



Flächenkonkurrenz zwischen Photovoltaik und Solarthermie im Haushalt und Gewerbe

DIPLOMARBEIT

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

unter der Leitung von

Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johann Auer

und

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Andreas Fleischhacker

eingereicht an der

Technischen Universität Wien

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

von

Thomas Brückl, BSc.

Mat.Nr 0826310

Graf Starhembergasse 26

1040 Wien

Vorwort

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen Personen bedanken, welche mich beim Erstellen dieser Diplomarbeit als auch bei meinem Studium unterstützt haben.

Sehr herzlich möchte ich mich bei Priv.- Doz. Dr. Johann Auer und Dipl. -Ing. Andreas Fleischhacker für das Betreuen und Bewerten meiner Arbeit bedanken.

Besonderer Dank gebührt meinen Eltern, welche mir es durch ihre Unterstützung ermöglicht haben dieses Studium abzuschließen. Auch meiner Lebensgefährtin Tamara Rabl möchte ich herzlichst für die emotionale und fachliche Hilfe beim Schreiben dieser Arbeit danken.

Kurzfassung

Die stark fallenden Investitionskosten von Photovoltaikanlagen, in Kombination mit intensiver Förderung, führten in den letzten Jahren zu einem Ausbau der installierten Photovoltaik-Anlagengröße. Somit wird ein Großteil der zu Verfügung stehenden Dachflächen für Photovoltaikanlagen genutzt und damit wird eine zusätzliche Nutzung der Fläche durch solarthermische Anlagen ausgeschlossen. Um zu ergründen, ob damit das betriebswirtschaftliche Optimum erreicht wird, untersucht diese Arbeit die optimale Dachflächenallokation von sowohl Photovoltaik- als auch Solarthermieanlagen der verschiedenen Verbrauchstypen. Dazu wird für ein Pellets- und ein Wärmepumpenheizsystem ein lineares Optimierungsmodell aufgestellt, welches den Kapitalwert minimiert. Die Lösung dieses Modells ergibt die optimale Installationsgröße der Photovoltaik- und Solarthermieanlage und den optimalen Energieträgereinsatz zur Deckung der Nachfrage von verschiedenen Verbrauchstypen. Die Resultate werden durch Sensitivitätsanalysen betreffend Energiepreissteigerungen, Kalkulationszinssatz, Investitionskosten und Wärmebedarf dargestellt. Für Energiepreissteigerungsraten von über 4% zeigt sich bei Pelletsheizsystemen, dass eine Kombination von Solarthermie- mit Photovoltaikanlagen das betriebswirtschaftliche Optimum ergibt. Das Flächenverhältnis zwischen den Technologien ist dabei stark vom Verbrauchsprofil abhängig, da dieses den Eigenverbrauch bestimmt. Ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit ist, dass die dachflächenbezogene Kostenreduktion bei Solarthermieanlagen höher ist als bei Photovoltaikanlagen, obwohl der spezifische Flächenbedarf geringer ausfällt. Falls der Verbraucher über eine Wärmepumpe verfügt, ist der ausschließliche Einsatz von Photovoltaik am wirtschaftlichsten.

Abstract

The drastically decreasing costs of photovoltaic systems in combination with intensified funding lead to further expansion of installed photovoltaic systems in size throughout the past years. Major parts of the available roof spaces are used for photovoltaic systems. For this reason other kinds of solar-thermal systems can be ruled out. The purpose of this master thesis is to fathom the maximum capacity of economical use by researching and analyzing the optimal roof space allocation of photovoltaic systems, as well as solar thermal systems of different consumer types. Therefore a linear optimization model has been designed for pellet heating systems, as well as heat pump systems, which aims to minimize the capital value. The model's results indicates the optimum installation area of photovoltaic – and solar thermal systems, and the optimal usage of energy sources for satisfying the demands of different consumer types. Further results are derived by a sensitivity analysis with following input parameters: energy prices, required rate of return, investment costs, and heat requirement. A rise of energy prices above 4% indicates that pellet heating systems combined with solar thermal– and photovoltaic systems lead to an optimized performance. The area ratio between technologies is strongly dependent on consumer types. Further results of this thesis shows the reduction of costs related to roof space of solar thermal systems is higher, compared to photovoltaic systems, even though the specific requirements for space are less. If the consumer possesses a heat pump, solely usage of PV is the most economical solution.

Inhalt

1. Einleitung	1
2. Hintergrund	4
3. Methoden.....	9
3.1 Die untersuchten Energiesysteme.....	9
3.1.1 Darstellung des Pellets Heizsystems	10
3.1.2 Darstellung des Wärmepumpen Heizsystems	11
3.2 Das Optimierungsmodell.....	12
3.2.1 Ökonomisches Modell der Kapitalwertmethode	13
3.2.2 Zielfunktion und Nebenbedingungen	14
3.2.2.1 Zielfunktion und Nebenbedingungen für ein Pellets Heizsystem	14
3.2.2.2 Zielfunktion und Nebenbedingungen für ein Wärmepumpen Heizsystem	19
3.3 Technisches Modell und empirische Skalierung	20
3.3.1 Modell der Solarthermieanlage	21
3.3.2 Modell der Photovoltaik Anlage	24
3.3.3 Berechnung des Heizbedarfs	26
3.3.5 Bestimmung der Stromprofile	28
4. Ergebnisse	31
4.1 Optimale Flächenallokation bei Pelletheizsystemen	32
4.1.1 Einfamilienhaus	33
4.1.1.1 Einfluss der Anzahl an Haushaltsangehörigen auf die Flächenallokation.....	33
4.1.1.2 Einfluss von Förderungsmöglichkeiten auf die Flächenallokation	38
4.1.1.3 Einfluss von Zins- und Investitionskosten auf die Flächenallokation	43
4.1.1.4 Einfluss der Bausubstanz auf die Flächenallokation	44
4.1.1.5 Einfluss alternativer Modell Annahmen auf die Flächenallokation	45
4.1.2 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für ein Mehrfamilienhaus.....	48
4.1.3 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für ein Lebensmittelgeschäft.....	51
4.1.4 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für eine Bäckerei	53
4.1.5 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für eine Schule	55
4.2 Optimale Flächenallokation bei einem Wärmepumpenheizsystem.....	58
4.2.1 Einfamilienhaus	58
4.2.1.1 Einfluss der Anzahl an Haushaltsangehörigen auf die Flächenallokation.....	58
4.2.1.2 Einfluss von Förderungsmöglichkeiten auf die Flächenallokation	61
4.1.1.3 Einfluss von Zins und Investitionskoste auf die Flächenallokation	64
4.2.1.4 Einfluss der Bausubstanz auf die Flächenallokation	65

4.2.1.5 Einfluss alternativer Modellannahmen auf die Flächenallokation	65
4.2.2 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für ein Mehrfamilienhaus.....	66
4.2.3 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für ein Lebensmittelgeschäft.....	67
4.2.4 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für eine Bäckerei	68
4.2.5 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für eine Schule	69
5. Synthese der Ergebnisse	70
5.1 Vergleich des solaren Deckungsgrades	70
5.2 Aggregierte Kapitalwerte der Szenarien.....	72
7. Literatur	80
Anhang A	81
Anhang B.....	83
Verzeichnis der Abbildungen	85

