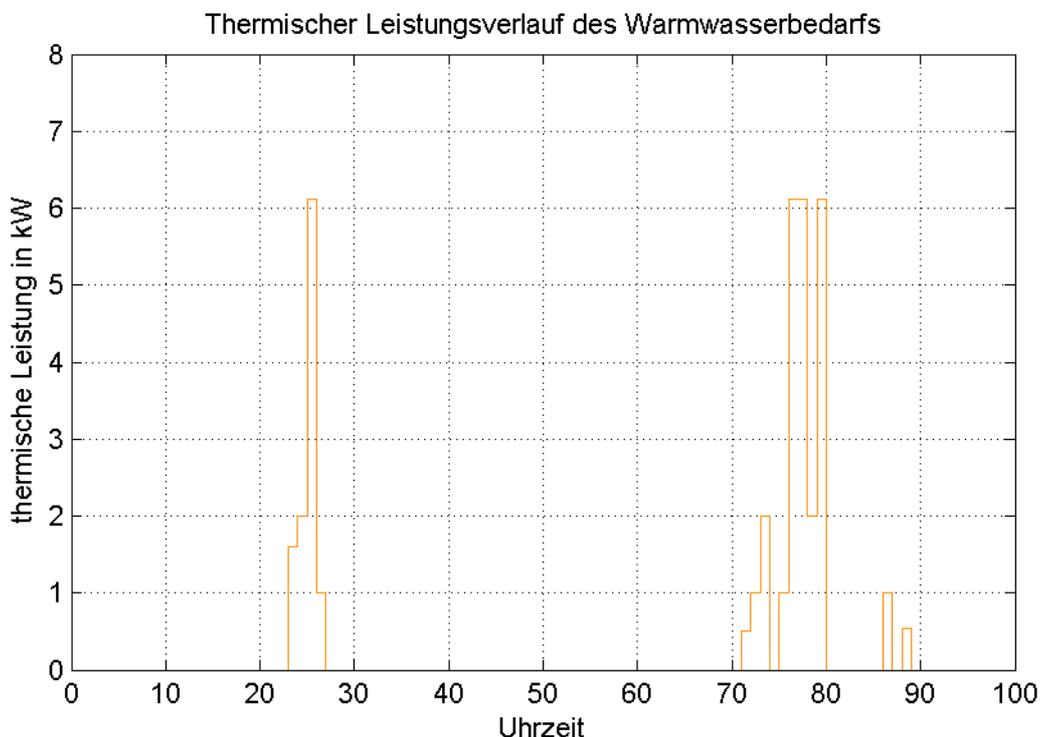


Abbildung 19: Thermischer Leistungsverlauf des Warmwasserbedarfs pro Tag

Es wird angenommen, dass der in Abbildung 19 dargestellte Warmwasserbedarf für das gesamte Jahr gleich ist. Pro Tag wird in etwa 9 kWh thermische Energie benötigt, um den Warmwasserbedarf von 4 Personen zu decken.

4.4 Systemgleichungen

Aus den einzelnen Knoten des schematischen Modells ergeben sich die Systemgleichungen, die das dezentrale Energiesystem beschreiben. In jedem einzelnen Knoten des schematischen Modells muss Energiegleichgewicht herrschen, unter der Annahme das im Knoten keine Verluste auftreten. Es muss also genau so viel Energie in einen Knoten hineinfließen wie herausfließt. Betrachtet man den Knoten 1 des schematischen Modells in Abbildung 20, ergibt sich die Systemgleichung nach Formel (29).

$$\begin{aligned} X1 + P_{PV} &= X3 + X6 & (29) \\ 1: -X1 + X3 + X6 &= P_{PV} \end{aligned}$$

- P_{PV} ... erzeugte Leistung der Photovoltaikanlage pro Zeitschritt
- $X1$... elektrisches Netz (Kauf)
- $X3$... elektrischer Speicher (Ladeleistung)
- $X6$... Leistung um den elektrischen Speicher

Wichtig bei der Erstellung der Systemgleichung ist die richtige Anordnung der Variablen, da diese später als Matrix dargestellt werden. Die Systemgleichung wird in Optimierungsvariablen und bekannte Größen aufgeteilt.

In Abbildung 20 ist der elektrische Teil des schematischen Modells inklusive den dazugehörigen Optimierungsvariablen dargestellt.

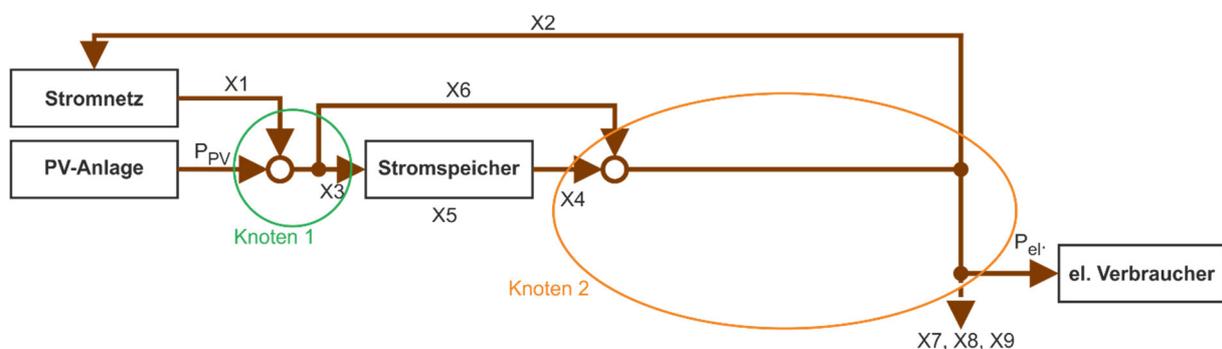


Abbildung 20: elektrischer Teil inklusive Optimierungsvariablen

In Abbildung 20 sind die Knoten 1 und 2 markiert, diese beiden Knoten werden im Simulationsmodell mit je einer Systemgleichung beschrieben.

Die Systemgleichung, die den Knoten 2 beschreibt ist in Formel (30) angeführt.

$$\begin{aligned}
 X6 + X4 &= X2 + P_{el.Ver.} + X7 + X8 + X9 \\
 2: X2 - X4 - X6 + X7 + X8 + X9 &= P_{el.Ver.}
 \end{aligned}
 \tag{ 30 }$$

$P_{el.Ver.}$	... Leistung aller elektrischen Verbraucher pro Zeitschritt
$X2$	... elektrisches Netz (Verkauf)
$X4$	... elektrischer Speicher (Entladeleistung)
$X6$	... Leistung um den elektrischen Speicher
$X7$	... Wärmepumpe (elektrische Leistung)
$X8$	... Kurzzeitwärmespeicher (elektrische Leistung)
$X9$	... Klimaanlage (elektrische Leistung)

Die Systemgleichung im elektrischen Teil des Modells welche den elektrischen Speicher beschreibt ist in Formel (31) dargestellt.

$$\begin{aligned}
 W_{alt,el.SP} + 0,25 \cdot X3 - 0,25 \cdot X4 &= X5 \\
 3: -0,25 \cdot X3 + 0,25 \cdot X4 + X5 &= W_{alt,el.SP}
 \end{aligned}
 \tag{ 31 }$$

$W_{alt,el.SP}$	... elektrischer Speicherstand vor der Optimierung
$X3$	... elektrischer Speicher (Ladeleistung)
$X4$	... elektrischer Speicher (Entladeleistung)
$X5$	... elektrischer Speicher (Speicherstand)

Da die zeitliche Auflösung 15 min beträgt, und damit die in den elektrischen Speicher zugeführte beziehungsweise abgeführte Leistung in die Energie umgerechnet wird, werden die Optimierungsvariablen ($X3$ und $X4$) mit 0,25 multipliziert. Diese Umrechnung ist notwendig, damit die Energie richtig im Speicher berücksichtigt wird.

Befindet sich kein elektrischer Speicher im dezentralen Energiesystem, verändert sich die Systemgleichung (siehe Formel (32)) folgendermaßen.

$$\begin{aligned}
 X3 &= X4 \\
 3: X3 - X4 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{ 32 }$$

$X3$	... elektrischer Speicher (Ladeleistung)
$X4$	... elektrischer Speicher (Entladeleistung)

Betrachtet man das gesamte dezentrale Energiesystem so ergeben sich 12 Systemgleichungen (12 Knoten). Die aufgestellten Systemgleichungen ergeben die in Formel (33) dargestellte Form.

$$A_{eq} \cdot X = b_{eq}
 \tag{ 33 }$$

A_{eq}	... Matrix der linearen Gleichungen
b_{eq}	... Vektor der bekannten Größen
X	... Vektor der alle 27 Optimierungsvariablen beinhaltet

4.5 Optimierung

Da das zu optimierende dezentrale Energiesystem ausschließlich aus linearen Systemgleichungen besteht, kann das Optimierungsproblem mit einem linearen Optimierungsalgorithmus gelöst werden. Als Optimierungsalgorithmus wird die Funktion „linprog“ der Software Matlab verwendet.

Der Optimierungsalgorithmus muss das folgende, in Formel (36) dargestellte, mathematische Problem lösen.

$$\min_X f^T \cdot X \text{ so dass } \begin{cases} A \cdot X \leq b \\ A_{eq} \cdot X = b_{eq} \\ l_b \leq X \leq u_b \end{cases} \quad (36)$$

A	... Matrix der Ungleichungen
A _{eq}	... Matrix der linearen Gleichungen
b	... Vektor der Ungleichungen
b _{eq}	... Vektor der Gleichungen
X	... Vektor der Optimierungsvariablen
f ^T	... Transponierter Vektor der Gewichtungen
l _b	... Vektor der Untergrenzen der Optimierungsvariablen
u _b	... Vektor der Obergrenzen der Optimierungsvariablen

Da das dezentrale Energiesystem nur durch lineare Gleichungen und durch keine Ungleichungen abgebildet wird, sind die Bedingungen $A \cdot X \leq b$ aus Formel (36) für die Optimierung des Systems nicht von Bedeutung. Der Vektor X beinhaltet alle 27 Optimierungsvariablen des (de-)zentralen Energiesystems. Die Aufgabe des Optimierungsalgorithmus „linprog“ besteht darin, eine Lösung für den Vektor X zu finden, sodass die Zielfunktion $f^T \cdot X$ minimal wird. Der Vektor X muss die geforderten Bedingungen, bestehend aus der Lösung der Gleichung $A_{eq} \cdot X = b_{eq}$ und der Einhaltung der Ober- und Untergrenzen ($l_b \leq X \leq u_b$), erfüllen. Die Untergrenzen der Optimierungsvariablen werden durch den Vektor l_b, die Obergrenzen der Optimierungsvariablen durch den Vektor u_b berücksichtigt.

Der Vektor f beinhaltet die Gewichtungen der Optimierungsvariablen. Diese Gewichtungen beeinflussen die Leistungsflüsse des Systems. Bekommt eine Optimierungsvariable, im Vergleich zu den anderen Optimierungsvariablen, einen großen Gewichtungswert zugewiesen, wird diese Optimierungsvariable vom Optimierungsalgorithmus möglichst klein gehalten, damit die Zielfunktion minimal wird. Die von den Gewichtungen abhängigen Leistungsflüsse haben wiederum Auswirkungen auf die resultierenden Gesamtkosten des dezentralen Energiesystems.

5 Programmablauf

Zum besseren Verständnis des Simulationsmodells, wird in diesem Kapitel der Programmablauf übersichtlich dargestellt und beschrieben. In Abbildung 21 ist das dazugehörige Programmflussbild abgebildet.

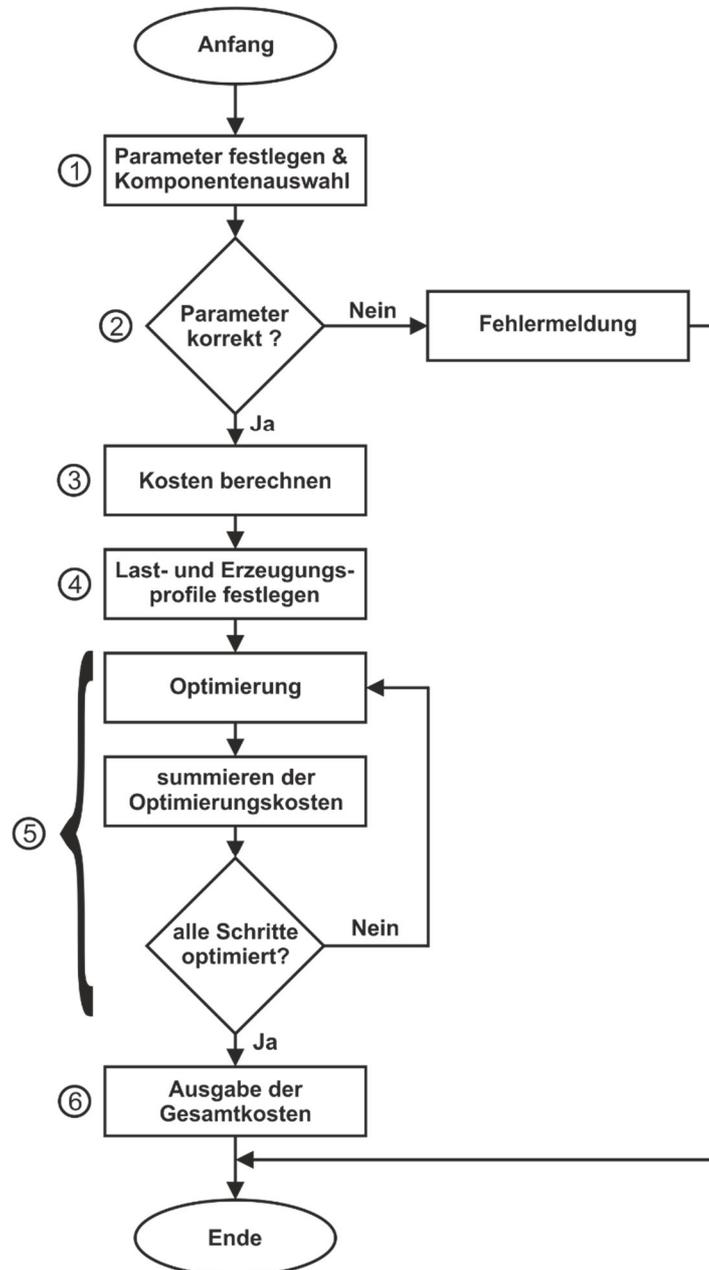


Abbildung 21: Programmflussbild

1: Zum Beginn des Simulationsprogramms werden alle notwendigen Parameter (zum Beispiel Ober- und Untergrenzen), der im dezentralen Energiesystem vorhandenen Komponenten (Photovoltaikanlage, Solarthermieanlage, ...) festgelegt. Damit das Simulationsprogramm die für die Optimierung notwendigen Kosten in einem Zeitintervall von 15 Minuten berechnen kann, müssen die Investitionskosten, Betriebskosten und die Lebensdauer der verwendeten Komponenten angegeben werden. Für die Auswahl, der im Simulationsmodell vorhandenen

Speicher, gibt es für jeden einzelnen Speicher (elektrischer Speicher, thermischer Langzeitspeicher, thermischer Kurzzeitspeicher und Kältespeicher) eine eigene Variable. Wird zum Beispiel die Variable `eISP_Speicher = 'Y'` gesetzt, bedeutet das, dass ein elektrischer Speicher im Simulationsmodell vorhanden ist, wird anstelle von 'Y' ein 'N' eingefügt, bedeutet das, dass kein elektrischer Speicher im Simulationsmodell vorhanden ist. Weitere wichtige Speichereinstellungen, sind die maximale Lade- und Entladeenergie (`eISP_maximale_Ladeenergie`, `eISP_maximale_Entladeenergie`), der Wirkungsgrad der jeweiligen Speicher (zum Beispiel `eISP_Wirkungsgrad`) und der minimale und maximale Speicherstand (`eISP_Speicherstand_min`, `eISP_Speicherstand_max`). Des Weiteren muss festgelegt werden, welche Systemkomponenten in der Optimierung berücksichtigt werden. Befindet sich zum Beispiel eine Photovoltaikanlage im Simulationsmodell, muss die Variable `PV_Anlage = 'Y'` gesetzt werden.

2: Sind die Parameter eingestellt und die für die Optimierung relevanten Komponenten ausgewählt, müssen diese Eingaben überprüft werden. Sollte eine Eingabe (zum Beispiel Wirkungsgrad > 1) nicht zulässig sein, bricht das Programm die Optimierung ab und gibt eine Fehlermeldung aus. Die Fehlermeldung gibt Auskunft über die nicht korrekt getätigten Eingaben.

3: Im nächsten Programmschritt werden die Kosten der ausgewählten Komponenten für ein Zeitintervall von je 15 Minuten berechnet (zum Beispiel Photovoltaikanlage $C_{\text{pro } 15 \text{ min, PV}}$). Die Kosten nicht verwendeter Systemkomponenten werden auf Null gesetzt, damit diese die Gesamtkosten nicht beeinflussen.

4: Nach der Kostenberechnung der ausgewählten Komponenten werden die Last- und Erzeugungsprofile festgelegt. Diese Profile sind als Excel-Dateien gespeichert und werden mit dem Befehl „`xlsread`“ in das Simulationsmodell eingelesen.

5: Sind alle Parameter korrekt eingegeben und die Last- und Erzeugungsprofile eingelesen, wird das Simulinkmodell ausgeführt. Das Simulinkmodell erstellt die im Kapitel 4.4 beschriebenen Systemgleichungen sowie den in Kapitel 4.5 angeführten Optimierungsalgorithmus. Mittels dem Simulinkmodell wird die Optimierung des dezentralen Energiesystems durchgeführt. Die bei der Optimierung berechneten Optimierungskosten werden über alle Optimierungsschritte summiert, wodurch sich die Gesamtkosten des dezentralen Energiesystems ergeben.

6: Am Programmende werden die Gesamtkosten als plot ausgegeben.

6 Simulationsergebnisse

Mittels des im Matlab erstellten Simulationsmodells, werden die Gesamtkosten des dezentralen Energiesystems unter Betrachtung verschiedener Szenarien berechnet. Der Vergleich der Simulationsergebnisse der verschiedenen Szenarien ermöglicht ein besseres Verständnis des dezentralen Energiesystems. Es werden mit Hilfe des Simulationsmodells vier unterschiedliche Szenarien analysiert:

- Szenario A: Elektrisches System: Im Szenario A wird der elektrische Teil des dezentralen Energiesystems betrachtet. Der thermische Teil des dezentralen Energiesystems, wird bei der Systemoptimierung nicht berücksichtigt und verursacht daher keine Kosten. Mit Hilfe dieser Analyse, wird die optimale elektrische SpeichergroÙe ermittelt, bei welcher sich ein elektrischer Speicher in einem dezentralen Energiesystem wirtschaftlich rentiert.
- Szenario B: Elektrisches System + Warmwasserbedarf: Im Szenario B wird zusätzlich zum elektrischen System der Warmwasserbedarf inklusive einem thermischen Kurzzeitspeicher berücksichtigt. Es werden Simulationen mit Kombinationen unterschiedlicher Erzeuger und Energiequellen durchgeführt, wobei die resultierenden Gesamtkosten der verschiedenen Kombinationen (Erzeuger und Energiequellen) analysiert werden. Die Kombination (Erzeuger und Energiequellen) bei welcher die Gesamtkosten am geringsten sind, ergibt die beste Möglichkeit den vorgegebenen Energiebedarf wirtschaftlich zu decken.
- Szenario C: Gesamtsystem ohne Kühlbedarf: Im Szenario C wird das gesamte dezentrale Energiesystem bestehend aus einem elektrischen Teilsystem und einem thermischen Teilsystem (ohne Kühlbedarf) analysiert. Es werden, wie im Szenario B (Elektrisches System + Warmwasser), verschiedene Simulationen mit unterschiedlichen Kombinationen (Erzeuger und Energiequellen) durchgeführt. Des Weiteren wird ein thermischer Langzeitspeicher im dezentralen Energiesystem in Abhängigkeit unterschiedlicher Wirkungsgrade analysiert.
- Szenario D: Gesamtsystem mit Kühlbedarf: In diesem Szenario wird zusätzlich zum Wärmebedarf des dezentralen Energiesystems der Kühlbedarf berücksichtigt, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Kühlkreis liegt.