1. Einleitung

Um dem Klimawandel entgegenzuwirken, wurde das politische Ziel¹ definiert, die Emission von Treibhausgasen um mindestens 80% gegenüber dem Niveau von 1990 zu reduzieren. Damit kann der globale Temperaturanstieg auf 2°C begrenzt werden. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, müssen die fossilen Brennstoffe Großteils durch erneuerbare und CO₂ neutrale Energieträger ersetzt werden. Eine spezielle Herausforderung stellt der Heizbedarf dar, welcher 48%² des gesamten europäischen Primärenergieverbrauches ausmacht. Diese werden heute noch zu einem Großteil aus fossilen Energieträgern bedient. Durch technologische Fortschritte und Subventionen wurde die Verbreitung von Pellets- und Wärmepumpenheizsystemen angetrieben. Diese können mit Photovoltaik- und Solarthermieanlagen kombiniert werden. Beide Technologien erhielten durch gezielte Förderungsprogramme einen großen Aufschwung im letzten Jahrzehnt.

Die generell wünschenswerte Entwicklung offenbarte allerdings auch Ineffizienz im aktuellen Förderungsregime. Die stark fallenden Investitionskosten der Photovoltaikanlagen, in Kombination mit intensiver Förderung, führten zu einer Maximierung der installierten PV-Anlagengröße. Dabei wird der Eigenverbrauch des erzeugten PV-Stroms im Bereich der Haushalts- und Gewerbekunden oft nicht berücksichtigt. Somit wird ein Großteil der zu Verfügung stehenden Dachflächen für PV-Anlagen genutzt und eine zusätzliche Nutzung der Fläche durch solarthermische Anlagen ausgeschlossen. Dies gilt aber auch umgekehrt, sodass meist die Sonnenenergie entweder nur für PV oder für Solarthermie genutzt wird. So kann es passieren, dass mögliche wirtschaftliche Potentiale nicht erschlossen werden.

Diese Flächenkonkurrenz unterscheidet sich dabei stark vom eingesetzten Heizsystem. Es besteht also nicht nur eine Konkurrenz zwischen Photovoltaik- und Solarthermieanlagen, sondern auch zwischen den verschiedenen Heizkonzepten. Um die optimale Allokation der Dachflächen sicherzustellen, muss somit jedes Heizsystem einzeln betrachtet werden. So kann die ursprüngliche Konkurrenz zwischen Photovoltaik- und Solarthermieanlagen einer Synergie beider Technologien weichen.

1 Ziele der Kopenhager Klimakonferenz (abgerufen 25.2.2015)

URL.: unfccc.int/meetings/copenhagen_dec_2009/meeting/6295/php/view/decisions.php

2 Common Vision for the Renewable Heating & Cooling sector in Europe (abgerufen 25.2.2015) URL.: [ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/etp/docs/rhc-vision_en.pdf](http://ftp.cordis.europa.eu/pub/etp/docs/rhc-vision_en.pdf)

1. Einleitung

Der optimale Einsatz von Solarthermie- und Photovoltaikanlagen soll dabei nach betriebswirtschaftlichen und nicht nach makroökonomischen oder ökologischen Gesichtspunkten beurteilt werden.

Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit umfasst damit die optimale Dachflächenallokation von sowohl Photovoltaik- als auch Solarthermieanlagen bei verschiedenen Verbrauchertypen. Dabei soll insbesondere die Begrenzung der verfügbaren Dachflächen berücksichtigt werden. Des Weiteren werden die möglichen betriebswirtschaftlichen Vor- und Nachteile betrachtet, welche sich bei Beschränkung auf eine einzige Technologie ergeben.

Um die Fragestellung nach einer optimalen Flächenallokation von Photovoltaik- und Solarthermieanlagen zu beantworten, werden die zuvor beschriebenen Heizsysteme numerisch modelliert. Darüber hinaus werden Modelle für Photovoltaik- und Solarthermieanlagen implementiert. Deren Größe wird entweder durch die Verwendung des mathematischen Optimierungsmodells bestimmt, oder als Restriktion des Optimierungsproblems vorgegeben. Das Optimierungsproblem wird unter der Nebenbedingung zur Deckung von Wärme und Stromnachfrage formuliert. Die Konkurrenzsituation wird dabei sowohl für Haushaltsverbraucher als auch für gewerbliche Verbraucher analysiert. Die Zielfunktion des oben erwähnten Optimierungsproblems minimiert den Kapitalwert über die angenommene Lebensdauer der Komponenten. Die Lösung dieses Modells ergibt die optimale Dimension der Photovoltaik- und Solarthermieanlage und den optimalen Energieträgereinsatz.

Der Aufbau dieser Arbeit wird in folgende Kapitel unterteilt:

Kapitel 2 beschreibt die derzeitige Marktdurchdringung von Solarthermie- und Photovoltaikanlagen in Österreich. Außerdem wird eine Darstellung von Methoden und Resultaten vergleichbarer wissenschaftlicher Arbeiten gemacht. Zuletzt wird durch den Vergleich der verwendeten Methoden der Mehrwert des methodischen Ansatzes dieser Arbeit bestimmt.

Kapitel 3 beinhaltet die Formulierung der verwendeten Modelle und erläutert die Annahmen. So wird für jedes Heizsystem vom Energieflussdiagramm ausgehend die Beschreibung durch eine lineare Programmierung formuliert. Danach folgt eine Beschreibung der physikalischen Komponenten und deren Implementierung. Des Weiteren enthält dieses Kapitel einen Leitfaden zur Bestimmung der Verbrauchsprofile für Wärme und Strom.

1. Einleitung

Kapitel 4 beschreibt die Ergebnisse des linearen Optimierungsproblems für beide Heizsysteme. Diese werden getrennt betrachtet und für jedes werden die entsprechenden Lösungen der verschiedenen Profile angegeben. Dabei werden durch die Variation der Eingangsparameter, Sensitivitätsanalysen angestellt. Im Speziellen wird der Einfluss des Pellets- und Strompreises auf die Dachflächenallokation analysiert. Ebenso wird die Verteilung von PV- Modulen und Sonnenkollektoren bei begrenzter Fläche untersucht. Für das Verbrauchsprofil eines Einfamilienhauses ist außerdem eine detaillierte Untersuchung des Kalkulationszinseszinses, der Investitionskosten und der Bausubstanz zu finden. Abschließend wird der Einfluss verschiedener Modellannahmen getestet.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse aus dem vorherigen Kapiteln gegenübergestellt. Dabei wird eine Aggregation der Kapitalwerte vorgenommen. Für jedes System wird der jeweilige Eigenverbrauch erhoben und die Werte werden miteinander verglichen.

Das abschließende Kapitel 6 beschäftigt sich mit den Schlussfolgerungen, die aus dieser Arbeit gezogen werden können.

2. Hintergrund

Die Wirtschaftlichkeit von Solarthermie- und Photovoltaikanlagen ist stark beeinflusst durch die Leistung der Sonneneinstrahlung, welche von Ort und Witterung abhängig ist. Von einer Globalstrahlung von 1367 W/m^2 ausgehend, treffen durch den Einfluss von Atmosphäre maximal etwa 1000 W/m^2 auf die horizontale Erdoberfläche. Allerdings wird bei bedecktem Himmel die Einstrahlung auf bis zu 50 W/m^2 reduziert. Summiert über das Jahr ergibt sich für Österreich eine durchschnittliche Einstrahlung von 600 bis 1300 kWh/m^2 ³, wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist.

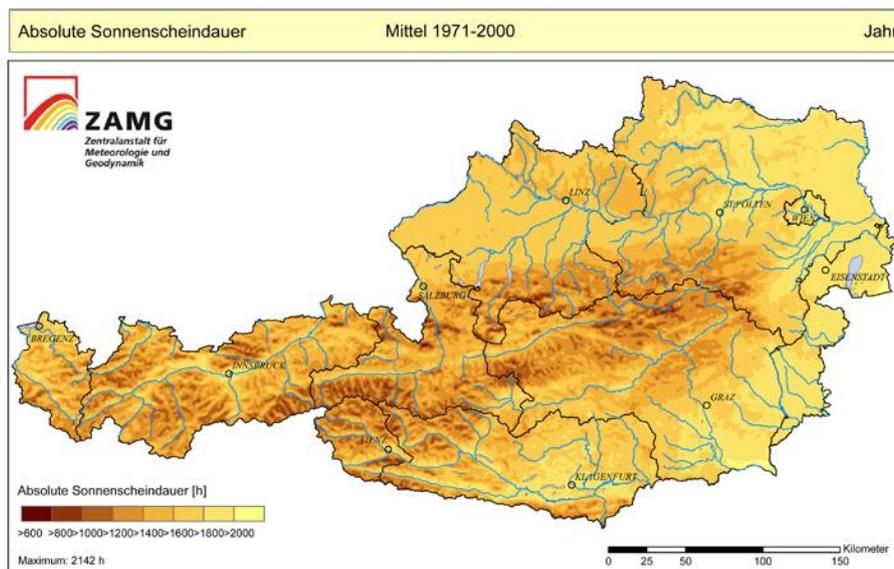


Abbildung 2.1 Darstellung der durchschnittlichen Sonnenscheindauer für Österreich für die Jahre 1971-2000, Quelle: ZAMG

Diese Werte sind nur von 1971 bis 2000 dargestellt. Wie in Abbildung 2.2 zu sehen ist, wird für die letzten 15 Jahre eine steigende Einstrahlung aufgezeichnet. Sollte dieser klimatische Trend anhalten, kann angenommen werden, dass die Volllaststunden und damit die Profitabilität von Solarthermie- und Photovoltaikanlagen mit der Laufzeit steigen werden.

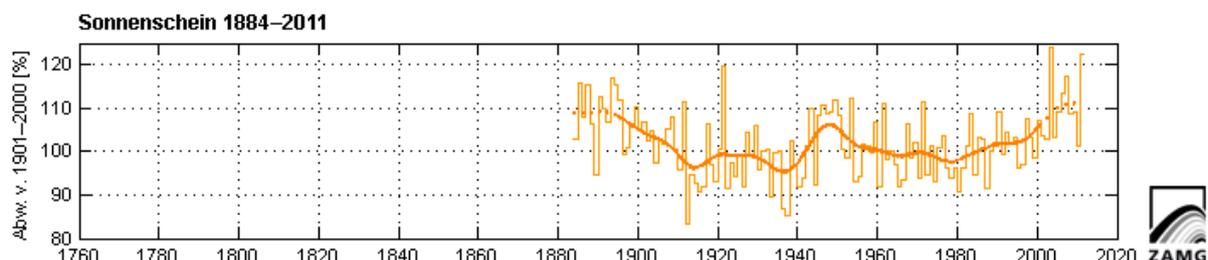


Abbildung 2.2 Entwicklung der Durchschnittlichen Sonnenscheindauer für Österreich⁴

³ www.pvaustria.at/wp-content/uploads/2013/07/Photovoltaik-Fibel-2014.pdf

⁴ „Histalp-at-tief“ von Reinhard Böhm - Reinhard Böhm u. a.: Eine neue Website mit instrumentellen Qualitätsklimadaten für den Großraum Alpen zurück bis 1760. In: Wiener Mitteilungen. Nr. 216, 2009, S. 7–20.

2. Hintergrund

Durch eine südliche Ausrichtung und eine Dachneigung von 45% kann die jährliche Ausbeute noch weiter erhöht werden, weswegen diese Arbeit ausschließlich von dieser Konfiguration ausgeht.⁵

Sowohl Solarthermie- als auch Photovoltaikanlage haben in den letzten Jahrzehnten, durch ein intensives Förderungsregime, ein hohes Wachstum verzeichnen können. Wie Abbildung 2.3 zeigt, unterliegt die jährlich installierte solare Kollektorleistung Wachstumszyklen, wobei das letzte Maximum im Jahr 2009 liegt. Ab diesem Zeitpunkt ist die Installation von Solarthermieanlagen rückgängig. In Österreich werden dabei verglaste Flachkollektoren mit einem Marktanteil von 87% am häufigsten eingesetzt. Das gegenteilige Szenario lässt sich in Abbildung 2.3 ablesen.