6.1 Szenario A: Elektrisches System

In Szenario A wird nur das elektrische Teilsystem analysiert. Es wird die optimale elektrische Speichergröße des dezentralen Energiesystems, durch die wirtschaftliche Betrachtung der Speicherkosten (€/kWh) ermittelt. Der Warmwasserbedarf und das Raumklima werden in der Analyse nicht betrachtet. Das bedeutet, dass die elektrische Energie nur von den elektrischen Verbrauchern im Haushalt verbraucht oder vom elektrischen Speicher gespeichert wird.

In der Tabelle 3 sind für die Analyse relevanten Annahmen der Komponenten für dieses Szenario dargestellt.

Tabelle 3: Relevante Annahmen der Komponenten (elektrischer Teil) [4] [5]

Technologie	C_{IK}	C_{BK}	$C_{pro kWh}$	T	Anmerkungen
-	€	€/a	€/kWh	a	-
Photovoltaikanlage	14000	210	-	25	7 kWp
Strom (Kaufpreis)	-	-	0,2	-	-
Strom (Verkaufspreis)	-	-	-0,035	-	-

Eine 7 kWp Photovoltaikanlage erzeugt in Graz jährlich circa 7770 kWh elektrische Energie, der jährliche elektrische Verbrauch eines Einfamilienhaushalts wird mit 4000 kWh pro Jahr angenommen. Die erzeugte elektrische Energie der Photovoltaikanlage ist deutlich höher als der elektrische Energieverbrauch, überschüssige elektrische Energie wird an das elektrische Netz verkauft [26] [27].

Wie im Kapitel 4.5 erwähnt, kann mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren der Leistungsfluss im dezentralen Energiesystem beeinflusst werden. Damit die getroffenen Einstellungen der unterschiedlichen Gewichtungen der Optimierungsvariablen **nachvollziehbar** sind, ist in Abbildung 22 das schematische Modell dieses Szenarios dargestellt.

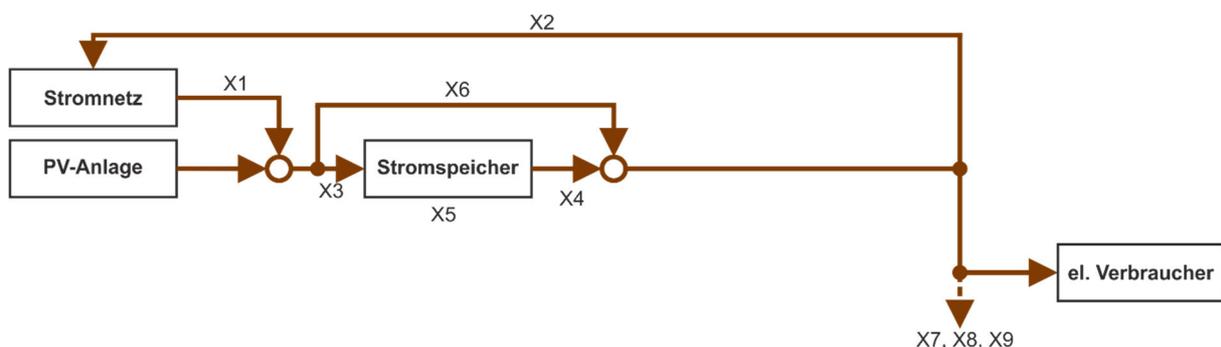


Abbildung 22: Angepasstes, schematisches Modell (elektrischer Stromkreis)

Der Gewichtungsfaktor $f(X_3)$ (zugehöriger Gewichtungsfaktor der Optimierungsvariable X_3) wird kleiner als der Gewichtungsfaktor $f(X_2)$ (zugehöriger Gewichtungsfaktor der Optimierungsvariable X_2) gewählt, dadurch hat der elektrische Speicher gegenüber dem

elektrischen Netz Priorität. Das bedeutet, wenn in einem Optimierungsschritt die Erzeugung der elektrischen Energie durch die Photovoltaikanlage größer als der Verbrauch ist, und der elektrische Speicher nicht vollständig geladen ist, wird die überschüssige erzeugte elektrische Energie im elektrischen Speicher gespeichert. Erst wenn der elektrische Speicher vollständig geladen ist, wird die überschüssige elektrische Energie an das elektrische Netz verkauft.

Des Weiteren wird der Gewichtungsfaktor $f(X4)$ kleiner als der Gewichtungsfaktor $f(X1)$ eingestellt, dadurch wird erst nachdem der elektrische Speicher leer ist, die fehlende elektrische Energie vom elektrischen Netz gekauft.

In Abbildung 23 ist die jährliche Kosteneinsparung in Abhängigkeit der elektrischen Speichergröße dargestellt. Die Speicherkosten des elektrischen Speichers werden mit 0,1 €/kWh angenommen.

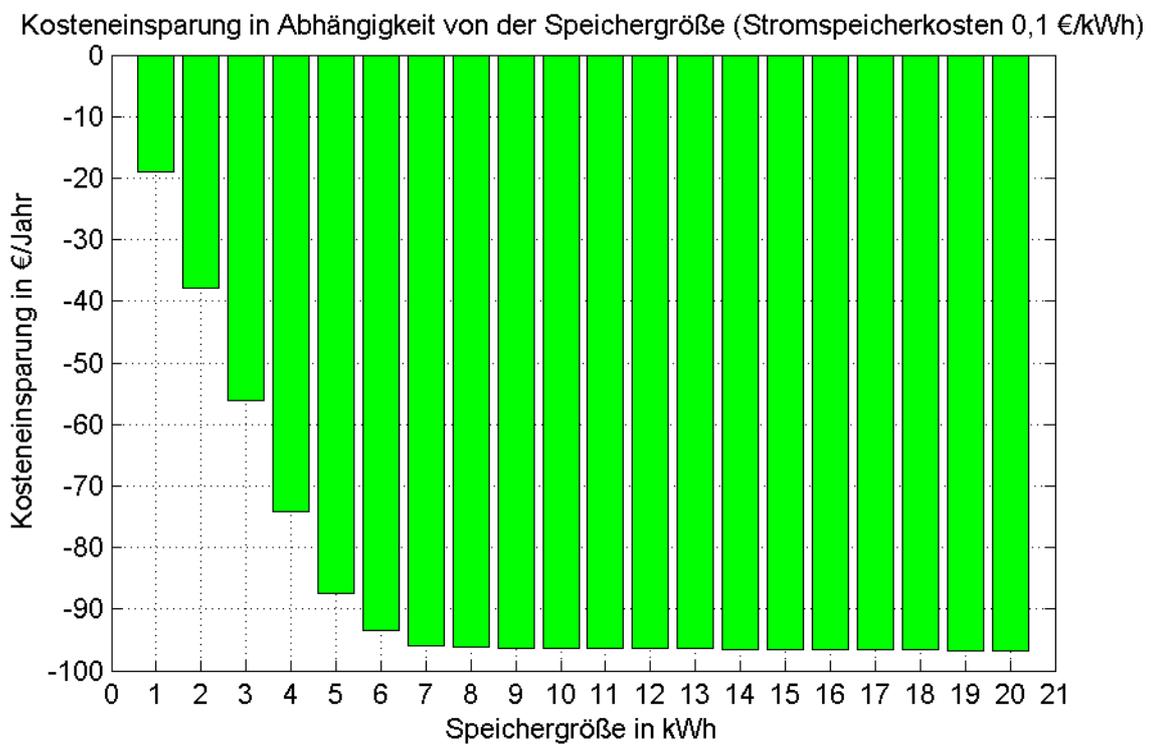


Abbildung 23: Kosteneinsparung in Abhängigkeit von der Speichergröße

In Abbildung 23 ist deutlich zu erkennen, dass das Einsparungspotential ab einer elektrischen Speichergröße von 7 kWh annähernd gleich bleibt.

Ein elektrischer Speicher mit einer Speichergröße von 7 kWh wird im Szenario A jährlich mit $W_{\text{pro Jahr,el.SP}} = 1477 \text{ kWh}$ geladen (siehe Formel (37)).

$$W_{\text{pro Jahr,el.SP}} = X_{\text{sum}}(3) \cdot t_{\text{Zeitschritt}} = 5908,5 \text{ kW} \cdot 0,25 \text{ h} \cong \underline{\underline{1477 \text{ kWh}}} \quad (37)$$

$t_{\text{Zeitschritt}}$	... Zeit pro Optimierungsschritt
$W_{\text{pro Jahr,el.SP}}$	... Jährlich durch den Speicher umgesetzte Energie
$X_{\text{sum}}(3)$	... Jahressumme der Ladeleistung des elektrischen Speichers

Es gibt zwei wesentliche Einflussfaktoren, die sich auf die Lebensdauer eines elektrischen Speichers auswirken:

- Kalendarische Lebensdauer: 20 Jahre (Annahme für das Simulationsmodell)
- Vollladezyklen: 5000 Vollladezyklen (Annahme für das Simulationsmodell)

Die kalendarische Lebensdauer eines elektrischen Speichers, ist unabhängig davon wie oft der elektrische Speicher be- und entladen wird. Wird zum Beispiel ein Lithium-Ionen-Speicher verwendet, ist dieser Speicher nach Erreichen der kalendarischen Lebensdauer oder den Vollladezyklen nicht total zerstört, jedoch verringert sich die Leistung des Speichers nach einer kalendarischen Lebensdauer von 20 Jahren oder den 5000 Vollladezyklen. Ein elektrischer Speicher mit einer Speicherkapazität $W_{\text{max,el.SP}} = 7 \text{ kWh}$, einer Entladetiefe von $\text{DoD} = 0,8$ und 5000 Vollladezyklen (VLZ), erreicht die 5000 Vollladezyklen nach etwa 19 Jahren (siehe Formel (38)) [35].

$$T_{\text{el.SP.}} = \frac{W_{\text{max,el.SP}} \cdot \text{DoD} \cdot \text{VLZ}}{W_{\text{pro Jahr,el.SP}}} = \frac{7 \text{ kWh} \cdot 0,8 \cdot 5000}{1477 \text{ kWh/a}} \cong \underline{\underline{19 \text{ a}}} \quad (38)$$

DoD	... Entladetiefe des elektrischen Speichers
$T_{\text{el.SP.}}$	... Lebensdauer des elektrischen Speichers (Vollladezyklen)
VLZ	... Vollladezyklen des elektrischen Speichers
$W_{\text{pro Jahr,el.SP}}$	... Jährlich durch den Speicher umgesetzte Energie
$W_{\text{max,el.SP}}$	... maximale Speicherkapazität des elektrischen Speichers

Die kalendarische Lebensdauer von 20 Jahren, wird mit einem elektrischen Speicher mit einer Speicherkapazität von 7 kWh, nicht erreicht. Wird die Größe des elektrischen Speichers erhöht, steigt die Zeit bis die 5000 Vollladezyklen erreicht werden $T_{\text{el.SP.}}$ an.

In Formel (39) wird die Lebensdauer $T_{el.SP.}$ des elektrischen Speichers mit einer elektrischen Speichergröße von 8 kWh berechnet.

$$T_{el.SP.} = \frac{W_{max,el.SP.} \cdot DoD \cdot VLZ}{W_{pro\ Jahr.el.SP}} = \frac{8\ kWh \cdot 0,8 \cdot 5000}{1477\ kWh/a} \cong \underline{\underline{22\ a}} \quad (39)$$

DoD	... Entladetiefe des elektrischen Speichers
$T_{el.SP.}$	... Lebensdauer des elektrischen Speichers (Vollladezyklen)
VLZ	... Vollladezyklen des elektrischen Speichers
$W_{pro\ Jahr.el.SP.}$	... Jährlich durch den Speicher umgesetzte Energie
$W_{max,el.SP.}$	... maximale Speicherkapazität des elektrischen Speichers

Wird ein elektrischer Speicher mit einer Speicherkapazität von 8 kWh verwendet, erreicht man die kalendarische Lebensdauer, bevor die Vollladezyklen erreicht werden. Daher ist ein elektrischer Speicher mit einer Speicherkapazität von 7 kWh besser geeignet als ein elektrischer Speicher mit einer Speicherkapazität von 8 kWh. Außerdem sind die Investitionskosten eines elektrischen Speichers $C_{IK,el.SP.}$ umso größer, desto größer die elektrische Speicherkapazität ist. Die Kosteneinsparung, wie in Abbildung 23 dargestellt, bleibt aber nahezu gleich.

Wird in dem dezentralen Energiesystem, bestehend aus einer 7 kWp Photovoltaikanlage und den elektrischen Verbrauchern, ein elektrischer Speicher mit einer Speichergröße von 7 kWh und einer Entladetiefe $DoD = 0,8$ installiert, bedeutet das eine jährliche Kosteneinsparung von circa $C_{KE,el.SP,1\ Jahr} = 95\ \text{€ pro Jahr}$ (siehe Abbildung 23, Speicherkosten 0,1 €/kWh).

Das bedeutet, dass in 19 Jahren durch den elektrischen Speicher in etwa 1800 € gespart werden (Formel (40)).

$$C_{KE,el.SP,19\ Jahre} = C_{KE,el.SP,1\ Jahre} \cdot T_{el.SP.} = 95\ \text{€} \cdot 19\ a \cong \underline{\underline{1800\ \text{€}}} \quad (40)$$

$C_{KE,el.SP,1\ Jahr}$	... jährliche Kosteneinsparung (durch elektrischen Speicher)
$C_{KE,el.SP,19\ Jahre}$	... Kosteneinsparung in 19 Jahren (durch elektrischen Speicher)
$T_{el.SP.}$	... Lebensdauer des elektrischen Speichers

Die Investitionskosten des elektrischen Speichers $C_{IK,el.SP.}$ sind bei der Kosteneinsparung von 1800 € (19 Jahre) bereits berücksichtigt.

Abbildung 24 stellt die Kosteneinsparung beziehungsweise entstehende Zusatzkosten, bei Verwendung eines 7 kWh Speichers in Abhängigkeit der elektrischen Speicherkosten dar. Der Kaufpreis der elektrischen Energie aus dem Netz wird mit 0,2 €/kWh, der Verkaufspreis der elektrischen Energie in das Netz wird mit 0,035 €/kWh angenommen.

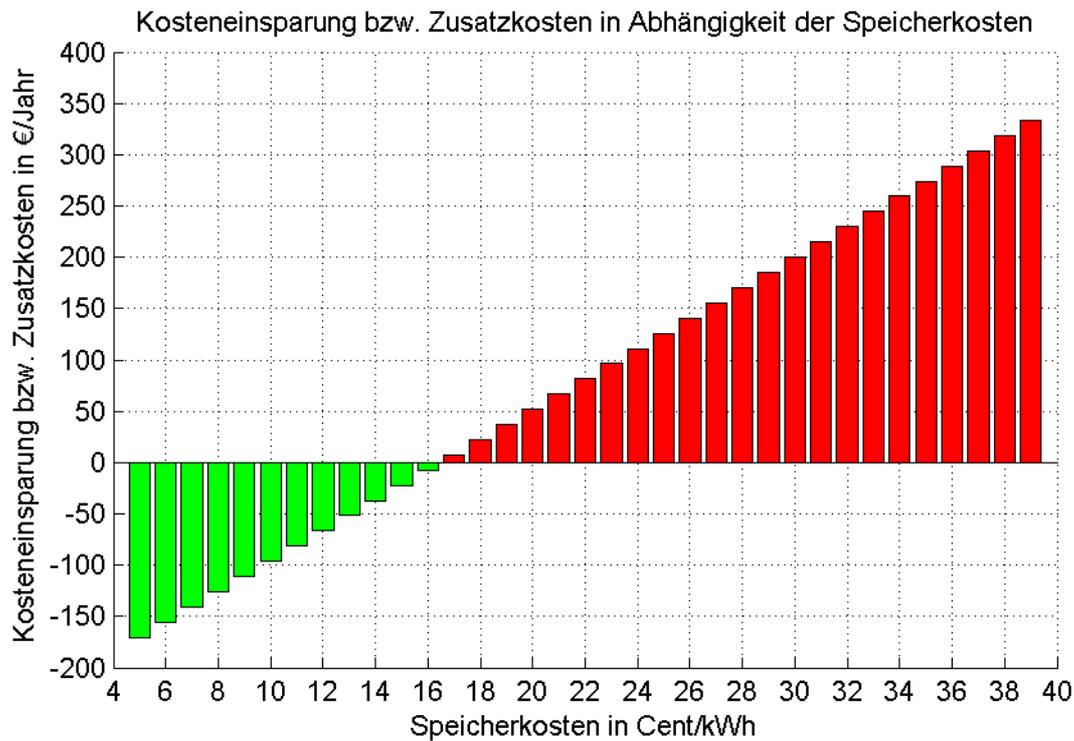


Abbildung 24: 7 kWh Speicher bei einem Strompreis von 0,20 €/kWh

Der elektrische Speicher rentiert sich, solange die Balken in Abbildung 24 grün sind. Wenn die Gesamtkosten durch die Verwendung eines elektrischen Speichers im dezentralen Energiesystem größer werden, als ohne elektrischen Speicher, werden die Balken rot. Bei einem Stromkaufpreis von 0,2 €/kWh und Stromverkaufspreis von 0,035 €/kWh, rentiert sich der elektrische Speicher bis zu Speicherkosten von 0,16 €/kWh (siehe Abbildung 24).

Abbildung 25 stellt die jährlichen Kosteneinsparung beziehungsweise Zusatzkosten in Abhängigkeit der Speicherkosten bei einem Strompreis von 0,25 €/kWh dar.