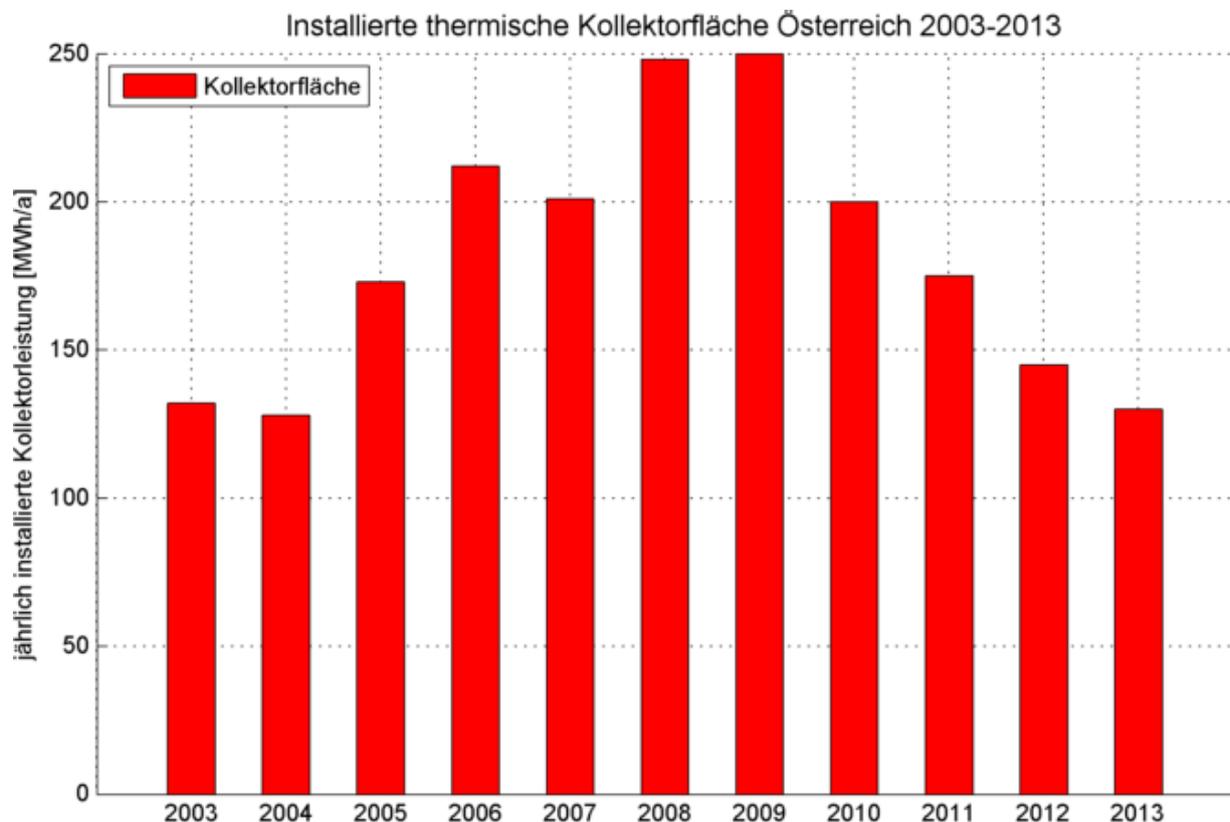


Abbildung 2.3 Jährlich installierte thermische Kollektorfläche (m² und MWth/Jahr) in Österreich in den Jahren 1975 bis 2013 nach Kollektortyp. Quellen: bis 2006: Faninger(2007), ab 2007: AEE INTEC

Bis in das Jahr 2008 stellten Photovoltaikanlagen nur ein Nischenphänomen dar. Wie in der Abbildung 2.4 zu sehen ist, konnte ab dem Jahr 2009 eine hohe Steigerungsrate verzeichnet werden. Da sowohl Solarthermie- als auch Photovoltaikanlagen auf verfügbare Dachflächen

⁵ Vgl.: Viessmann(2008), Planungshandbuch Solarthermie

2. Hintergrund

angewiesen sind, ist deutlich, dass ein Verdrängungswettbewerb zu Gunsten der PV- Anlagen eingesetzt hat.

Während der Systempreis für Solarthermieanlagen stagniert⁶ unterliegt der Photovoltaik-Modulpreis, wie in Abbildung 2.5 zu sehen, einer stetigen Preisreduktion. Dies ist vor allem der intensiven Förderung der Photovoltaikanlagen in Deutschland im Zuge der Energiewende zu verdanken. Ein weiterer Grund ist der Markteintritt Chinas in die Produktion von PV-Modulen, was den Preisverfall beschleunigt hat.

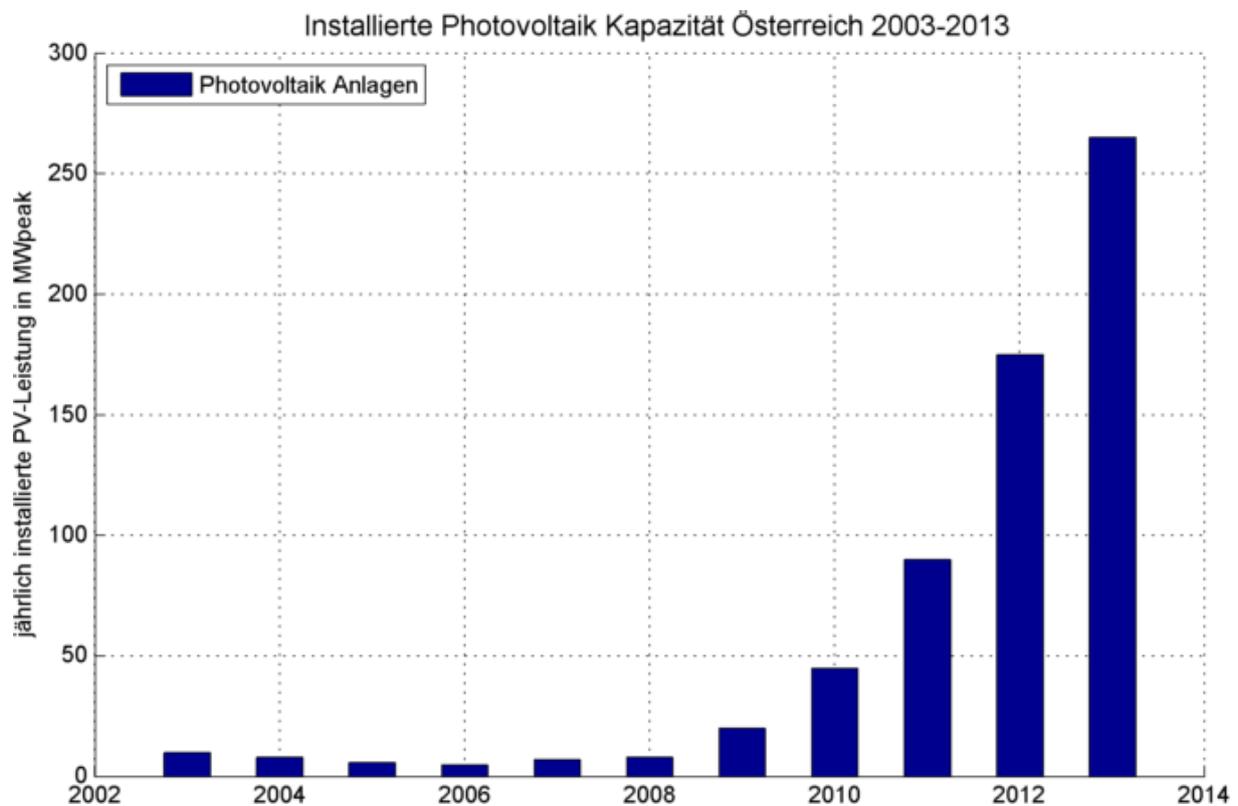


Abbildung 2.4 Jährlich in Österreich installierte PV-Leistung in kW_{peak} der Jahre 1992 bis 2013. Quellen: bis 2006: Faninger (2007); ab 2007: Erhebung Technikum Wien

⁶ Vgl.: Biermayr (2014)