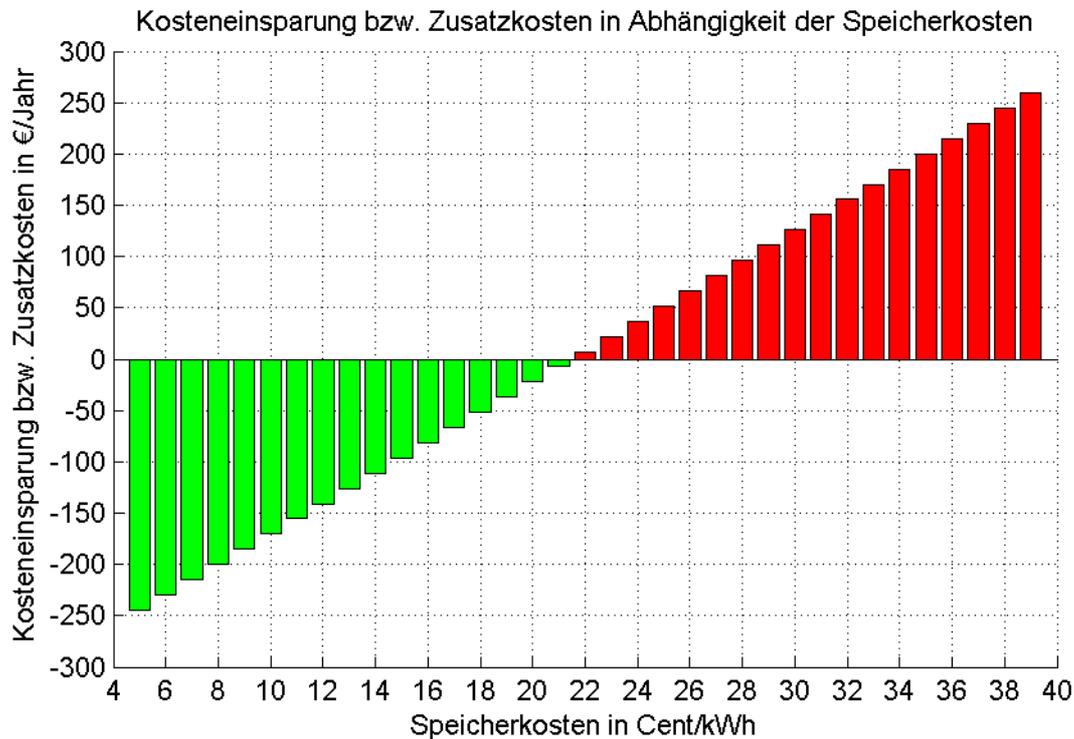


Abbildung 25: 7 kWh Speicher bei einem Strompreis von 0,25 €/kWh

In Abbildung 25 ist der Preis der elektrischen Energie (€/kWh) um 5 Cent höher als zuvor (Abbildung 24). Vergleicht man die beiden Abbildungen (Abbildung 24 und Abbildung 25), erkennt man, dass sich bei einem höheren Strompreis der elektrische Speicher auch noch bei höheren Speicherkosten auszahlt, konkret zahlt sich bei einem Strompreis von 0,25 €/kWh der elektrische Speicher bis 0,21 €/kWh-Speicherkosten aus. Der Strompreis hat einen großen Einfluss darauf, ob sich ein elektrischer Stromspeicher in einem dezentralen Energiesystem aus wirtschaftlicher Sicht rentiert. Die Investitionskosten $C_{IK,el.SP}$ eines 7 kWh Speichers mit DoD = 0,8 und VLZ = 5000 werden anhand eines Beispiels in Formel (41) berechnet.

$$C_{IK,el.SP} = C_{kWh,el.SP} \cdot W_{max,el.SP} \cdot DoD \cdot VLZ = 0,15 \text{ €/kWh} \cdot 7 \text{ kWh} \cdot 0,8 \cdot 5000 = \underline{\underline{4200 \text{ €}}} \quad (41)$$

- $C_{IK,el.SP}$... Investitionskosten des elektrischen Speichers
- $C_{kWh,el.SP}$... Kosten des elektrischen Speichers pro kWh
- DoD ... Entladetiefe des elektrischen Speichers
- VLZ ... Vollladezyklen des elektrischen Speichers
- $W_{max,el.SP}$... maximale Speicherkapazität des elektrischen Speichers

Die Kosten des elektrischen Speichers pro kWh $C_{kWh,el.SP}$ werden mit 0,15 €/kWh angenommen, da sich ein elektrischer Speicher bei diesen Kosten rechnet (siehe Abbildung 24). Betragen die Investitionskosten eines elektrischen Speicher $C_{IK,el.SP} = 4200 \text{ €}$,

ergibt das einen Speicherpreis von $C_{kWh,el.SP.} = 0,15 \text{ €/kWh}$, dieser elektrische Speicher zahlt sich bei einem Strompreis von $0,20 \text{ €/kWh}$ wie in Abbildung 24 dargestellt, in dem dezentralen Energiesystem aus. Je geringer die Investitionskosten $C_{IK,el.SP.}$ sind, desto mehr Kosten werden durch den elektrischen Speicher gespart.

6.2 Szenario B: Elektrisches System + Warmwasserbedarf

In diesem Szenario wird analysiert welche Erzeuger und Energiequellen am kostengünstigsten sind, um den elektrischen Energiebedarf und den Warmwasserbedarf eines Einfamilienhaushalts zu decken. Außerdem wird ermittelt, wie groß die optimale Größe der Solarthermieanlage ist, um den benötigten Warmwasserbedarf zu erzeugen. In diesem Szenario werden nur der elektrische Verbrauch und der Warmwasserbedarf berücksichtigt, der Wärme- und Kältebedarf des Raumklimas wird mit Null festgelegt. Da keine Kälteenergie notwendig ist, fallen auch keine Kosten für die Klimaanlage und den Kältespeicher an. Als thermischer Kurzzeitspeicher wird ein 300 Liter Warmwasserspeicher verwendet. Ein thermischer Langzeitspeicher wird in diesem Szenario keiner verwendet, da der thermische Langzeitspeicher nur zum Heizen der Raumwärme im dezentralen Energiesystem vorgesehen ist.

In der Tabelle 4 sind für die Analyse relevanten Annahmen der Komponenten für dieses Szenario dargestellt.

Tabelle 4: Relevante Annahmen der Komponenten (elektrischer Teil und Warmwasser) [2] [5] [9] [13] [15] [17] [18]

Technologie	C_{IK}	C_{BK}	$C_{pro kWh}$	T	Anmerkungen
-	€	€/a	€/kWh	a	-
elektrischer Speicher	4200	-	-	variabel	Speicherkosten $0,15 \text{ €/kWh}$
Fernwärme	9552	120	0,09	30	-
Gasheizung	5000	290	0,06	20	-
Kurzzeitwärmespeicher	800	-	-	20	300 Liter
Photovoltaikanlage	14000	210	-	25	7 kWp
Solarthermieanlage	4500	67,5	-	25	6 m ²
Strom (Kaufpreis)	-	-	0,2	-	-
Strom (Verkaufspreis)	-	-	-0,035	-	-
Wärmepumpe	15000	100	-	25	-

Die Größe $C_{pro,kWh}$ stellt in Tabelle 4 für die Fernwärme und die Gasheizung den Arbeitspreis dar.

Mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren f kann wiederum der Leistungsfluss im dezentralen Energiesystem beeinflusst werden. Damit die getroffenen Einstellungen der unterschiedlichen Gewichtungen der Optimierungsvariablen nachvollziehbar sind, ist in Abbildung 26 das schematische Modell dieses Szenarios dargestellt.

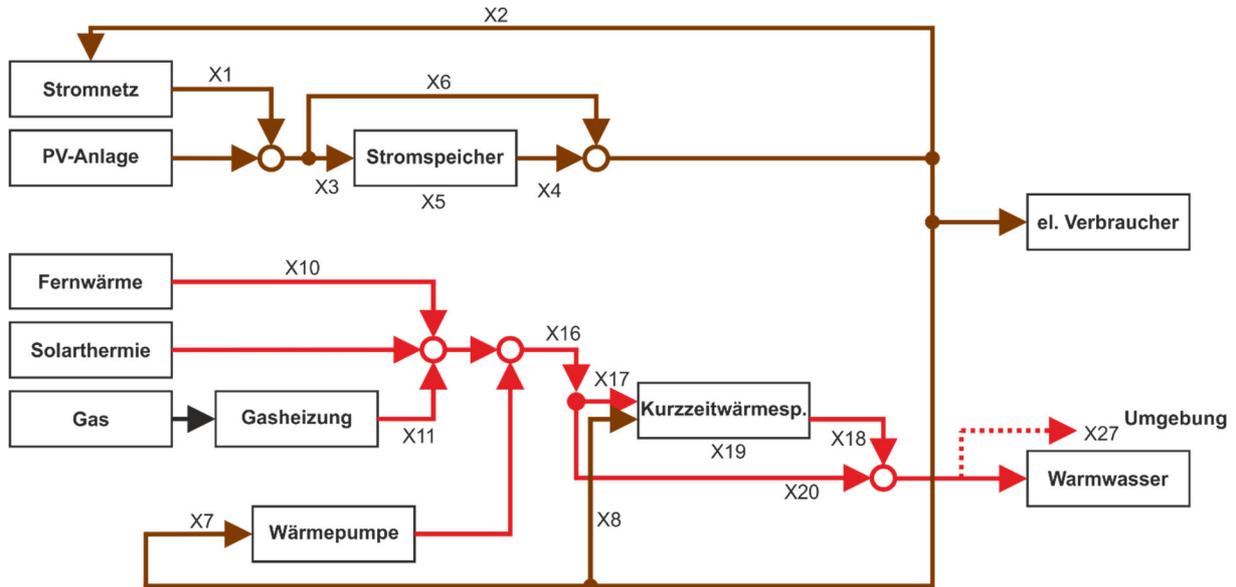


Abbildung 26: Angepasstes, schematisches Modell (elektrischer Stromkreis und Warmwasser)

Die Gewichtungsfaktoren der Optimierungsvariablen, werden in diesem Szenario so gewählt, dass der elektrische Speicher Priorität hat ($f(X3) < f(X2)$). Bekommt der elektrische Speicher keine Priorität durch die Gewichtung der einzelnen Optimierungsvariablen, wird der Verkauf elektrischer Energie in das elektrische Netz von der Optimierung bevorzugt. Befindet sich kein elektrischer Speicher im dezentralen Energiesystem, fällt diese Priorität weg. Wie im Szenario A (Elektrischer Stromkreis), wird zuerst der elektrische Speicher geladen, erst nachdem der elektrische Speicher vollgeladen ist, wird die elektrische Energie verkauft.

Befindet sich eine Wärmepumpe im dezentralen Energiesystem, wird die überschüssige von der Photovoltaikanlage erzeugte elektrische Energie nicht sofort verkauft, wenn der elektrische Speicher vollgeladen ist, sondern zur Wärmepumpe geführt ($f(X3) < f(X7) < f(X2)$). Erst wenn der thermische Kurzzeitspeicher und der elektrische Speicher vollgeladen sind, wird die überschüssige elektrische Energie verkauft.

Es wird jeweils ein Jahr mit unterschiedlichen Erzeugern und Energiequellen im dezentralen Energiesystem simuliert. Die daraus resultierenden jährlichen Gesamtkosten sind in Abbildung 27 dargestellt.

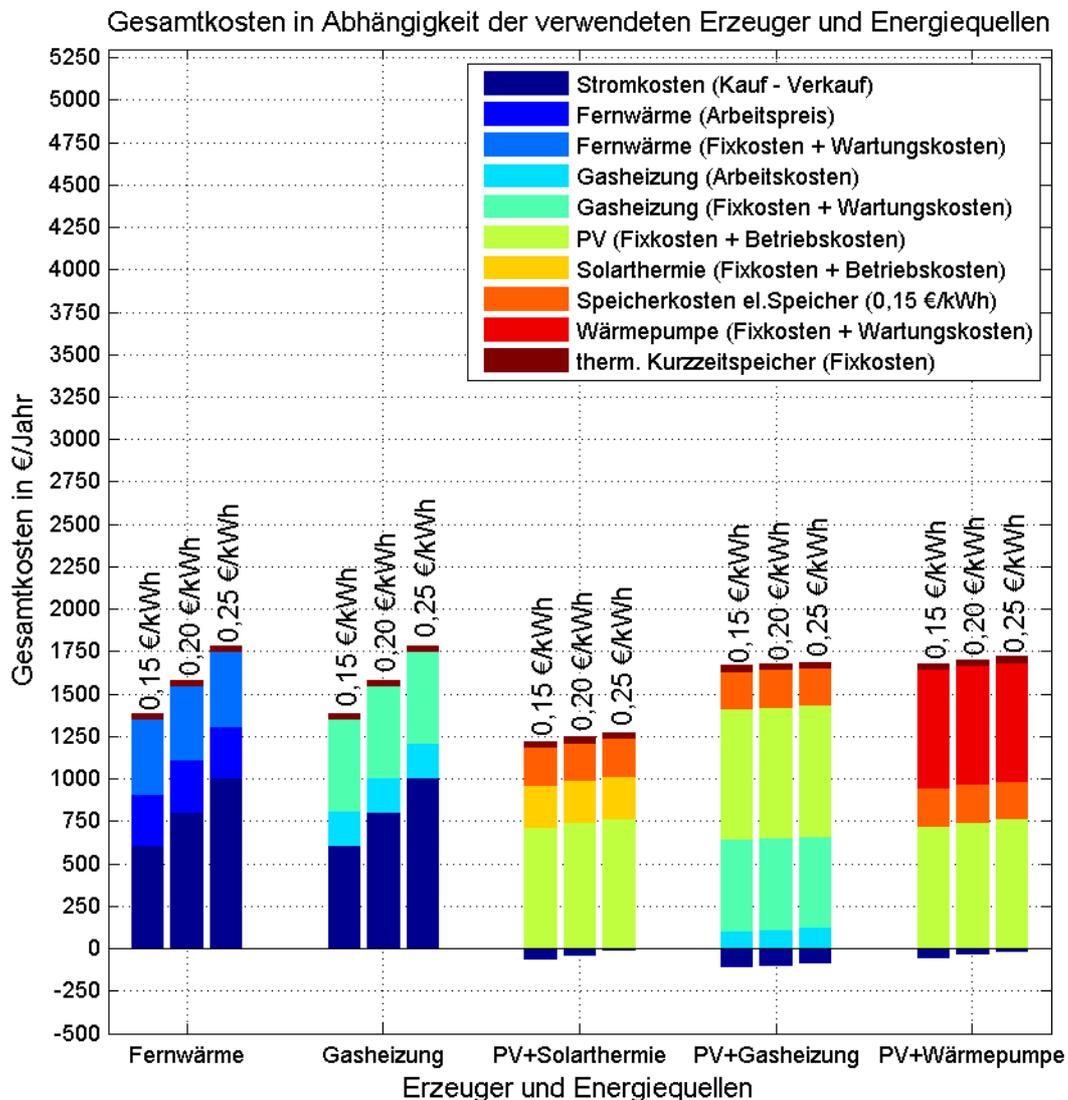


Abbildung 27: Gesamtkosten in Abhängigkeit der verwendeten Erzeuger und Energiequellen (Elektrische und Warmwasserenergie)

In Abbildung 27 sind jeweils drei Balken pro Kategorie dargestellt, der erste Balken ergibt sich bei einem Strompreis von 0,15 €/kWh, beim mittleren Balken wird der Strompreis mit 0,20 €/kWh, beim letzten Balken wird der Strompreis mit 0,25 €/kWh angenommen. Je höher der Strompreis ist, desto höher sind die anfallenden Gesamtkosten.

In der Abbildung 27 ist zu erkennen, dass einige Balken aus dem negativen Bereich starten. Dies ist der Fall, wenn der Verkauf elektrischer Energie vom Netz mehr Gewinn erzielt, als der Kauf elektrischer Energie aus dem elektrischen Netz Kosten verursacht, in diesem Fall sind daher die Stromkosten negativ. Bei einem elektrischen Energiepreis von 0,2 €/kW ist von

diesen fünf in Abbildung 27 dargestellten Kategorien, die Photovoltaikanlage (PV) in Kombination mit der Solarthermieanlage (Solaranlage) am günstigsten. Die jährlichen Gesamtkosten dieser Kombination (Photovoltaikanlage und Solarthermieanlage) betragen in etwa 1250 €.

Befindet sich eine Photovoltaikanlage im dezentralen Energiesystem, wird in den durchgeführten Simulationen auch ein elektrischer Speicher im dezentralen Energiesystem angenommen. Die Speichergröße des elektrischen Speichers wird mit 7 kWh (DoD = 0,8) sowie die Speicherkosten des elektrischen Speichers werden mit 0,15 €/kWh angenommen.

Die günstigste Möglichkeit, den benötigten elektrischen und thermischen Energiebedarf zu decken, ergibt sich wie zuvor schon erwähnt, aus einer Kombination von Photovoltaikanlage, elektrischem Speicher und Solarthermieanlage. Ob eine 6-m²-Solarthermieanlage die kostengünstigste Lösung ist um den Warmwasserbedarf zu decken oder eine andere Anlagengröße geeigneter wäre, kann mit Hilfe von Abbildung 28 geklärt werden.

In Abbildung 28 sind die jährlichen Gesamtkosten in Abhängigkeit der Solarthermieanlagen-größe dargestellt.

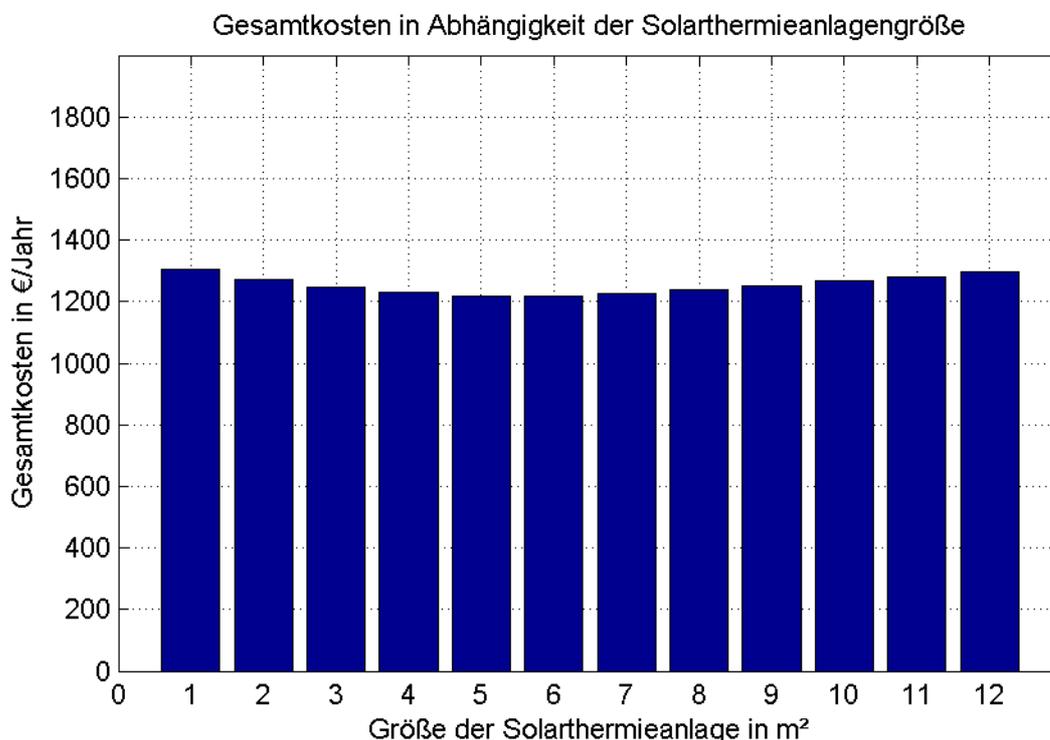


Abbildung 28: Jahreskosten in Abhängigkeit von der Solarthermieanlagengröße

In Abbildung 28 ist zu erkennen, dass die Solarthermieanlage mit einer Größe von 6 m², bei einem Warmwasserbedarf von 160 Liter (40 Liter pro Person) mit jährlichen Gesamtkosten von circa 1200 €, die kostengünstigste Lösung ist.