2. Hintergrund

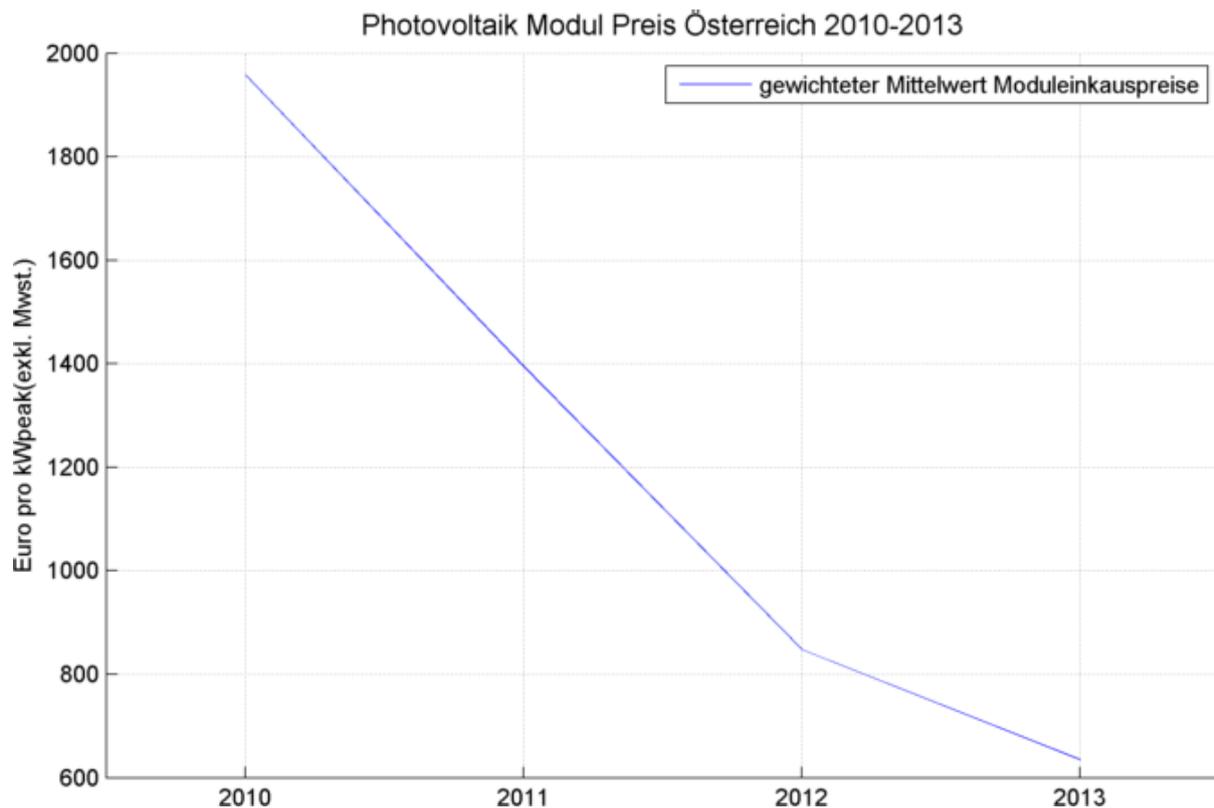


Abbildung 2.5 Mittelwert und Bandbreite der Moduleinkaufspreise der errichteten Anlagen der Jahre 2010 bis 2013, Werte exkl. MWSt.; Anzahl der Nennungen: 2010: n=28, 2011: n=26, 2012: n=28, 2013: n=32; Quelle: Erhebung Technikum Wien.

Die Rentabilität von Solarthermie- und Photovoltaikanlagen in Verbindung mit einem Wärmepumpensystem wurde unter anderem von Faninger(2012) untersucht. Der Betrieb wurde dabei mit dem Tool JAZcalc modelliert und aus den Resultaten die wirtschaftlichen Parameter bestimmt. Jedoch wurde keine Optimierung hinsichtlich der Größe und der Wahl der Solarthermie- und Photovoltaikanlagen angestellt. Diese wurden durch handelsübliche Größen dem Modell vorgegeben. Die Resultate liegen dabei entweder für PV oder Solarthermie vor. Die Resultate zeigen, dass eine Solarthermieanlage für das berechnete Szenario eine geringfügige Einsparung bewirkt.

Die Kombination einer Pelletsanlage mit Solarthermie wurde unter anderem von Persson(2006) analysiert. Dabei wurde die Software Lösung TRNSYS verwendet. Es wurden neben der Wirtschaftlichkeit auch die Effizienz und die Emissionen berücksichtigt. Auch in diesem Fall findet keine Optimierung der Größe der solarthermischen Anlage statt. Diese werden extern vorgegeben. Die wirtschaftliche Betrachtung zeigt, dass durch den Bau einer Solarthermieanlage die Gesamtkosten geringfügig reduziert werden können. So können die höheren Investitionskosten durch geringere Energiekosten ausgeglichen werden.

2. Hintergrund

Im Gegensatz zu den besprochenen vorhandenen Untersuchungen werden in dieser Arbeit ein Pelletofen und eine Wärmepumpe als Heizsysteme modelliert. Diese können sowohl über eine Solarthermie- als auch über eine Photovoltaikanlage verfügen. Die optimale Größe der Anlagen wird dabei nicht extern vorgegeben, sondern mittels einer linearen Mixed Integer Programmierung gefunden. Durch die Wahl unterschiedlicher Heizsysteme kann die jeweilige Effektivität und Sinnhaftigkeit einer Kombination der Technologien ermittelt werden. Die Analyse wird dabei für unterschiedliche Preisentwicklungen und charakteristische Verbrauchsprofile vorgenommen. Außerdem wird überprüft, wie bei geringen verfügbaren Flächen die Allokation von Solarkollektoren und Photovoltaik- Modulen verändert wird.

3. Methoden

3.1 Die untersuchten Energiesysteme

Das Konkurrenzverhältnis zwischen Photovoltaik- und Solarthermieanlagen wird für zwei verschiedene Heizsysteme untersucht. Es wird dabei nur die ökonomische Konkurrenz betrachtet und nicht die ökologische. Die Graue Energie für die Produktion dieser Technologien wird dabei nicht erfasst, ebenso wenig gilt es Emissionen zu minimieren.

Das Konkurrenzverhältnis wird für sechs verschiedene Verbrauchertypen untersucht. Diese Verbraucher sind durch eine Nachfrage an Strom, Wärme und Kühlung modelliert. Zuerst soll für ein Einfamilienhaus, mit vier oder zwei Bewohnern, die optimale Dimensionierung einer Solarthermie- und Photovoltaikanlage berechnet werden. Diese Analyse wird im nächsten Schritt um ein Mehrfamilienhaus erweitert. Zuletzt werden noch drei Gewerbetypen untersucht, welche jeweils ein sehr unterschiedliches charakteristisches Profil aufweisen. Dafür werden die Verhältnisse in einem Lebensmittelhandel, einer Bäckerei und einer ganzjährig geöffneten Schule analysiert.

Zur Modellierung des Wärmebedarfs und der Erträge aus Solarthermie und Photovoltaik, werden Temperaturwerte und Einstrahlungszeitreihen benötigt. Für diese Arbeit werden die meteorologischen Daten des Ortes Fürstenzell⁷ für das Jahr 2005 herangezogen. Diese werden durch den Deutschen Wetterdienst erfasst und sind öffentlich zugänglich. Die Auflösung von Einstrahlung und Temperatur liegt hierbei in stündlicher Form vor⁸. Die Wetterstation befindet sich an der deutsch-österreichischen Grenze und hat somit auch Gültigkeit für die nordöstliche Region von Österreich. Alle Investitionskosten und Energiepreise richten sich nach österreichischen Anbietern. Auch die angenommenen Subventionen orientieren sich an üblichen österreichischen Bundes- und Landesförderungen.

⁷ Sonneneinstrahlung 2005 Fürstenzell: URL: <http://www.soda-is.com/> (Abgerufen 20.2.1015)
Koordinaten (48.53 , 13.31)

⁸ Deutscher Wetterdienst (Abgerufen 10.2.2015) URL:
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Content%2FOeffentlichkeit%2FKU%2FKU%2FKU21%2Fklimadaten%2Fgerman%2Fausgabe__stundenwerte__tu.html

3.1.1 Darstellung des Pellets Heizsystems

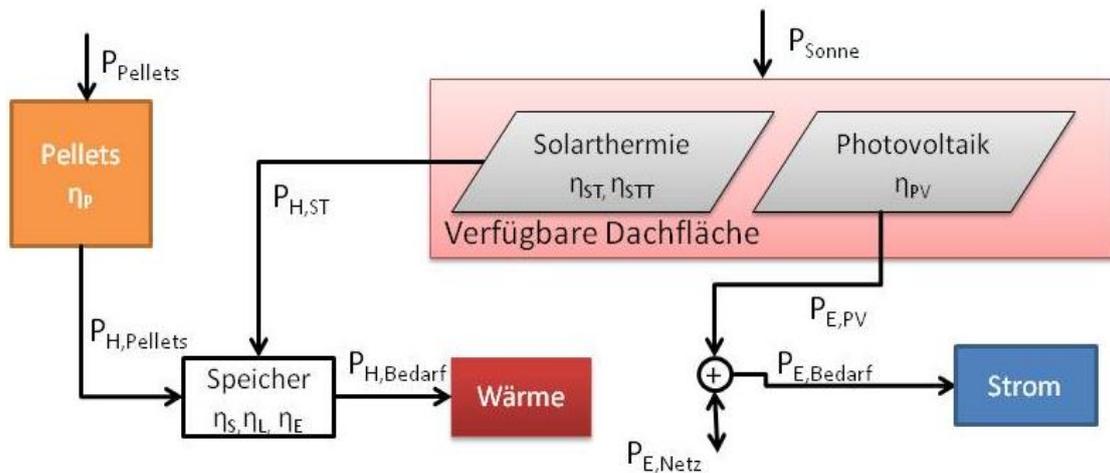


Abbildung 3.1 Darstellung des Energiesystems bei Verwendung eines Pelletofen als primäre Heizquelle

In dem, in Abbildung 3.1 dargestellten Energiesystem dient ein Pelletofen als primäre Heizvariante. Dieser kann über den Wirkungsgrad η_P die spezifische Heizleistung von Pellets direkt in Wärme umwandeln. Durch die Installation einer Solarthermie Anlage kann die Pelletsanlage entlastet werden und der Verbrauch an Pellets reduziert werden. Die solarthermische Anlage wandelt Sonnenenergie mit dem Wirkungsgrad η_{ST} in Wärme um. Die Leitungsverluste werden durch η_{STT} dargestellt. Pelletofen und Solarthermieanlage speisen einen Speicher welcher über Standby Verluste η_S und Ladeverluste η_L verfügt. Aus dem Speicher wird der Wärmebedarf entnommen. Die Stromversorgung ist in dieser Variante von der Heizversorgung unabhängig. Die Photovoltaikanlage wandelt Sonneneinstrahlung mit dem Wirkungsgrad η_{PV} in elektrischen Strom um. Hierbei werden auch die Verluste des Umrichters und der Leitungen einbezogen. Der Strom der Photovoltaikanlage kann nun entweder den Strombedarf decken oder in das Netz zurückgespeist werden.

3.1.2 Darstellung des Wärmepumpen Heizsystems

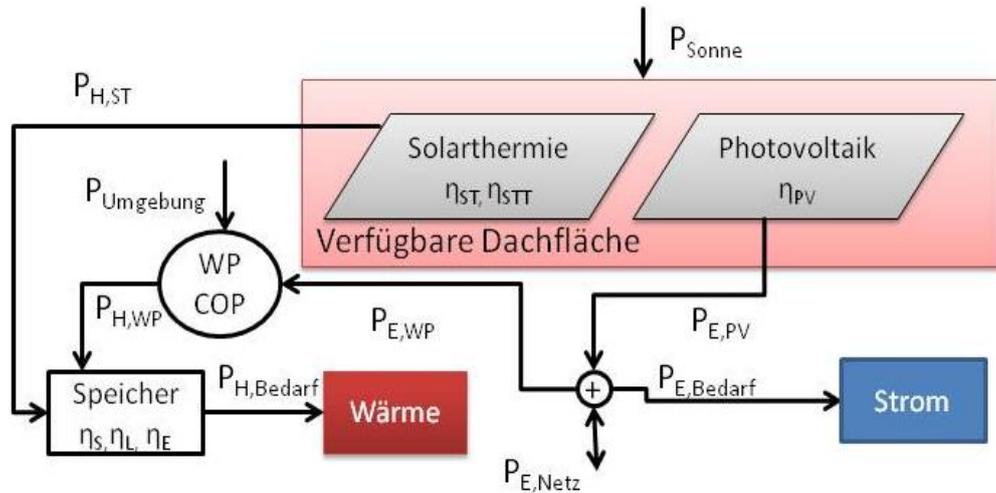


Abbildung 3.2 Darstellung des Energiesystems bei Verwendung einer Wärmepumpe

Die zweite Variante nutzt eine Wärmepumpe um den Wärmebedarf zu decken. Die allgemeinen Wirkungsgrade sind ident mit der Pellets Variante. Jedoch wird statt des Ofens nun eine Wärmepumpe verwendet. Diese wandelt mit elektrischer Energie, Umgebungswärme, von einem niedrigen energetischen Niveau, zu Nutzwärme um. Es handelt sich dabei um eine Sole-Erdwärme-Pumpe welche über das gesamt Jahr betrieben werden kann. Die Effizienz dieses thermodynamischen Vorgangs wird mit der Leistungszahl COP beschrieben. Wie ersichtlich ist, sind hier Wärme- und Stromsysteme miteinander verbunden. Dies bedeutet, dass der Strom welcher durch die Photovoltaikanlage produziert wird, auch dazu genutzt werden kann mittels der Wärmepumpe Wärmeenergie zu speichern. Somit können Photovoltaikanlagen Solarthermieanlagen substituieren, jedoch unterscheiden sich die beiden Technologien in Kosten und Wirkungsgrad.