6.3 Szenario C: Gesamtsystem ohne Kühlbedarf

In diesem Szenario werden alle thermischen und elektrischen Verbraucher, bis auf die Raumkälte, im Simulationsmodell berücksichtigt. Kosten für Klimaanlage und Kältespeicher fallen keine an, da der Kältebedarf mit Null festgelegt wird. Als thermischer Kurzzeitspeicher wird ein 300 Liter Warmwasserspeicher verwendet. Mit Hilfe dieses Szenarios wird analysiert, unter welchen Umständen (Speicherkosten und Wirkungsgrad) sich ein thermischer Langzeitspeicher in einem dezentralen Energiesystem rechnet.

Damit die getroffenen Einstellungen der unterschiedlichen Gewichtungen der Optimierungsvariablen nachvollziehbar sind, ist in Abbildung 29 das schematische Modell dieses Szenarios dargestellt.

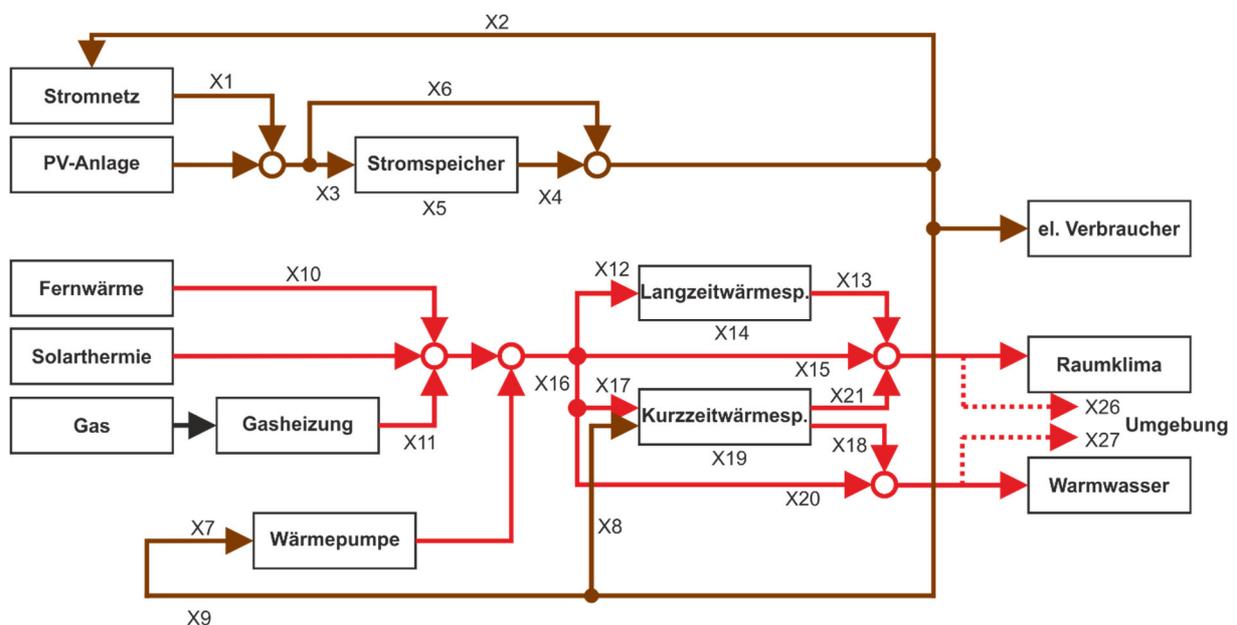


Abbildung 29: Angepasstes, schematisches Modell (elektrischer Stromkreis und gesamter Wärmebedarf)

Der thermische Langzeitspeicher (Langzeitwärmespeicher) ist im schematischen Modell, in Abbildung 29 bereits eingezeichnet, wird jedoch erst in den Kapiteln 6.3.2 und 6.3.3 verwendet.

6.3.1 Verschiedene Kombinationen (Erzeuger und Energiequellen)

Es werden verschiedene Erzeuger und Energiequellen, ohne thermischen Langzeitspeicher im Simulationsmodell simuliert. In der Tabelle 4 sind für die Analyse relevanten Annahmen der Komponenten für dieses Szenario dargestellt.

Tabelle 5: Relevante Annahmen der Komponenten (elektrischer Stromkreis und gesamter Wärmebedarf)
[2] [5] [9] [13] [15] [17] [18]

Technologie	C_{IK}	C_{BK}	$C_{pro kWh}$	T	Anmerkungen
-	€	€/a	€/kWh	a	-
elektrischer Speicher	4200	-	-	variabel	Speicherkosten 0,15 €/kWh
Fernwärme	9552	120	0,09	30	-
Gasheizung	5000	290	0,06	20	-
Kurzzeitwärmespeicher	800	-	-	20	300 Liter
Photovoltaikanlage	14000	210	-	25	7 kWp
Solarthermieanlage	4500	67,5	-	25	6 m ²
Strom (Kaufpreis)	-	-	0,2	-	-
Strom (Verkaufspreis)	-	-	-0,035	-	-
Wärmepumpe	15000	100	-	25	-

Der elektrische Speicher hat gegenüber dem Netz wie in Szenario B (elektrischer Stromkreis und Warmwasserbedarf) Priorität ($f(X3) < f(X2)$). Befindet sich eine Wärmepumpe im dezentralen Energiesystem, wird bei einem durch die Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Energieüberschuss zuerst der elektrische Speicher gefüllt. Wenn der elektrische Speicher voll ist, wird die gesamte elektrische Energie der Wärmepumpe zugeführt, bis der thermische Kurzzeitspeicher voll ist. Erst wenn beide Speicher (elektrischer Speicher, thermischer Kurzzeitspeicher) voll sind, wird die durch die Photovoltaikanlage erzeugte überschüssige elektrische Energie verkauft ($f(X3) < f(X7) < f(X2)$).

In Abbildung 30 sind die jährlichen Gesamtkosten in Abhängigkeit der verwendeten Erzeuger und Energiequellen dargestellt.

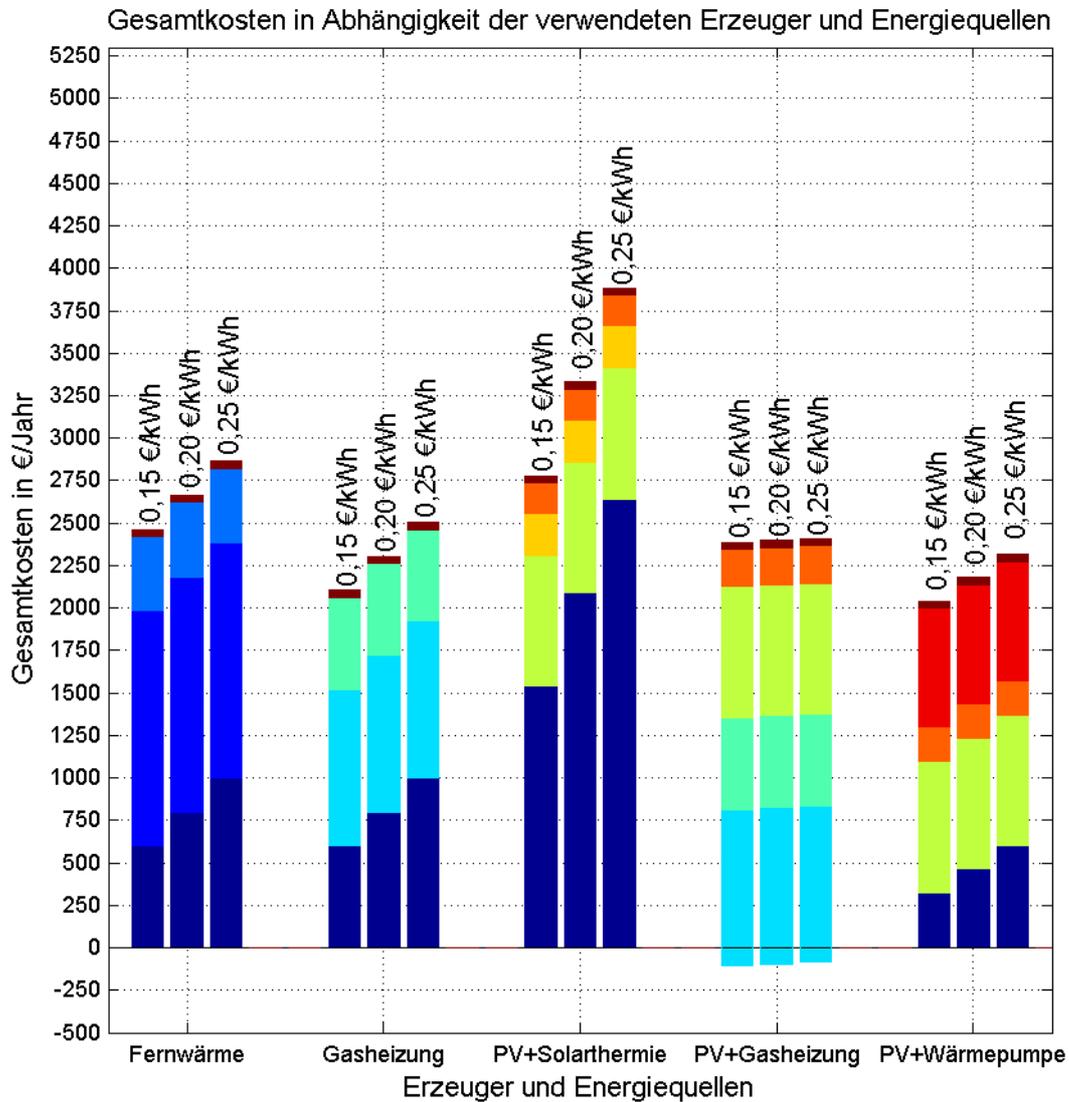


Abbildung 30: Gesamtkosten in Abhängigkeit der verwendeten Erzeuger und Energiequellen (Elektrische und gesamte Wärmeenergie)

In Abbildung 30 sind jeweils drei Balken pro verwendete Kombination dargestellt. Die drei Balken ergeben sich aufgrund unterschiedlicher Strompreise. Der erste Balken wird mit einem

Strompreis von 0,15 €/kWh, der zweite mit 0,20 €/kWh und der dritte mit 0,25 €/kWh berechnet. Wird der elektrische Teil und der gesamte thermische Wärmekreis des dezentralen Energiesystems betrachtet (Strompreis von 0,20 €/kWh), sind die jährlichen Gesamtkosten der Kombination Photovoltaikanlage, elektrischer Speicher und Wärmepumpe am geringsten. Betrachtet man die Kombination Photovoltaikanlage, Gasheizung und elektrischer Speicher, sind die jährlichen Gesamtkosten in etwa 200 € höher, jedoch besteht der Vorteil dieser Kombination darin, dass die jährlichen Gesamtkosten nahezu unabhängig vom Strompreis sind.

Die jährlichen Gesamtkosten der Kombination Solarthermieanlage, Photovoltaikanlage und elektrischer Speicher, sind deshalb so hoch, weil die ausgewählte Solarthermieanlage mit einer Größe von 6 m² nur einen geringen Teil der gesamten benötigten thermischen Energie erzeugen kann. Die restliche notwendige thermische Energie wird direkt im thermischen Kurzzeitspeicher mit einem Heizelement erzeugt. Den größten Teil der jährlichen Gesamtkosten verursacht daher, die benötigte elektrische Energie des Heizelements. Wird eine größere Solarthermieanlage verwendet, werden die jährlichen Gesamtkosten geringer, da das Heizelement weniger elektrische Energie benötigt.

6.3.2 Kombination aus Photovoltaikanlage, Solarthermieanlage, elektrischem Speicher und thermischem Langzeitspeicher

In diesem Kapitel wird die Kombination aus Photovoltaikanlage, Solarthermieanlage, elektrischem Speicher und thermischem Langzeitspeicher analysiert. Zum Heizen von Trinkwasser und den Räumen wird jährlich eine thermische Energie von etwa 15400 kWh benötigt, damit dieser thermische Energiebedarf von der Solarthermieanlage gedeckt werden kann, muss die Solarthermieanlage 15400 kWh thermische Energie, plus auftretende Speicherverluste der thermischen Speicher, im Jahr erzeugen. Eine Solarthermieanlage mit einem Wirkungsgrad von 50 % produziert in Graz etwa 730 kWh/m²a. In Formel (42) wird berechnet, wie groß eine Solarthermieanlage sein muss, um circa 15400 kWh thermische Energie zu erzeugen [26].

$$A_{SA} = \frac{W_{pro\ Jahr, RW} + W_{pro\ Jahr, WW}}{W_{pro\ Jahr\ m^2, SA}} = \frac{12000\ kWh/a + 3378\ kWh/a}{730\ kWh/m^2a} = \underline{\underline{21,07\ m^2}} \quad (42)$$

A_{SA}	... Installierte Kollektorfläche der Solarthermieanlage
$W_{pro\ Jahr, RW}$	... Raumwärmebedarf pro Jahr
$W_{pro\ Jahr, WW}$	... Benötigte thermische Warmwasserenergie pro Jahr
$W_{pro\ Jahr\ m^2, SA}$	... Erzeugung der Solarthermieanlage pro Quadratmeter und Jahr

Wird der Wirkungsgrad im Zusammenhang mit einem thermischen Langzeitspeicher erwähnt, bezieht sich dieser Wirkungsgrad, wenn nicht explizit anders erwähnt, auf ein Jahr.

Damit die benötigte thermische Energie vollständig von der Solarthermieranlage erzeugt wird, muss die Größe der Solarthermieranlage zumindest auf 22 m² erhöht werden. Zusätzlich zur Solarthermieranlage wird ein idealer thermischer Langzeitspeicher (100 % Wirkungsgrad) mit einer maximalen Speicherkapazität von 8000 kWh in das dezentrale Energiesystem hinzugefügt. In Abbildung 31 sind die jährlichen Gesamtkosten des dezentralen Energiesystems mit einem idealen thermischen Langzeitspeicher dargestellt. Die Kosten des thermischen Langzeit-speichers sind in Abbildung 31 nicht berücksichtigt.

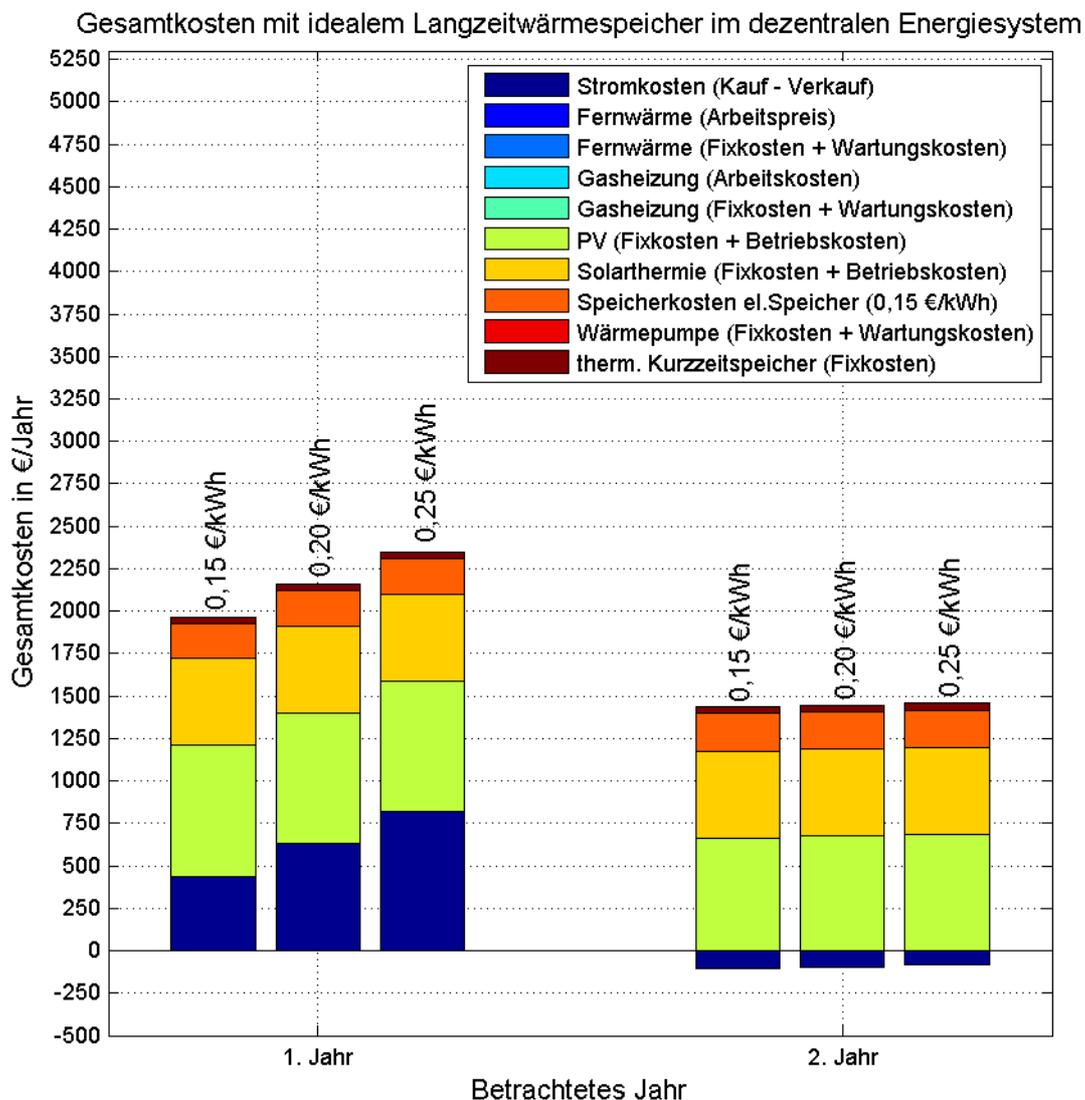


Abbildung 31: Gesamtkosten (PV+Solarthermie) mit einem idealen Langzeitwärmespeicher (Wirkungsgrad 100 %), Solarthermieranlage 22 m²

Im ersten Jahr, in dem der thermische Langzeitspeicher verwendet wird, sind die jährlichen Gesamtkosten im dezentralen System relativ hoch, da der thermische Langzeitspeicher erst

geladen werden muss. Die fehlende thermische Energie wird mit einem Heizelement im thermischen Kurzzeitspeicher erzeugt. Am Ende des ersten Jahres hat der thermische Langzeitspeicher 4162,8 kWh thermische Energie gespeichert, deshalb wird der Startwert des thermischen Langzeitspeichers im zweiten Jahr auf 4162,8 kWh gestellt. Die jährlichen Gesamtkosten sind im zweiten und allen darauffolgenden Jahren deutlich geringer als im ersten Jahr, da bereits am Jahresanfang thermische Energie im thermischen Langzeitspeicher vorhanden ist. Die jährlichen Gesamtkosten im ersten Jahr $C_{1,\text{Jahr,LS}}$ betragen, bei einem Strompreis von 0,20 €/kWh, 2158,8 €/a. Im zweiten Jahr ergeben sich jährliche Gesamtkosten $C_{1,\text{Jahr,LS}}$ in Höhe von 1447,1 €/a.

Die jährlichen Gesamtkosten ohne thermischen Langzeitspeicher sind bei einem Strompreis von 0,20 €/kWh bei allen betrachteten Kombinationen in Abbildung 30 höher als 2000 €. Mit einem idealen thermischen Thermischer Langzeitspeicher und einer Solarthermieanlage mit 22 m², sind jährliche Gesamtkosten unter 2000 € möglich.

Es ist schwer die Investitionskosten für einen thermischen Langzeitspeicher anzunehmen (bisher wenig Projekte), daher werden in dieser Masterarbeit die maximalen erlaubten Investitionskosten eines thermischen Langzeitspeichers berechnet. Wie hoch die maximal erlaubten Investitionskosten eines thermischen Langzeitspeichers sein dürfen, damit sich der thermische Langzeitspeicher gegenüber der Kombination PV+Wärmepumpe ohne thermischen Langzeitspeicher (Abbildung 30) im dezentralen Energiesystem rechnet, hängt von der Lebensdauer $T_{\text{th,LS}}$ und den jährlichen Kosteneinsparungen durch den thermischen Langzeitspeicher ab. Die jährlichen Kosteneinsparungen oder Zusatzkosten durch den thermischen Langzeitspeicher werden in Formel (43) und (44) berechnet.

$$C_{KE,th,LS,1.\text{Jahr}} = C_{\text{gesamt,pro Jahr,PV+WP}} - C_{1,\text{Jahr,LS}} = 2178,3 \text{ €} - 2158,8 \text{ €} = \underline{\underline{19,5 \text{ €}}} \quad (43)$$

$C_{1,\text{Jahr,LS}}$... Gesamtkosten im 1. Jahr mit einem thermischen Langzeitspeicher
 $C_{\text{gesamt,pro Jahr,PV+WP}}$... jährlichen Gesamtkosten mit Photovoltaik und Wärmepumpe
 $C_{KE,th,LS,1.\text{Jahr}}$... Kosteneinsparungen durch Langzeitwärmespeicher (1. Jahr)

$$C_{KE,th,LS,2.\text{Jahr}} = C_{\text{gesamt,pro Jahr,PV+WP}} - C_{2,\text{Jahr,LS}} = 2178,3 \text{ €} - 1447,1 \text{ €} = \underline{\underline{731,2 \text{ €}}} \quad (44)$$

$C_{2,\text{Jahr,LS}}$... Gesamtkosten im 2. Jahr mit einem thermischen Langzeitspeicher
 $C_{\text{gesamt,pro Jahr,PV+WP}}$... jährlichen Gesamtkosten mit Photovoltaik und Wärmepumpe
 $C_{KE,th,LS,2.\text{Jahr}}$... Kosteneinsparungen durch Langzeitwärmespeicher (Folgejahre)

Die Investitionskosten eines idealen thermischen Langzeitspeichers mit einer Lebensdauer $T_{th,LS}$ von 30 Jahren müssen unter 21224 € liegen, damit sich der ideale thermische Langzeitspeicher im dezentralen Energiesystem rentiert (siehe Formel (45)).

$$C_{IK,max.th.LS} = C_{KE,th.LS,1.Jahr} + C_{KE,th.LS,2.Jahr} \cdot (T_{th.LS} - 1) \quad (45)$$

$$= 19,5 \text{ €} + 731,2 \text{ €} \cdot (30 \text{ a} - 1 \text{ a}) = \underline{\underline{21224 \text{ €}}}$$

$C_{IK,max.th.LS}$	... maximal erlaubte Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers
$C_{KE,th.LS,1.Jahr}$	... Kosteneinsparungen durch Langzeitwärmespeicher (1. Jahr)
$C_{KE,th.LS,2.Jahr}$	... Kosteneinsparungen durch Langzeitwärmespeicher (Folgejahre)
$T_{th,LS}$	... Lebensdauer des thermischen Langzeitwärmespeichers

Da bei Verwendung eines idealen thermischer Langzeitspeicher wie in Formel (45) berechnet, Kosteneinsparungen auftreten, müssen die Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers unter 21224 € liegen, wird nachfolgend ein realer thermischer Langzeitspeicher mit einem Wirkungsgrad von 50 % analysiert. Der Wirkungsgrad muss für das Simulationsmodell auf 15 Minuten umgerechnet werden (siehe Formel (46)).

$$\eta_{15 \text{ min},X14} = \exp \frac{\log(\eta_{Jahr,X14})}{96 \cdot 365} = \exp \frac{\log(0,5)}{35040} = \underline{\underline{0,9999541}} \quad (46)$$

$\eta_{15 \text{ min},X14}$	Wirkungsgrad des thermischen Langzeitspeichers pro 15 min
$\eta_{Jahr,X14}$	Wirkungsgrad des thermischen Langzeitspeichers pro Jahr

In Abbildung 32 sind die jährlichen Gesamtkosten des dezentralen Energiesystems, mit einem thermischen Langzeitspeicher (maximale Speicherkapazität 8000 kWh, 50 % Wirkungsgrad) dargestellt.

Gesamtkosten mit Langzeitwärmespeicher (50 % Wirkungsgrad) im dezentralen Energiesystem

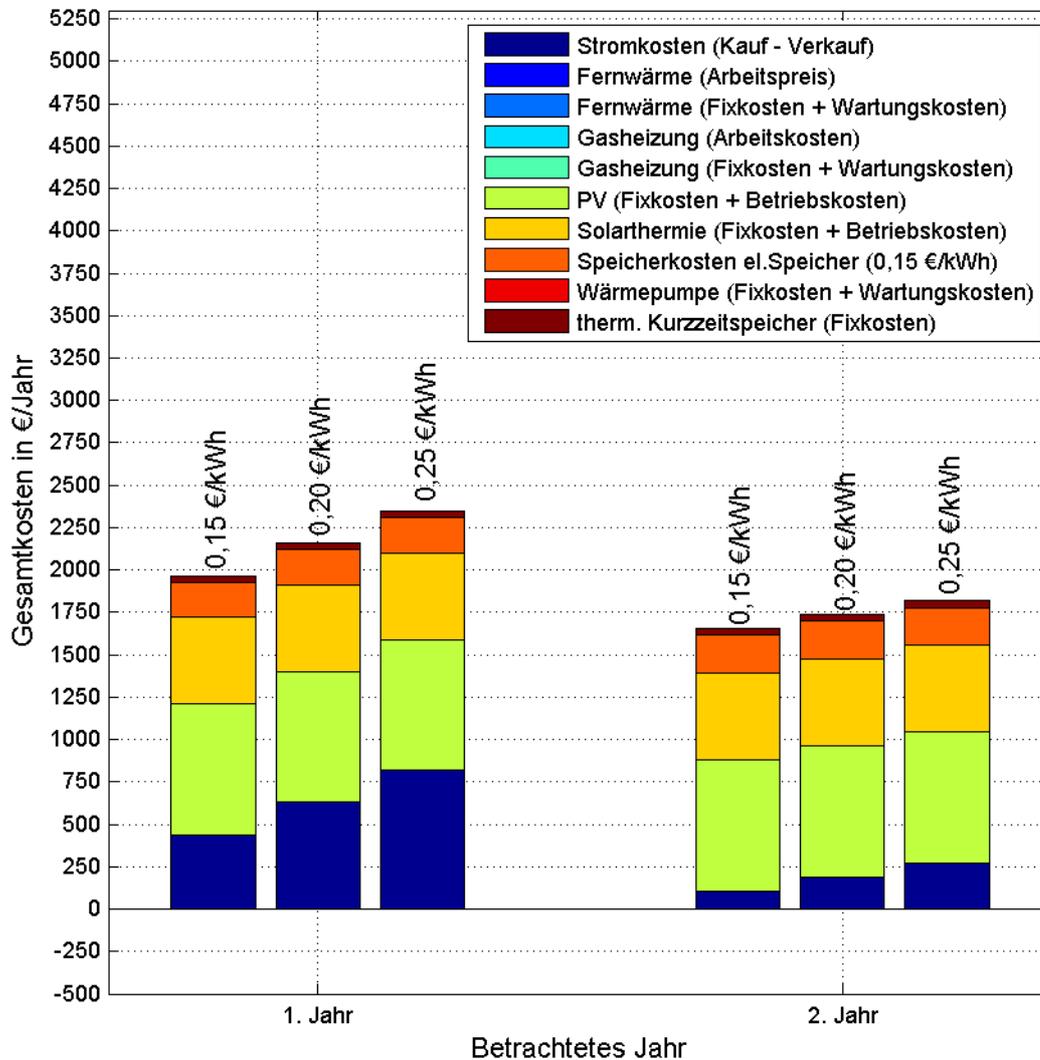


Abbildung 32: Gesamtkosten (PV+Solarthermie) mit einem Langzeitwärmespeicher (50 % Wirkungsgrad), Solarthermieanlage 22 m²

Wird ein thermischer Langzeitspeicher mit einem Wirkungsgrad von 50 % verwendet, reicht die erzeugte thermische Energie einer 22 m²-Solarthermieanlage nicht aus, um den gesamten thermischen Jahresbedarf zu decken. In Abbildung 32 erkennt man das daran, dass im zweiten Jahr Stromkosten anfallen. Die gekaufte elektrische Energie wird vom Heizelement im thermischen Kurzzeitspeicher benötigt, um thermische Energie für den Raumwärmebedarf zu erzeugen.

In Formel (47) und (48) werden die jährlichen Kosteneinsparungen oder Zusatzkosten berechnet.

$$C_{KE,th,LS,1.Jahr} = C_{gesamt,pro\ Jahr,PV+WP} - C_{1.Jahr,LS} = 2178,3\ € - 2158,8\ € = \underline{\underline{19,5\ €}} \quad (47)$$

$C_{1.Jahr,LS}$... Gesamtkosten im 1. Jahr mit einem thermischen Langzeitspeicher
 $C_{gesamt,pro\ Jahr,PV+WP}$... jährlichen Gesamtkosten mit Photovoltaik und Wärmepumpe
 $C_{KE,th,LS,1.Jahr}$... Kosteneinsparungen durch Langzeitwärmespeicher (1. Jahr)

$$C_{KE,th,LS,2.Jahr} = C_{gesamt,pro\ Jahr,PV+WP} - C_{2.Jahr,LS} = 2178,3\ € - 1737,3\ € = \underline{\underline{441\ €}} \quad (48)$$

$C_{2.Jahr,LS}$... Gesamtkosten im 2. Jahr mit einem thermischen Langzeitspeicher
 $C_{gesamt,pro\ Jahr,PV+WP}$... jährlichen Gesamtkosten mit Photovoltaik und Wärmepumpe
 $C_{KE,th,LS,2.Jahr}$... Kosteneinsparungen durch Langzeitwärmespeicher (Folgejahre)

Wird die Lebensdauer des thermischen Langzeitspeichers wie zuvor mit 30 Jahren angenommen, darf der thermische Langzeitspeicher maximal 12809 € Kosten, damit sich der thermische Langzeitspeicher rechnet (siehe Formel (49)).

$$C_{IK,max,th,LS} = C_{KE,th,LS,1.Jahr} + C_{KE,th,LS,2.Jahr} \cdot (T_{th,LS} - 1) \\ = 19\ € + 441\ € \cdot (30\ a - 1\ a) = \underline{\underline{12809\ €}} \quad (49)$$

$C_{IK,max,th,LS}$... maximal erlaubte Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers
 $C_{KE,th,LS,1.Jahr}$... Kosteneinsparungen durch Langzeitwärmespeicher (1. Jahr)
 $C_{KE,th,LS,2.Jahr}$... Kosteneinsparungen durch Langzeitwärmespeicher (Folgejahre)
 $T_{th,LS}$... Lebensdauer des Langzeitwärmespeichers

Die maximal erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers sind etwa um die Hälfte geringer, wenn der Wirkungsgrad des thermischen Langzeitspeichers anstatt von 100 % mit 50 % angenommen wird. In den beiden Simulationen, dessen jährliche Gesamtkosten in Abbildung 31 und Abbildung 32 dargestellt sind, ist die Solarthermieanlage gleich groß, daher werden die Speicherverluste des thermischen Langzeitspeichers (Wirkungsgrad 50 %) nicht gedeckt. Nachfolgend wird analysiert, ob sich eine größere Solarthermieanlage als 22 m² aus wirtschaftlicher Sicht auszahlt.

In Abbildung 33 sind die jährlichen Gesamtkosten mit einer 25 m²-Solarthermieanlage im dezentralen Energiesystem dargestellt.

Gesamtkosten mit Langzeitwärmespeicher (50 % Wirkungsgrad) im dezentralen Energiesystem

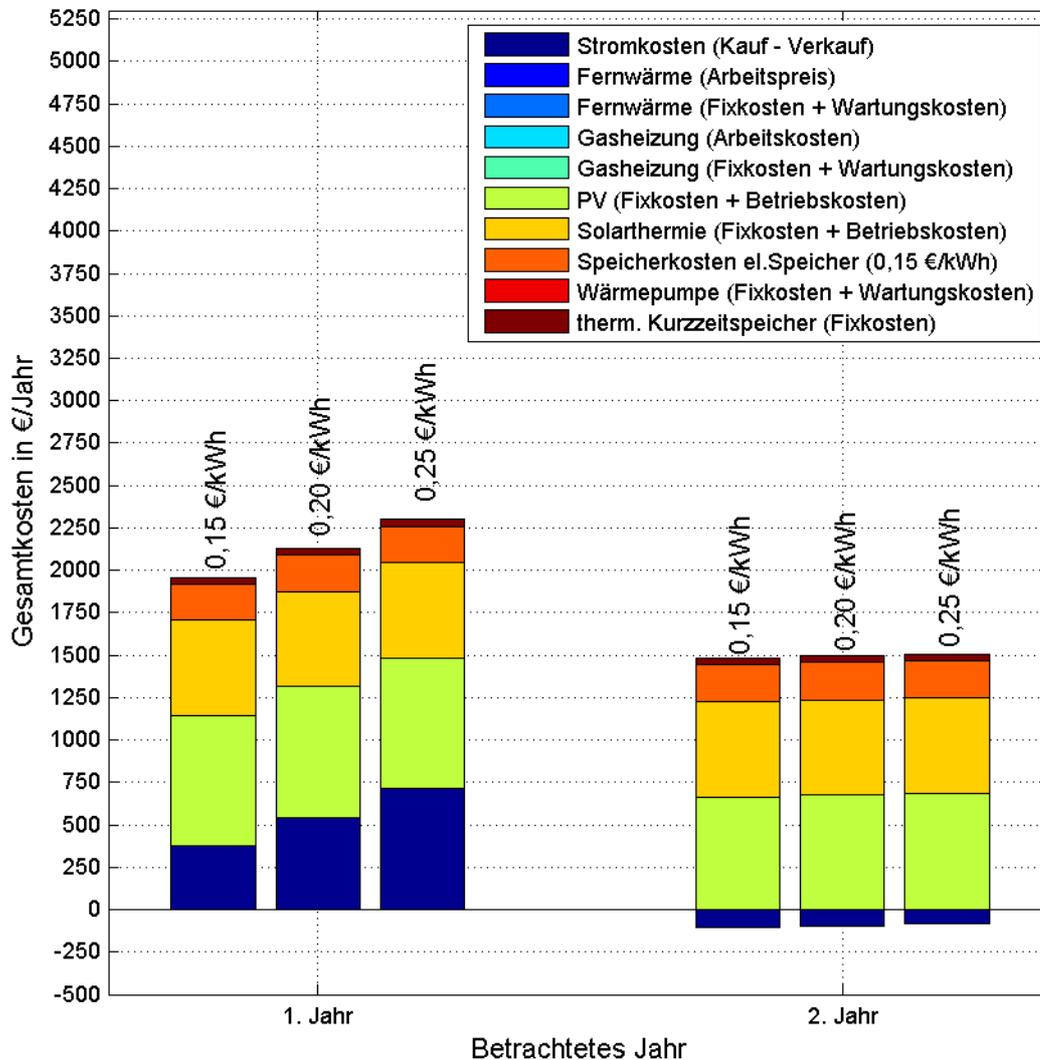


Abbildung 33: Gesamtkosten (PV+Solarthermie) mit einem Langzeitwärmespeicher (50 % Wirkungsgrad), Solarthermieanlage 25 m²

Wird die Größe der Solarthermieanlage auf 25 m² erhöht, reicht die erzeugte thermische Energie der Solarthermieanlage aus, um den gesamten jährlichen Wärmebedarf zu decken (außer im 1. Jahr). Dies erkennt man in Abbildung 33 daran, dass im zweiten Jahr keine Stromkosten anfallen.

In Formel (50) und (51) werden die Kosteneinsparungen durch den thermischen Langzeitspeicher mit einer 25 m²-Solarthermieranlage berechnet.

$$C_{KE,th,LS,1.Jahr} = C_{gesamt,pro\ Jahr,PV+WP} - C_{1.Jahr,LS} = 2178,3\ \text{€} - 2127,9\ \text{€} = \underline{\underline{50,4\ \text{€}}} \quad (50)$$

$C_{1.Jahr,LS}$... Gesamtkosten im 1. Jahr mit einem thermischen Langzeitspeicher
 $C_{gesamt,pro\ Jahr,PV+WP}$... jährlichen Gesamtkosten mit Photovoltaik und Wärmepumpe
 $C_{KE,th,LS,1.Jahr}$... Kosteneinsparungen durch Langzeitwärmespeicher (1. Jahr)

$$C_{KE,th,LS,2.Jahr} = C_{gesamt,pro\ Jahr,PV+WP} - C_{2.Jahr,LS} = 2178,3\ \text{€} - 1496,6\ \text{€} = \underline{\underline{681,7\ \text{€}}} \quad (51)$$

$C_{2.Jahr,LS}$... Gesamtkosten im 2. Jahr mit einem thermischen Langzeitspeicher
 $C_{gesamt,pro\ Jahr,PV+WP}$... jährlichen Gesamtkosten mit Photovoltaik und Wärmepumpe
 $C_{KE,th,LS,2.Jahr}$... Kosteneinsparungen durch Langzeitwärmespeicher (Folgejahre)

Die maximal erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers, bei einer Lebensdauer $T_{th,LS}$ von 30 Jahren, werden in Formel (52) berechnet.

$$C_{IK,max,th,LS} = C_{KE,th,LS,1.Jahr} + C_{KE,th,LS,2.Jahr} \cdot (T_{th,LS} - 1) \\ = 50,4\ \text{€} + 681,7\ \text{€} \cdot (30\ a - 1\ a) = \underline{\underline{19820\ \text{€}}} \quad (52)$$

$C_{IK,max,th,LS}$... maximal erlaubte Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers
 $C_{KE,th,LS,1.Jahr}$... Kosteneinsparungen durch Langzeitwärmespeicher (1. Jahr)
 $C_{KE,th,LS,2.Jahr}$... Kosteneinsparungen durch Langzeitwärmespeicher (Folgejahre)
 $T_{th,LS}$... Lebensdauer des Langzeitwärmespeichers

Die maximal erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers sind deutlich höher, wenn eine größere Solarthermieranlage ausgewählt wird (siehe Ergebnisse der Formel (49) und (52)). Aus wirtschaftlicher Sicht ist es daher sinnvoller, eine größere Solarthermieranlage im dezentralen Energiesystem zu verwenden. Aus der Formel (49) und (52) ist zu erkennen, dass bei einer Vergrößerung der Solarthermieranlage von 22 m² auf 25 m² sich die maximalen erlaubten Investitionskosten erhöhen.

In Abbildung 34 sind die maximal erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers in Abhängigkeit der Lebensdauer und mit unterschiedlichen Wirkungsgraden des thermischen Langzeitspeichers dargestellt.