3.2 Das Optimierungsmodell

Um eine optimale Dimensionierung der Photovoltaik- und Solarthermieanlagen zu finden wurde die Problemstellung als lineare Optimierung definiert. Allgemein lässt sich diese als⁹

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & g_i(\mathbf{x}) = b_i, \quad i = 1, \dots, p \\ & h_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, q \end{aligned} \tag{3.1}$$

anschreiben.

Die Zielfunktion mit den Optimierungsvariablen \mathbf{x} wird unter den Nebenbedingungen $g_i(\mathbf{x})$ und $h_i(\mathbf{x})$ minimiert. Dabei sind $g_i(\mathbf{x})$ alle als Gleichung und $h_i(\mathbf{x})$ alle als Ungleichung formulierte Beschränkungen. Als Zielfunktion, wird der in Unterkapitel 3.2.1 definierte Kapitalwert, minimiert. Die Nebenbedingungen ergeben sich aus den technischen Restriktionen des Energieversorgungssystems. So drücken diese etwa die Bedarfsdeckung oder Kapazitätsbeschränkungen aus. Die Lösung bilden die bestimmten Variablen \mathbf{x} unter welchen die Zielfunktion minimal ist.

Da der Einsatz von Photovoltaik- und Solarthermieanlagen optional ist, werden diese durch eine zusätzliche binäre Entscheidungsvariable definiert. Die Problemstellung entwickelt sich damit zu einer Mixed Integer Programmierung.

Die Implementierung erfolgte über Matlab 2013 und der Toolbox Yalmip. Dabei werden die Zielfunktion und die Nebenbedingungen in Matlab eingegeben. Das Optimierungsproblem wird dann von Yalmip in ein Gleichungssystem umgewandelt und an einen Solver übergeben. In dieser Arbeit wurde der Solver Gurobi gewählt.¹⁰

⁹ Bazarraa et al.(1990)

¹⁰ <http://www.gurobi.com>

3.2.1 Ökonomisches Modell der Kapitalwertmethode

In den verschiedensten Bereichen der Energiewirtschaft stehen die betriebswirtschaftlichen Überlegungen im Mittelpunkt. Dabei ist es notwendig, Investitionen mit den daraus resultierenden Nutzen, Kosten, beziehungsweise Einnahmen oder Einsparungen zu vergleichen. Für Heizsysteme werden dabei die Investitionen der Heizungsanlage, der laufende Betrieb und die Kosten für die Instandhaltung über die gesamte Nutzungsdauer der Anlage berechnet. Während der Nutzungsdauer der Anlage ändern sich wegen Preis- und Lohnsteigerungen auch die Ein und Ausgaben, sodass die Bewertung sowohl des investierten als auch des später eingesetzten Geldes zeitabhängig ist. Solche Fragestellungen lassen sich mittels dynamischer Wirtschaftlichkeitsberechnung handhaben. Für diese Arbeit wird die Kapitalwertmethode verwendet. Dabei werden Barwerte des Cash Flows, also Einnahmen weniger den Ausgaben, über die Nutzungsdauer summiert. Hierbei wird auf den Anfangszeitpunkt diskontiert um Zahlungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten vergleichbar zu machen¹¹. Der Kapitalwert C_0 berechnet sich nun zu

$$C_0 = -I_0 + \sum_{t=1}^L \frac{E-A}{(1+p_i)^t}, \quad (3.2)$$

wobei I_0 die anfänglichen Investitionskosten repräsentiert. E bezeichnet die jährlichen Einnahmen und A die jährlichen Ausgaben. Der Kalkulationszinssatz p_i bezeichnet die subjektive Mindestverzinsungsforderung und L die Laufzeit. Die Preisentwicklung für die verschiedenen Kosten n wie etwa Strom und Pellets werden durch eine jährliche prozentuelle Änderung p_N modelliert. Die vollständige Formel für den Kapitalwert lautet damit

$$C_0 = I_0 + \sum_n \sum_{t=1}^L \left(\frac{1+p_n}{1+p_i} \right)^t (E_n - A_n). \quad (3.3)$$

Da es sich hierbei um einen Verbraucher und keinen Produzenten handelt sind die Einnahmen Null und der Kapitalwert auf jeden Fall negativ. Eine Ausnahme bilden Photovoltaikanlagen. Diese lukrieren durch die Rückspeisung Einnahmen, welche durch einen Einspeisetarif verrechnet werden. Jedoch reduziert sich dadurch nur der negative Kapitalwert, da die Anlagen auf die Eigenversorgung ausgelegt werden und keine Produzenten darstellen. Aus Übersichtsgründen wird der Barwert in dieser Arbeit positiv dargestellt. Das Optimum bildet damit der geringste Barwert.

¹¹ Nakicenovic, Haas(2011)

3.2.2 Zielfunktion und Nebenbedingungen

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, haben Pellets und Wärmepumpe unterschiedliche Energieflüsse. Daraus resultieren jeweils gleichwertige Ziel und Nebenfunktionen. Indizes und Parameter werden am Ende von Kapitel 3.2.2.1 aufgelistet.

3.2.2.1 Zielfunktion und Nebenbedingungen für ein Pellets Heizsystem

Zielfunktion

Die Zielfunktion wird durch Minimierung des Kapitalwertes über die Laufzeit

$$\min C_0 = I_0 + C_{Strom} + C_{Solar} + C_{Pellets} \quad (3.4)$$

gebildet. Der erste Summand der Kostenfunktion I_0 beschreibt die Investitionskosten für das Heizsystem. Dieser hat auf die Variablen keinen Einfluss, da dieser konstant ist. Jedoch entspricht damit die Lösung der Zielfunktion dem Kapitalwert und kann sofort als solcher ausgewertet werden. Durch

$$C_{Strom} = \sum_{t=1}^{8760} \sum_{L=1}^{25} Netzbezug_t * Netztarif \left(\frac{1+p_s}{1+p_i} \right)^L + PV * I_{PVVar} + PV_{bin} * I_{PVfix} - \sum_{t=1}^{8760} \sum_{L=1}^{25} \frac{Ruckfluss_t * Einspeisetarif}{(1+p_i)^L} \quad (3.5)$$

werden alle strombezogenen Kosten abgedeckt. Es werden die fixen als auch die variablen Kosten für eine eventuelle Photovoltaikanlage mit einbezogen. Wie zu sehen ist, wird angenommen, dass der Netztarif jährlich um p_s steigt. Die Rückflusskosten, welche zu einem reduzierten Kapitalwert beitragen, bleiben jedoch konstant. Damit werden die Erträge aus der Einspeisevergütung längerfristig immer geringer auf den bezogenen Anfangszeitpunkt der Investition. Dies ist eine Annahme, die auf der großen ökonomischen, als auch auf politischer Unsicherheit dieser Zahlung basiert.¹²

Die Kosten für die Solarthermie Anlage werden durch einen fixen Anteil und einen variablen Anteil abgebildet. Damit erhöhen sie den Kapitalwert einerseits, jedoch reduzieren sie den Pelletsverbrauch.

$$C_{Solar} = Solar * I_{SolarVar} + Solar_{bin} * I_{Solarfix} \quad (3.6)$$

¹² Einspeisevergütung Österreich (Abgerufen 20.2.2015) URL www.pvaustria.at/strom-verkaufen