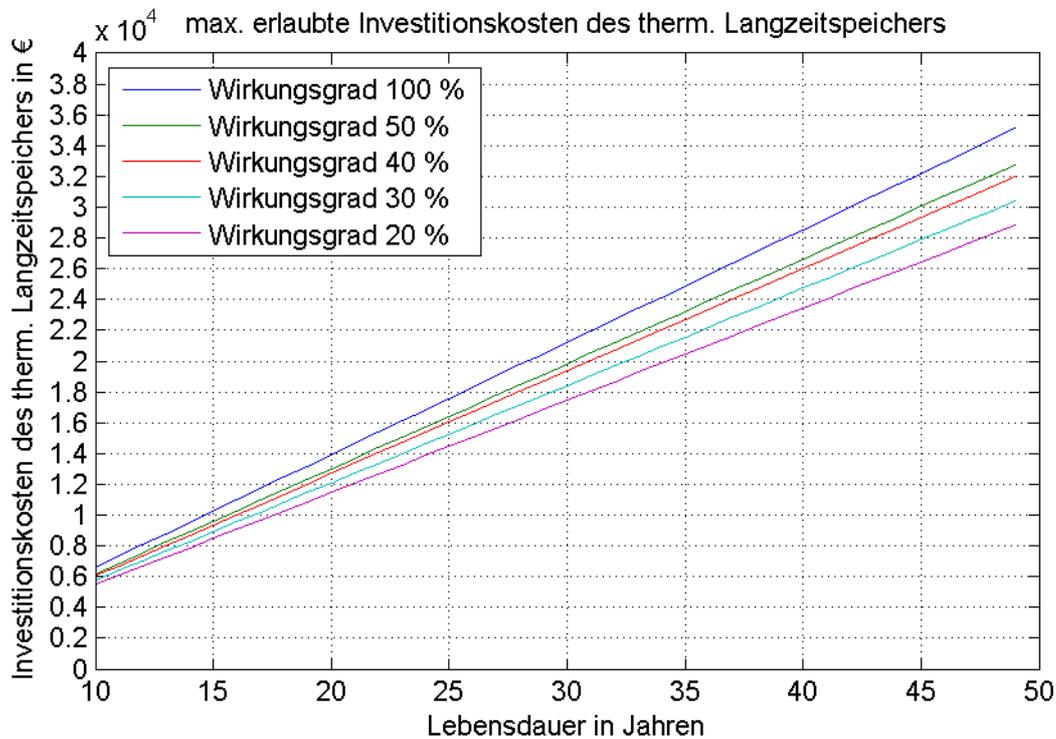


Abbildung 34: maximal erlaubte Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers in Abhängigkeit der Lebensdauer (PV+Solarthermie)

In Abbildung 34 erkennt man, dass die maximalen erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers mit zunehmender Lebensdauer des thermischen Langzeitspeichers ansteigen. Je geringer der Wirkungsgrad des thermischen Langzeitspeichers ist, desto geringer sind die maximal erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers. Die Größe der Solarthermieanlage wird je nach Wirkungsgrad des thermischen Langzeitspeichers angepasst, dadurch sind die maximal erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers, trotz schlechterem Wirkungsgrad, nicht wesentlich kleiner.

In Tabelle 6 sind die maximal erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers bei unterschiedlichen Wirkungsgraden des thermischen Langzeitspeichers $\eta_{\text{pro Jahr},X14}$ und verschiedener Größe der Solarthermieanlage A_{SA} dargestellt.

Tabelle 6: Auswertung des thermischen Langzeitspeichers (PV+Solarthermie)

$\eta_{\text{pro Jahr},X14}$	A_{SA}	$C_{KE,th,LS,1.Jahr}$	$C_{KE,th,LS,2.Jahr}$	$T_{th,LS}$	$C_{IK,max,th,LS}$	$W_{max,th,LS}$
-	m ²	€	€	Jahre	€	kWh
1	21	9	687,2	30	19938	6608
1	22	19,5	731,2	30	21224	7541
0,5	22	19,5	441	30	12809	5953
0,5	25	50,4	681,7	30	19820	7196
0,4	25	50,4	595	30	17305	6790
0,4	26	59,2	665,2	30	19350	7177
0,3	26	59,2	548,6	30	15969	6723
0,3	28	77,7	632,2	30	18412	7544
0,2	28	77,6	526,2	30	15337	6792
0,2	30	83,6	599,2	30	17460	7516

Reicht die Größe der Solarthermieanlage aus, um den gesamten thermischen Energiebedarf des dezentralen Energiesystems zu decken, wird die Zeile in der Tabelle 6 grau markiert. Kennt man den Wirkungsgrad des thermischen Langzeitspeichers, ist es mit Hilfe der Abbildung 34 und Tabelle 6 möglich abzuschätzen ob sich ein thermischer Langzeitspeicher in einem dezentralen Energiesystem aus wirtschaftlicher Sicht rentiert. Wie groß der zugehörige thermische Langzeitspeicher sein muss, ist in der Tabelle 6 in Spalte $W_{max,th,LS}$ dargestellt. Je größer die Verluste im thermischen Langzeitspeicher sind, desto größer muss die verwendete Solarthermieanlage sein.

Betragen die Investitionskosten eines thermischen Langzeitspeichers, mit einer maximalen Speicherkapazität von 8000 kWh und einem Wirkungsgrad von 30 % zum Beispiel $C_{IK,th,LS} = 15000$ €, spart man mit dem thermischen Langzeitspeicher in etwa $C_{KE,th,LS,30\text{ Jahre}} = 3400$ € in 30 Jahren gegenüber der Kombination Photovoltaikanlage und Wärmepumpe ohne thermischen Langzeitspeicher (siehe Formel (53)).

$$C_{KE,th,LS,30\text{ Jahre}} = C_{IK,max,th,LS} - C_{IK,th,LS} = 18412 \text{ €} - 15000 \text{ €} = \underline{\underline{3412 \text{ €}}} \quad (53)$$

- $C_{IK,max,th,LS}$... maximal erlaubte Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers
- $C_{IK,th,LS}$... Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers
- $C_{KE,th,LS,30\text{ Jahre}}$... Kosteneinsparung durch einen thermischen Langzeitspeicher (in 30 Jahren)

6.3.3 Kombination aus Photovoltaikanlage, Wärmepumpe, elektrischem Speicher und thermischem Langzeitspeicher

In diesem Kapitel wird mit Hilfe des Simulationsmodells analysiert, ob sich ein thermischer Langzeitspeicher in der Kombination Photovoltaikanlage, Wärmepumpe und elektrischer Speicher auszahlt. Es werden die maximal erlaubten Investitionskosten in Abhängigkeit des Wirkungsgrades und der Lebensdauer des thermischen Langzeitspeichers ermittelt. Zuerst wird ein idealer thermischer Langzeitspeicher (100 % Wirkungsgrad) im dezentralen Energiesystem angenommen. Die resultierenden jährlichen Gesamtkosten der Kombination Photovoltaikanlage, Wärmepumpe und elektrischer Speicher mit einem idealen thermischen Langzeitspeicher sind in Abbildung 35 dargestellt.

Gesamtkosten mit Langzeitwärmespeicher (100 % Wirkungsgrad) im dezentralen Energiesystem

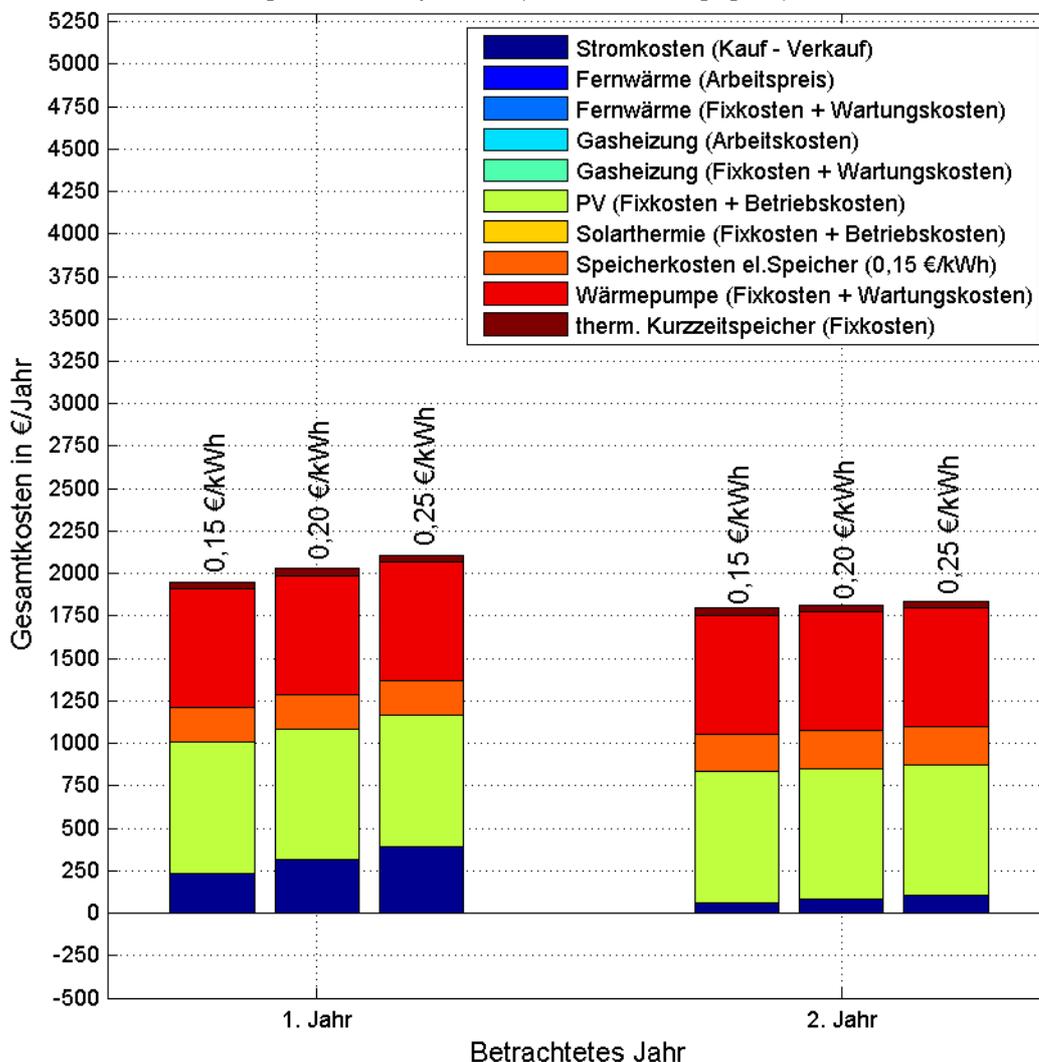


Abbildung 35: Gesamtkosten (PV+Wärmepumpe) mit einem idealen thermischen Langzeitspeicher

Im ersten Simulationsjahr ist der thermische Langzeitspeicher noch leer, daher wird mehr elektrische Energie benötigt, um den thermischen Energiebedarf zu decken, deswegen sind

die jährlichen Gesamtkosten im ersten Jahr etwas höher sind als in den darauffolgenden Jahren (2. Jahr). Befindet sich ein idealer thermischer Langzeitspeicher im dezentralen Energiesystem in der Kombination Photovoltaikanlage, elektrischer Speicher und Wärmepumpe, sinken die jährlichen Gesamtkosten des dezentralen Energiesystems (Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers nicht berücksichtigt).

Ändert sich der Wirkungsgrad des thermischen Langzeitspeichers, ändern sich auch die Gesamtkosten des dezentralen Energiesystems. In Abbildung 36 sind die jährlichen Gesamtkosten bei einem Wirkungsgrad von 30 % dargestellt.

Gesamtkosten mit Langzeitwärmespeicher (30 % Wirkungsgrad) im dezentralen Energiesystem

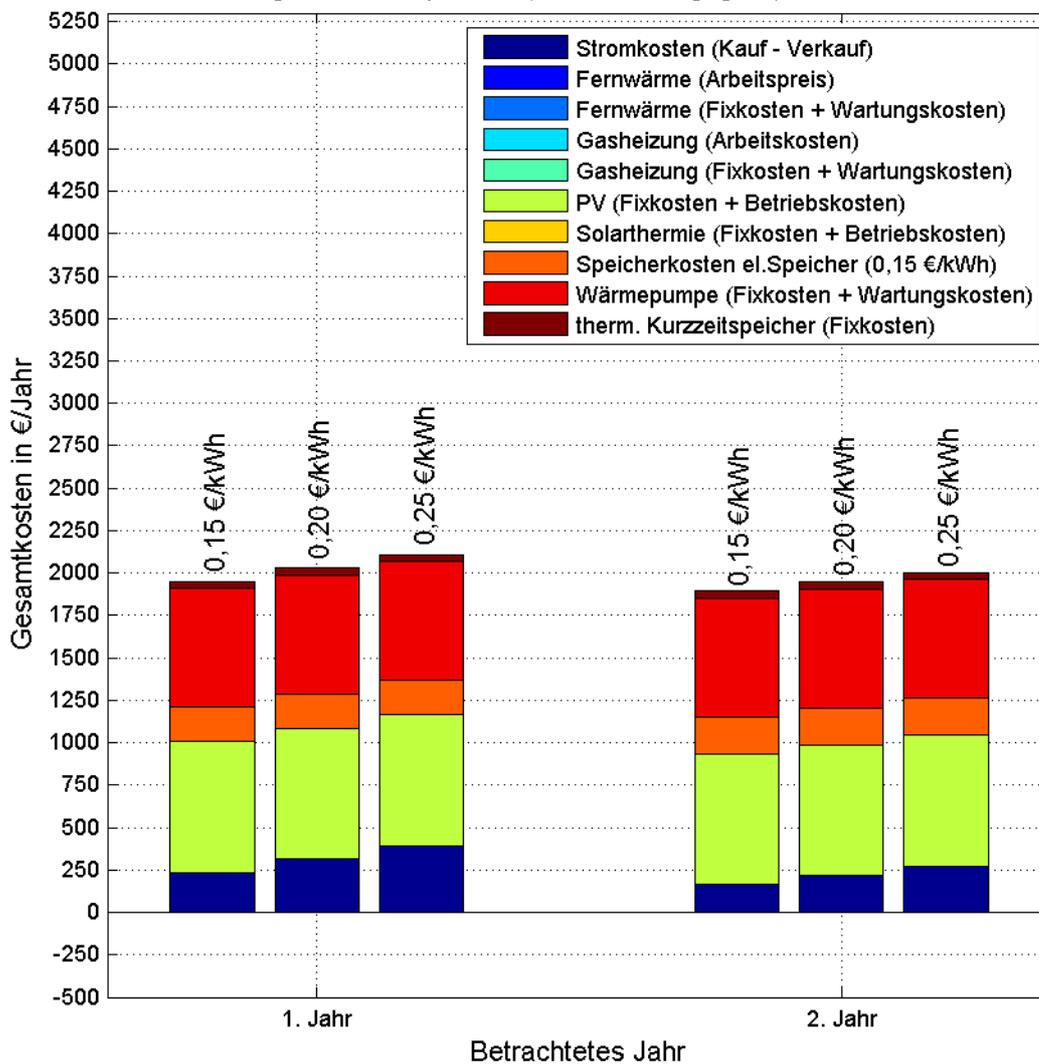


Abbildung 36: Gesamtkosten (PV+Wärmepumpe) mit einem thermischen Langzeitspeicher (30 % Wirkungsgrad)

Bei einem Wirkungsgrad des thermischen Langzeitspeichers von 30 %, steigen die jährlichen Gesamtkosten gegenüber einem thermischen Langzeitspeicher mit einem Wirkungsgrad von 100 % an. Die Verluste im thermischen Langzeitspeicher bei einem Wirkungsgrad von 30 %

sind deutlich höher als bei einem Wirkungsgrad von 100 %, daher steht im 2. Jahr deutlich weniger thermische Energie zur Verfügung. Es muss elektrische Energie aus dem elektrischen Netz gekauft werden, damit die Wärmepumpe den thermischen Energiebedarf decken kann. Wie viel ein thermischer Langzeitspeicher in Abhängigkeit des Wirkungsgrades, bei einer Lebensdauer des thermischen Langzeitspeichers $T_{th,LS}$ von 30 Jahren maximal kosten darf, sowie die dazu notwendige maximale Speichergröße des thermischen Langzeitspeichers ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Auswertung des thermischen Langzeitspeichers (PV+Wärmepumpe) mit elektrischem Speicher

$\eta_{pro\ Jahr, X14}$	$T_{th,LS}$	$C_{IK,max.th.LS}$	$W_{max,th.LS}$
	Jahre	€	kWh
1	30	10658	10658
0,5	30	8566	8190
0,4	30	7705	7782
0,3	30	6850	7294
0,2	30	5860	6669

Zur Berechnung der maximal erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers $C_{IK,max.th.LS}$ siehe Kapitel 6.3.2.

In Abbildung 37 sind die maximal erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers in Abhängigkeit des Wirkungsgrades und der Lebensdauer des thermischen Langzeitspeichers dargestellt.

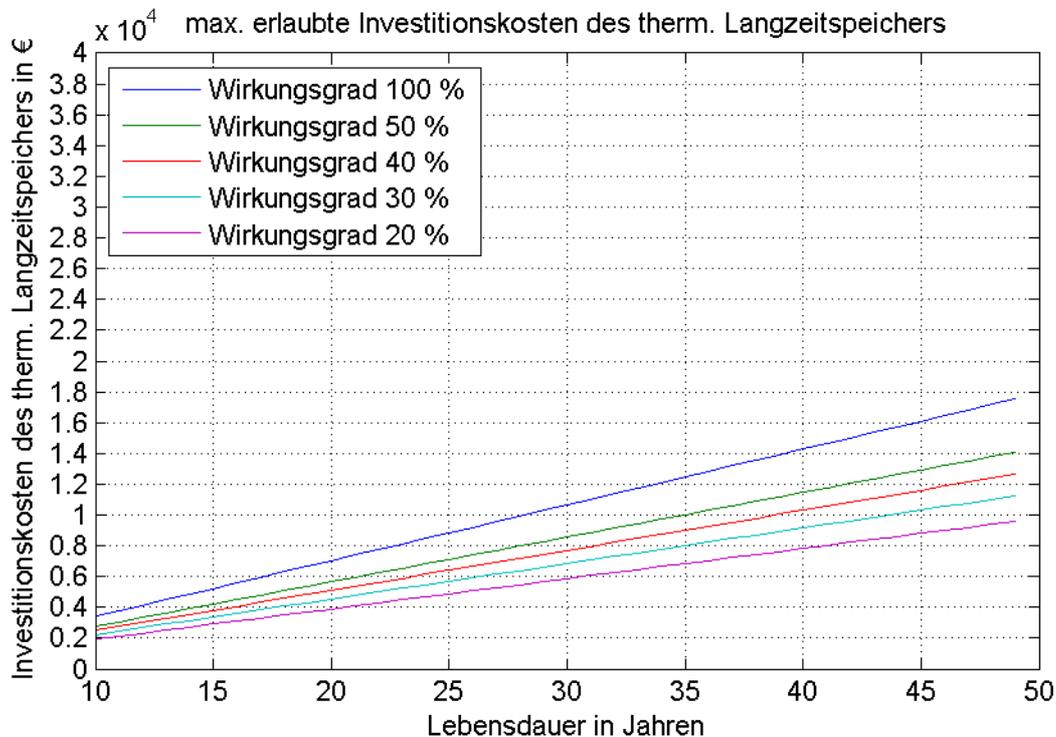


Abbildung 37: maximal erlaubte Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers in Abhängigkeit der Lebensdauer (PV+Wärmepumpe)

In Abbildung 37 ist zu erkennen, dass die maximal erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers mit der Lebensdauer ansteigen. Die maximal erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers sind in der Kombination Photovoltaikanlage, Wärmepumpe und elektrischer Speicher (Abbildung 37) deutlich kleiner wie in der Kombination Photovoltaikanlage, Solarthermieanlage und elektrischer Speicher (Abbildung 34), daher ist die Kombination Photovoltaikanlage, Solarthermieanlage, elektrischer Speicher und thermischer Langzeitspeicher, wirtschaftlicher.

Die einzelnen Optimierungsvariablen sind bei den Simulationen, so gewichtet, dass zuerst der elektrische Speicher gefüllt wird, wenn mehr elektrische Energie erzeugt als verbraucht wird. Ist der elektrische Speicher voll, werden die beiden thermischen Wärmespeicher über die Wärmepumpe gefüllt, erst wenn die beiden thermischen Wärmespeicher voll sind, wird elektrische Energie verkauft. Der thermische Langzeitspeicher ist groß genug dimensioniert, weshalb keine elektrische Energie verkauft wird.

Wird eine Wärmepumpe und ein thermischer Langzeitspeicher im dezentralen System verwendet, könnte es aus wirtschaftlicher Sicht günstiger sein, wenn kein elektrischer Speicher

verwendet wird. Die Gewichtungen der Optimierungsvariablen werden so gewählt, dass die gesamte durch die Photovoltaikanlage überschüssige elektrische Energie mit Hilfe der Wärmepumpe in thermische Energie umgewandelt wird, bis beide thermischen Wärmespeicher (thermischer Kurzzeitspeicher und thermischer Langzeitspeicher) voll sind. In Abbildung 38 sind die jährlichen Gesamtkosten mit einem thermischen Langzeitspeicher (30 % Wirkungsgrad) ohne elektrischen Speicher dargestellt.

Gesamtkosten mit Langzeitwärmespeicher (30 % Wirkungsgrad) ohne elektrischen Speicher

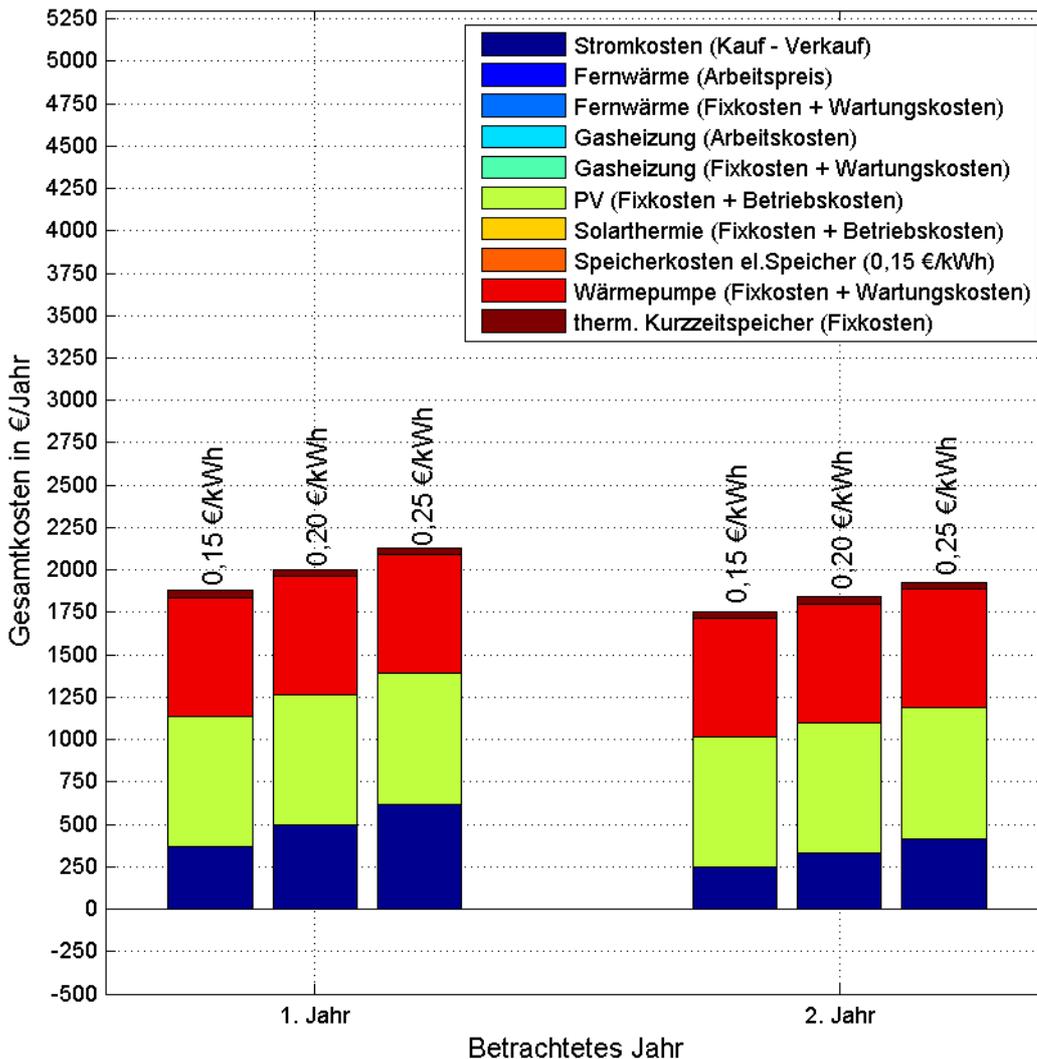


Abbildung 38: Gesamtkosten (PV+Wärmepumpe) mit einem thermischen Langzeitspeicher (30 % Wirkungsgrad) ohne elektrischen Speicher

In Abbildung 38 sind die elektrischen Speicherkosten Null, da kein elektrischer Speicher im dezentralen Energiesystem vorhanden ist. Die benötigte elektrische Energie ist im ersten Jahr etwas höher als in den darauffolgenden Jahren (2. Jahr), da der thermische Langzeitspeicher im ersten Jahr leer ist. Vergleicht man in diesem Szenario die beiden Ergebnisse, mit und ohne elektrischen Speicher (Abbildung 36 und Abbildung 38), sind die jährlichen Gesamtkosten ohne elektrischen Speicher (0,15 €/kWh) etwas geringer. Befindet sich eine Wärmepumpe und

ein thermischer Langzeitspeicher mit einem Wirkungsgrad von 30 % im dezentralen Energiesystem, ist es also wirtschaftlicher, wenn kein elektrischer Speicher verwendet wird. In Tabelle 8 sind die maximalen Speicherkosten des thermischen Langzeitspeichers bei unterschiedlichen Wirkungsgraden und einer Lebensdauer von 30 Jahren dargestellt.

Tabelle 8: Auswertung des thermischen Langzeitspeichers (PV+Wärmepumpe) ohne elektrischen Speicher

$\eta_{\text{pro Jahr}, X14}$	$T_{\text{th.LS}}$ Jahre	$C_{\text{IK,max.th.LS}}$ €	$W_{\text{max,th.LS}}$ kWh
1	30	11355	7000
0,5	30	10594	7500
0,4	30	10322	7800
0,3	30	9965	8500
0,2	30	9062	8563

Die maximal erlaubten Investitionskosten eines thermischen Langzeitspeichers $C_{\text{IK,max.th.LS}}$ mit einem Wirkungsgrad von 30 %, ohne elektrischen Speicher im dezentralen System betragen 9965 €. Befindet sich ein elektrischer Speicher im System, sind die maximal erlaubten Investitionskosten um etwa 3000 € geringer. Wie viel ein thermischer Langzeitspeicher in Abhängigkeit des Wirkungsgrades und der Lebensdauer maximal kosten darf, wenn sich kein elektrischer Speicher im dezentralen Energiesystem befindet, ist in Abbildung 39 dargestellt.

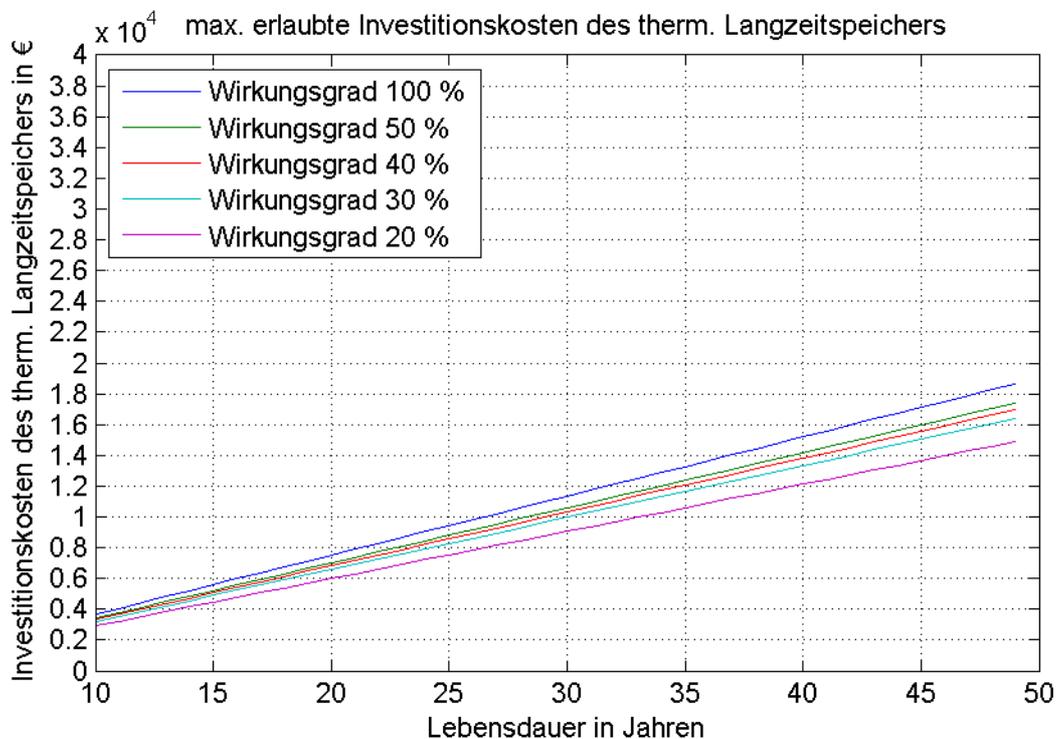


Abbildung 39: maximal erlaubte Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers in Abhängigkeit der Lebensdauer (PV+Wärmepumpe) ohne elektrischen Speicher

In Abbildung 39 sind die maximal erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers, ohne elektrischen Speicher im dezentralen Energiesystem, in Abhängigkeit des Wirkungs-grades und der Lebensdauer dargestellt. Wie zuvor erwähnt, und durch Vergleich der Abbildung 37 und Abbildung 39 gut zu erkennen, ist es bei dieser Kombination (Photovoltaik, Wärmepumpe und thermischer Langzeitspeicher) wirtschaftlicher, wenn kein elektrischer Speicher verwendet wird. Der notwendige thermische Langzeitspeicher muss allerdings bei einem Wirkungsgrad von 30 % um etwa 1200 kWh größer dimensioniert sein.

6.4 Szenario D: Gesamtsystem mit Kühlbedarf

In diesem Szenario werden zwei unterschiedliche Kombinationen der Erzeuger und Energiequellen untersucht (Kombination aus Photovoltaikanlage, Gasheizung und elektrischem Speicher und Kombination aus Photovoltaikanlage, Wärmepumpe und elektrischem Speicher), dabei wird analysiert, ob sich ein Kältespeicher im dezentralen Energiesystem auszahlt. Im Szenario D werden alle Verbraucher des dezentralen Energiesystems berücksichtigt, daher kommen im Vergleich zum Szenario C (elektrischer Stromkreis und gesamter Wärmebedarf), zusätzlich die Kosten der Klimaanlage und des Kältespeichers (wenn vorhanden) zu den Gesamtkosten hinzu. Ein thermischer Langzeitspeicher befindet sich in diesem Szenario nicht im dezentralen Energiesystem. Im Simulationsmodell wird angenommen, dass Kälteenergie im Juli und August benötigt wird (siehe 4.3.4), der elektrische Energiebedarf steigt daher in diesen beiden Monaten um den elektrischen Energiebedarf der Klimaanlage an.

In Tabelle 9 sind für die Analyse relevanten Annahmen der Komponenten für dieses Szenario dargestellt.

Tabelle 9: Relevante Annahmen der Komponenten (alle Verbraucher) [2] [5] [9] [13] [15] [17] [18] [20]

Technologie	C_{IK}	C_{BK}	$C_{pro kWh}$	T	Anmerkungen
-	€	€/a	€/kWh	a	-
elektrischer Speicher	4200	-	-	variabel	Speicherkosten 0,15 €/kWh
Gasheizung	5000	290	0,06	20	-
Kältespeicher	800	-	-	20	-
Klimaanlage	2000	-	-	15	-
Kurzzeitwärmespeicher	800	-	-	20	300 Liter
Photovoltaikanlage	14000	210	-	25	7 kWp
Strom (Kaufpreis)	-	-	0,2	-	-
Strom (Verkaufspreis)	-	-	-0,035	-	-
Wärmepumpe	15000	100	-	25	-

Damit die getroffenen Einstellungen der unterschiedlichen Gewichtungen der Optimierungsvariablen nachvollziehbar sind, ist in Abbildung 40 das schematische Modell dieses Szenarios dargestellt.

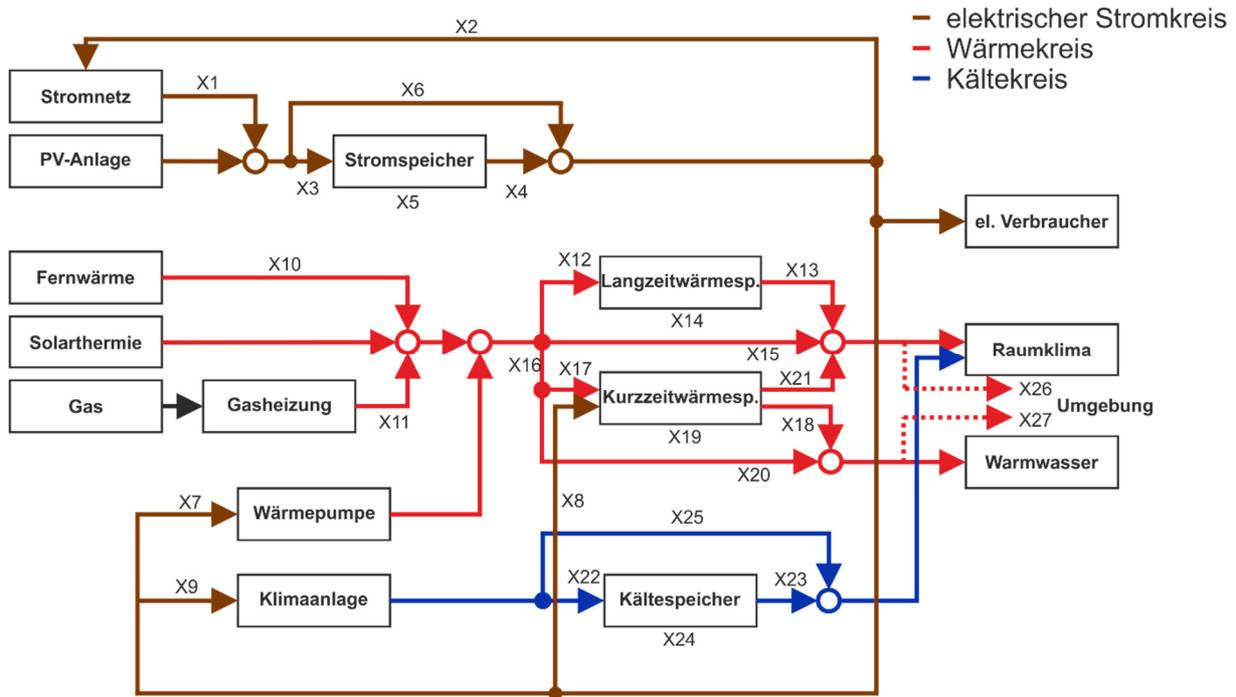


Abbildung 40: Schematisches Modell (alle Verbraucher)

Die festgelegten Gewichtungen unterscheiden sich in den beiden Monaten Juli und August gegenüber den restlichen Monaten. Unabhängig vom betrachteten Monat hat der elektrische Speicher gegenüber dem elektrischen Netz Priorität ($f(X3) < f(X2)$).

Alle Monate außer Juli und August

Befindet sich eine Wärmepumpe im dezentralen Energiesystem, wird bei einem elektrischen Energieüberschuss zuerst der elektrische Speicher gefüllt, wenn der elektrische Speicher voll ist, wird die überschüssige elektrische Energie der Wärmepumpe zugeführt (außer im Juli und August), bis der thermische Kurzzeitspeicher voll ist. Erst wenn beide Speicher (elektrischer Speicher und thermischer Kurzzeitspeicher) voll sind, wird die überschüssige elektrische Energie verkauft ($f(X3) < f(X7) < f(X2)$).

Monat Juli und August

Der Unterschied in diesen beiden Monaten (Juli und August) ist, dass die überschüssige elektrische Energie jeweils zur Hälfte auf die Wärmepumpe und die Klimaanlage aufgeteilt wird. Erst wenn alle drei Speicher (elektrischer Speicher, thermischer Kurzzeitspeicher und Kältespeicher) voll sind, wird die überschüssige elektrische Energie verkauft ($f(X3) < f(X7) = f(X9) < f(X2)$).

6.4.1 Kombination aus Photovoltaikanlage, Gasheizung und elektrischem Speicher

In Abbildung 41 sind die jährlichen Gesamtkosten (Verwendete Komponenten: Photovoltaikanlage, Gasheizung und elektrischer Speicher), in Abhängigkeit unterschiedlicher Strompreise mit und ohne Kältespeicher dargestellt.

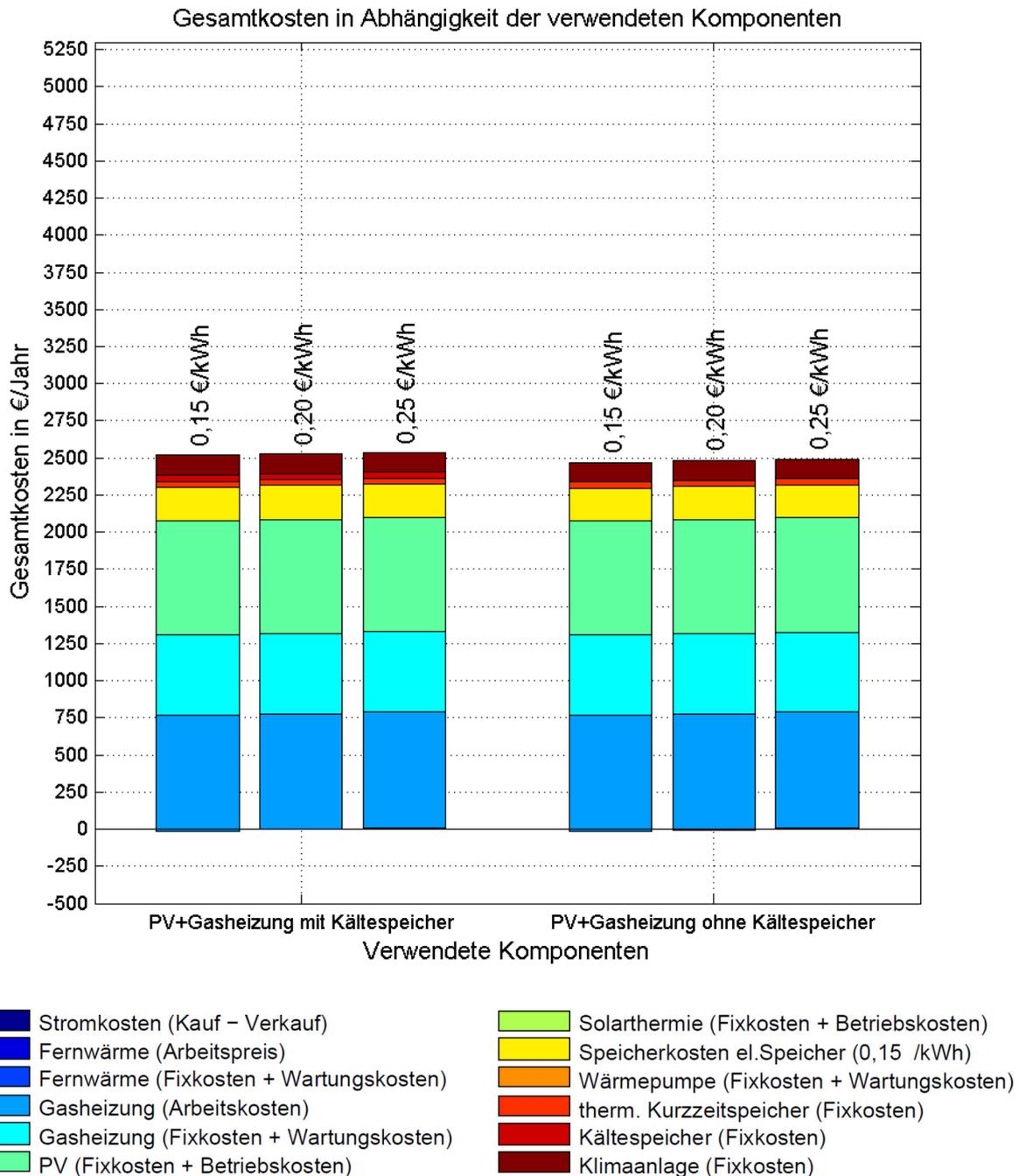


Abbildung 41: Gesamtsystem mit Kühlbedarf (PV und Gasheizung mit und ohne Kältespeicher)

In Abbildung 41 erkennt man, dass die jährlichen Gesamtkosten mit dem Kältespeicher etwas höher sind als ohne. Bei den vorgegebenen Verläufen (Erzeugung der Photovoltaikanlage, Kältebedarf, usw.) zahlt sich der Kältespeicher im dezentralen System nicht aus, da in den

beiden Monaten Juli und August mehr elektrische Energie durch die Photovoltaikanlage produziert wird als von den elektrischen Verbrauchern verbraucht wird. Der elektrische Energiebedarf der Klimaanlage kann daher problemlos gedeckt werden.

6.4.2 Kombination aus Photovoltaikanlage, Wärmepumpe und elektrischem Speicher

In Abbildung 42 sind die Gesamtjahreskosten (Verwendete Komponenten: Photovoltaikanlage, Wärmepumpe und elektrischer Speicher), in Abhängigkeit unterschiedlicher Strompreise mit und ohne Kältespeicher dargestellt.

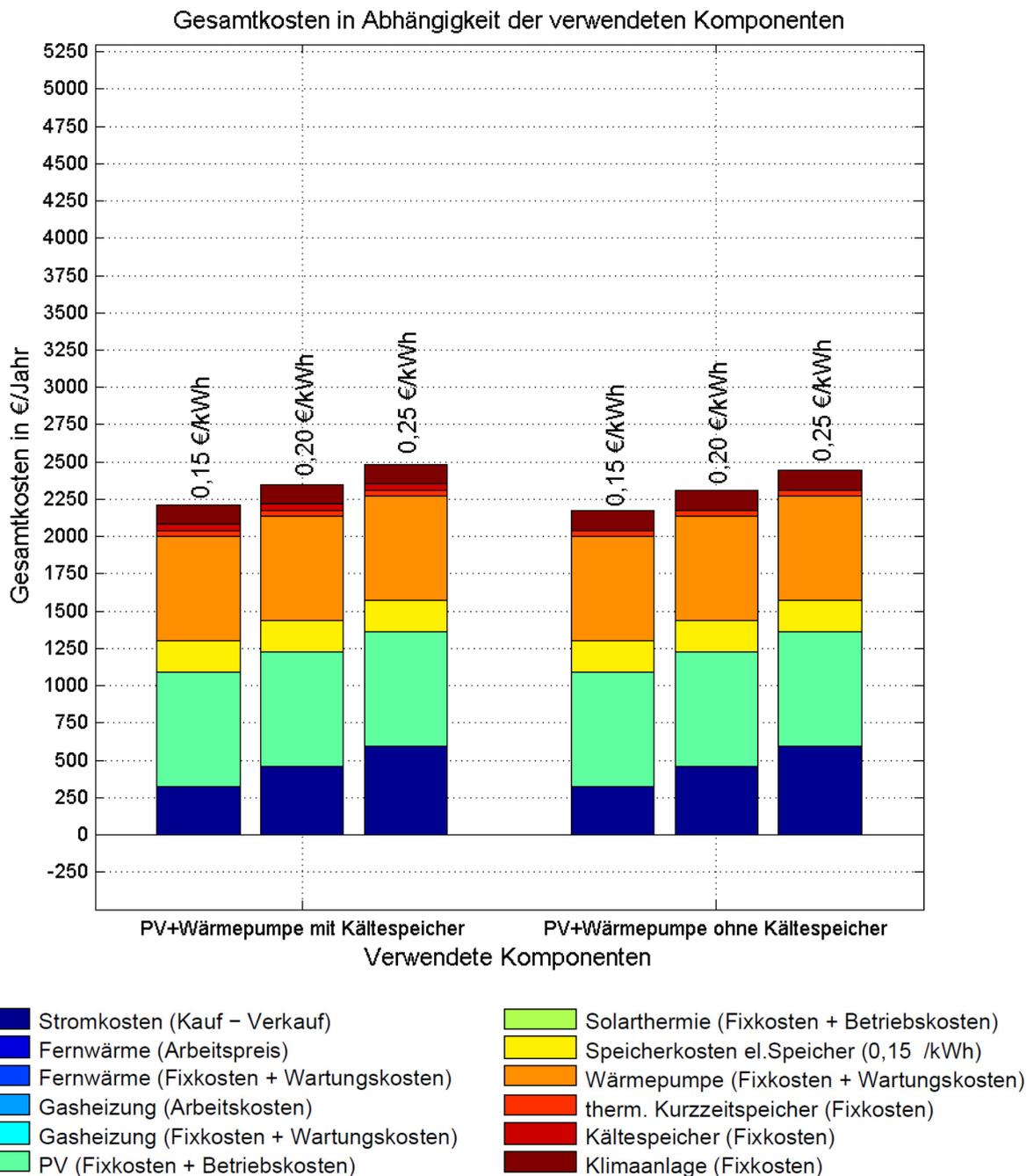


Abbildung 42: Alle Verbraucher berücksichtigt (PV und Gasheizung mit und ohne Kältespeicher)

Wird eine Wärmepumpe verwendet, um die Wärmeenergie zu erzeugen, zahlt sich der Kältespeicher im dezentralen System aus wirtschaftlicher Sicht nicht aus, weil in den beiden Monaten Juli und August mehr elektrische Energie durch die Photovoltaikanlage produziert wird als von den elektrischen Verbrauchern verbraucht wird. Der elektrische Energiebedarf der Klimaanlage kann daher problemlos gedeckt werden.

Werden alle Verbraucher des dezentralen Energiesystems berücksichtigt, benötigt die Klimaanlage jährlich circa 200 kWh elektrische Energie um den Kältebedarf des Raumklimas zu decken. Befindet sich im dezentralen Energiesystem eine Wärmepumpe in Kombination mit einem thermischen Langzeitspeicher, verringert sich die gespeicherte thermische Energie um circa 800 kWh.

7 Zusammenfassung

Mit Hilfe des erstellten Simulationsmodells, können die jährlichen Gesamtkosten eines dezentralen Energiesystems berechnet oder die maximal zulässigen Kosten für eine Systemkomponente bestimmt werden. Bei der Berechnung der jährlichen Gesamtkosten gibt es eine große Anzahl von unterschiedlichen Einflussfaktoren, welche die resultierenden jährlichen Gesamtkosten des dezentralen Energiesystems beeinflussen. Zu den wesentlichen Einflussfaktoren gehören die Investitionskosten der verwendeten Komponenten (Photovoltaikanlage, Solarthermieanlage, Gasheizung, ...), die angenommenen Verbraucherlastprofile (Warmwasserbedarf, Raumklima und elektrische Verbraucher), die angenommenen Erzeugerprofile (wie zum Beispiel Solarthermieanlage) und die Energiepreisentwicklung (Fernwärmepreis, Gaspreis und Strompreis). Aufgrund dieser großen Anzahl an Einflussfaktoren, ist es aufwändig, einen kostenoptimierten Betrieb des dezentralen Energiesystems zu finden. Die Simulationen zeigen, dass nur Optimierungsrechnungen zum Ziel führen.

Das Hauptaugenmerk wird in dieser Masterarbeit auf die unterschiedlichen Erzeuger und Energiequellen, den elektrischen Speicher und den thermischen Langzeitspeicher gelegt. Mit dem Simulationsmodell wird analysiert, wie groß ein elektrischer Speicher in einem dezentralen Energiesystem sein muss, und bei welchen Kosten, in Abhängigkeit des Strompreises sich ein elektrischer Speicher rentiert. Außerdem wird analysiert wie groß ein thermischer Langzeitspeicher sein muss und bei welchen Speicherkosten, in Abhängigkeit des Wirkungsgrades, sich ein thermischer Langzeitspeicher in einem dezentralen Energiesystem rechnet. Befindet sich eine Photovoltaikanlage im dezentralen Energiesystem, zahlt sich der Kältespeicher in einem dezentralen Energiesystem nicht aus.

Nachfolgend sind die wesentlichen Ergebnisse der analysierten Szenarien zusammengefasst:

Szenario A: Elektrisches System: Die optimale Speichergröße des elektrischen Speichers im betrachteten dezentralen Energiesystem ist 7 kWh. Bei einem Strompreis von 0,20 €/kWh ist der elektrische Speicher bis zu Speicherkosten von 0,16 €/kWh wirtschaftlich.

Szenario B: Elektrisches System + Warmwasserbedarf: Die jährlichen Gesamtkosten der Kombination (Erzeuger und Energiequellen) aus Photovoltaikanlage, Solarthermieanlage und elektrischem Speicher (0,15 €/kWh) betragen in etwa 1250 €. Die jährlichen Gesamtkosten aller anderen betrachteten Kombinationen sind mindestens 300 € höher, daher ist die Kombination aus Photovoltaikanlage, Solarthermieanlage und elektrischem Speicher aus wirtschaftlicher Sicht die beste Kombination um den geforderten elektrischen und thermischen Energiebedarf zu decken.

Szenario C: Gesamtsystem ohne Kühlbedarf: Befindet sich kein thermischer Langzeitspeicher im dezentralen Energiesystem, ist die Kombination (Erzeuger und Energiequellen) bestehend aus Photovoltaikanlage, Wärmepumpe und elektrischen Speicher mit jährlichen Gesamtkosten von etwa 2200 € am kostengünstigsten. Die maximal erlaubten Investitionskosten eines thermischen Langzeitspeichers (30 % Wirkungsgrad, 7544 kWh Speicherkapazität und 30 Jahre Lebensdauer) in Kombination mit einer Photovoltaikanlage, Solarthermieanlage und einem elektrischen Speicher betragen circa 18000 €. Wird der gesamte Wärmebedarf von einer Wärmepumpe erzeugt, werden die maximal erlaubten Investitionskosten des thermischen Langzeitspeichers circa halbiert, daher ist die Kombination mit Photovoltaikanlage, Solarthermieanlage und elektrischen Speicher wirtschaftlicher.

Szenario D: Gesamtsystem mit Kühlbedarf: Die Kombination (Erzeuger und Energiequellen) aus Photovoltaikanlage, Wärmepumpe und elektrischem Speicher ist von den beiden betrachteten Kombinationen die kostengünstigere Kombination. Die jährlichen Gesamtkosten dieser Kombination (ohne Kältespeicher) betragen in etwa 2300 €. Ein Kältespeicher zahlt sich in dieser Kombination nicht aus.

In dem erstellten Simulationsmodell gibt es 27 Optimierungsvariablen, aufgrund dieser großen Anzahl gibt es sehr viele Möglichkeiten die Leistungsflüsse des dezentralen Energiesystems zu steuern. In weiterer Folge sollte man sich überlegen, ob andere Gewichtungen der Optimierungsvariablen, die resultierenden jährlichen Gesamtkosten des dezentralen Energiesystems verringern. Außerdem sollte analysiert werden, wie sich die Gesamtkosten ändern, wenn andere Last- und Erzeugungsprofile angenommen werden (zum Beispiel der Warmwasserbedarf, das Raumklima oder die Erzeugung der Photovoltaikanlage). Die einzelnen Systemkomponenten (zum Beispiel Wärmepumpe), können detaillierter dargestellt werden, dadurch nähert sich das Simulationsmodell näher an das reale dezentrale Energiesystem an.

8 Literaturverzeichnis

- [1] M. Sterner, I. Stadler, "Energiespeicher", Springer Vieweg, Berlin und Heidelberg, Deutschland, 2014.
- [2] A. Wagner, "Photovoltaik Engineering", Springer, Berlin und Heidelberg, Deutschland, 2006.
- [3] T. S. T Solarstrom, "www.solarladen.de/photovoltaik-funktion", zuletzt besucht am: 1. Juni 2016.
- [4] A. Madel, "Ratgeber Photovoltaik", Ulm, Deutschland, 2016.
- [5] E-CONTROL, "Strompreise in Österreich", Energie-Control Austria, Wien, Österreich, 2016.
- [6] H. Watter, "Nachhaltige Energiesysteme", VIEWEG+TEUBNER, Wiesbaden, Deutschland, 2009.
- [7] JUNKERS Bosch Gruppe, "Sonnige Aussichten - Technik und Vermarktung regenerativer Energiesysteme", Wernau, Deutschland, 2006.
- [8] Christian Münch GmbH, "<http://www.solarthermie.net/faq/wie-hoch-sind-die-kosten-fuer-wartung-und-betrieb-der-solarthermie-anlage>", zuletzt besucht am: 26. April 2016.
- [9] Christian Münch GmbH, "<http://www.solarthermie.net/faq/wie-hoch-liegen-die-solarthermie-kosten-pro-m2>", zuletzt besucht am: 27. April 2016..
- [10] FGW - Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen, "Fernwärme sauber sicher und bequem", Wien, Österreich, 2011.
- [11] Mainova AG, "Fernwärme - Energie für die Zukunft", Frankfurt am Main, Deutschland, 2014.
- [12] Statistik Austria, "Energiebilanzen Österreich 1970-2014", Österreichs Energie, Wien, Österreich, 2016.
- [13] FWG - St. Leonhard/F. - Ruprechtshofen reg. Gen.m.b.H. "<http://www.fwg.cc/php/kostenberechnung.php>" zuletzt besucht am: 4. Mai 2016.
- [14] S. Günther, "Gas-Brennwertkessel - effizient Heizen mit Gas", Energieheld GmbH, Hannover, Deutschland, 2015.
- [15] A. Madel, "Ratgeber Gasheizungen", KWH Preis UG, Ulm, Deutschland, 2013.
- [16] P. Kunz, T. Afjei, W. Betschart, "Wärmepumpen Planung - Optimierung - Betrieb - Wartung", Bundesamt für Energie, Bern, Schweiz, 2008.

-
- [17] Energieheld GmbH, "Laufende Kosten der Wärmepumpe - Wartung und Strom", Hannover, Deutschland, 2015.
- [18] S. Günther, "Die Wärmepumpe - alles Wichtige im Überblick", Energieheld GmbH, Hannover, Deutschland, 2015.
- [19] Landtag Niederösterreich, "NÖ Bauordnung 2014 (NÖ BO 2014)", St. Pölten, Österreich, 2014.
- [20] S. Günther, "Kosten für eine Lüftungs- oder Klimaanlage", Energieheld GmbH, Hannover, Deutschland, 2015..
- [21] D. Mangold, A. Dohna,
"<http://www.saisonalspeicher.de/Grundlagen/Funktionsprinzip/SaisonalerWärmespeicher/tabid/314/Default.aspx>", zuletzt besucht am: 14. Juni 2016.
- [22] E-CONTROL, "Sonstige Marktregeln Strom", Wien, Österreich, 2011.
- [23] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), "Wegweiser für eine Gesunde Raumluf", Wien, Österreich, 2009.
- [24] G. Faninger, "Tool zur Vorprojektierung von thermischen Solaranlagen für Warmwasser & Raumheizung", AEE - Institut für Nachhaltige Technologien, Gleisdorf, Österreich, 2013.
- [25] K. Fitzner, "Raumklimatechnik - Band 2: Raumluf- und Raumkühltechnik", Springer, Berlin und Heidelberg, Deutschland, 2008.
- [26] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS),
"<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>", zuletzt besucht am: 15. April 2016.
- [27] O.Ö. Energiesparverband, "Hohe Stromkosten- Nicht bei mir!", Linz, Österreicher, 2007.
- [28] APCS Power Clearing and Settlement AG,
"<http://www.apcs.at/de/clearing/technisches-clearing/lastprofile>", zuletzt besucht am: 15. Mai 2016.
- [29] E. Grabner, C. Greinöcker, "Modern heizen - komfortabel & zukunftssicher", Verband österreichischer Umweltberatungsstellen, Wien, Österreich, 2011.
- [30] Linz AG,
"<http://www.linzag.at/portal/portal/linzag/privatkunden/wohnunghaus/gas/erdgas/heizenergieverbrauch>", zuletzt besucht am: 11. Juni 2016.
- [31] Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft,
"<http://www.bmwfw.gv.at/EnergieUndBergbau/klimadatenrechner/Seiten/zurBerechnung.aspx>", zuletzt besucht am: 12. Mai 2016.

-
- [32] F. Prettenthaler, A. Gobiet, "Auswirkungen des Klimawandels auf Heiz- und Kühlenergiebedarf in Österreich", Graz, Österreich, 2007.
 - [33] T. Wieland, E. Schmutzner, "Probabilistic approach for the determination of connection power using smart meter data for urban households with decentralized generation and storage units", Graz, Österreich, 2013.
 - [34] U. Jordan, K. Vajen, "Realistische Trinkwasser-Profile für bis zu 100 Wohneinheiten", Marburg, Deutschland, 2001.
 - [35] Saft S.A., "Batterielebensdauer Photovoltaik-Solarenergiespeichersysteme (PV,ESS)", Bagnolet, Frankreich, 2014.