Die Kosten für den laufenden Betrieb der Pelletöfen berechnen sich wie folgt

$$C_{Pellets} = \sum_{t=1}^{8760} \sum_{L=1}^{25} Pellets_t * Brennstoffkosten * \left(\frac{1+p_p}{1+p_i}\right)^L + Wartungskosten_{Pellets} * L. \quad (3.7)$$

Wie zu sehen ist wird auch hier davon ausgegangen, dass die Brennstoffkosten jedes Jahr mit dem Faktor p_p ansteigen. Außerdem werden auch die Wartungskosten für das Heizsystems in dieser Kostenfunktion mit eingerechnet. Die jährlichen Wartungskosten werden dabei durch einen konstanten Betrag festgelegt, welcher durch empirische Quellen für das Jahr der Investition gefunden wurde. Es wird davon ausgegangen, dass die Wartungskosten mit dem Kalkulationszinssatz steigen, da dieser für Privatpersonen mit der Inflation mit einem Risikoaufschlag entspricht. Damit entspricht die Summe der Ausgaben einer Multiplikation in Gleichung 3.7 da sich Diskontierung und Preissteigerung aufheben.

Pelletsheizsystem spezifische Nebenbedingungen

Die Nebenbedingungen bilden in der linearen Programmierung die technischen Gegebenheiten ab. Dabei unterscheiden sich beide Heizsysteme. Für ein Pelletsheizsystem müssen jeweils für Strom als auch für den Wärmebedarf die Lastgleichungen erfüllt sein. Für den Stromverbrauch sind die folgenden Gleichungen definiert

$$Netzbezug_t + Eigenverbrauch_t = Verbrauch_{Strom,t} \quad (3.8)$$

$$Rückfluss_t + Eigenverbrauch_t = Erzeugung_{PV,t} . \quad (3.9)$$

Diese Gleichungen teilen den aus Photovoltaik erzeugten Strom in Eigenverbrauch und Rückspeisung auf. Der Eigenverbrauch ist durch den extern vorgegebenen Stromverbrauch bestimmt. Falls dieser nicht durch den Eigenverbrauch gedeckt werden kann wird Strom aus dem Netz bezogen

Die Lastbedingung für den Wärmebedarf wird als Ungleichung

$$Speicher_out_t \geq Verbrauch_{Wärme,t} \quad (3.10)$$

definiert. So kann verhindert werden, dass ein zu geringer Verbrauch eine untere Schranke für eine solarthermische Anlage darstellt. In diesem Fall wird die überschüssige Wärme nicht genutzt.

Der Speicher selbst

$$Speicher_{in_t} = Erzeugung_{Solar,t} * A_{Solar} + Pellets * \eta_{Pelletsofen} \quad (3.111)$$

kann durch den Pelletofen oder die solarthermische Anlage gefüllt werden. Die Solarthermische Erzeugung ist dabei von der installierten Kollektorfläche A_{Solar} abhängig.

Allgemeine Nebenbedingungen

Bei beiden Varianten wurde ein thermischer Speicher integriert. Die Gleichung für einen Speicher wird in einer linearen Optimierung als Beschränkung angegeben. Die Variable Speicher wird aus Stabilitätsgründen, sowohl im End, als auch Anfangszustand zu Null gesetzt. Die Gleichung

$$Speicher_{t+1} = Speicher_t * \eta_{Stunde} + Speicher_{in_t} * \eta_{Laden} - \frac{Speicher_{out_t}}{\eta_{Entladen}} \quad (3.12)$$

definiert, dass der Zustand eines Speichers aus seinem letzten Zustand definiert wird. Also die eingespeiste Energie abzüglich der entnommenen Energie. Die im Speicher enthaltenen Energiemenge wird durch die Stundenverluste stetig reduziert. Es sind Entnahme als auch Zufuhr mit einem einmaligen Verlust verbunden. Die zweite Ungleichung

$$Speicher_t > E_{max} * 0.2 \quad t \in \{2, T\} \quad (3.13)$$

besagt, dass der Speicher, bis auf den Anfangszustand niemals leer sein kann und immer mit einer Mindestmenge gefüllt sein muss.

Da die zentrale Fragestellung dieser Diplomarbeit die Flächenkonkurrenz zwischen Solarthermie- und Photovoltaikanlagen behandelt, wird für einen Teil der Untersuchungen die verfügbare Dachfläche begrenzt. Dadurch kann festgestellt werden welche der beiden Technologien bei begrenzter Fläche eine höhere Rentabilität aufweist. Dabei wird nur von der Dachfläche mit optimalen Bedingungen ausgegangen, also nur von Flächen welche nach Süden ausgerichtet sind, mit 45° geneigt sind und nicht von Beschattung betroffen sind.

Die Beschränkung der Dachfläche ist somit durch

$$A_{PV} + A_{Solar} \leq A_{Dachfläche} \quad (3.14)$$

definiert.

Indizes, Parameter und Variablen

Zur allgemeinen Lesbarkeit werden Indizes und Parameter kursiv geschrieben

Indizes:

$t = t_1, \dots, t_{8760}$. . . Stunden des betrachteten Jahres

$L = L_1, \dots, L_{25}$. . . Betrachtungszeitraum in Jahren

Parameter:

$Erzeugung_{PV,t}$. . . Um den Wirkungsgrad bereinigte Einstrahlungsenergie in kWh_{Strom}

$Erzeugung_{Solar,t}$. . . Um den Wirkungsgrad bereinigte Einstrahlungsenergie in kWh_{therm}

$Brennstoffkosten$. . . Brennstoffkosten von Pellets pro kWh Brennwert

$Strompreis$. . . Stromkosten pro kWh Strom bei Netzbezug

$Einspeisetarif$. . . Garantierte Einspeise Vergütung für Photovoltaik pro kWh

$\eta_{Laden}, \eta_{Entladen}, \eta_{Stunde}$. . . Wirkungsgrade für den thermischen Speicher

$\eta_{Pelletofen}$. . . Wirkungsgrad von Pellets Primärenergie in Nutzenergie

I_0 . . . Summierte Investitionskosten ohne Solarthermie und
Photovoltaikanlage für das jeweilige Szenario

I_{Solar} . . . Investitionskosten Sonnenkollektor €/m²

$I_{Solarfix}$. . . Einmalige Investitionskosten beim Bau einer Solarthermieanlage

I_{PV} . . . Investitionskosten Photovoltaik Modul pro €/m²

I_{PVfix} . . . Einmalige Investitionskosten beim Bau einer Photovoltaik Anlage

$Verbrauch_{Strom,t}$. . . Strombedarf des Verbrauchers in kWh

$Verbrauch_{Wärme,t}$. . . Wärmebedarf des Verbrauchers in kWh

L . . . Betrachtete Lebensdauer

p_i, p_s, p_p . . . Kalkulationszinsatz, Jährliche Strom und Pellets Preissteigerung

Positive Variablen:

A_{PV}	. . . Bruttofläche der Photovoltaik Modulen in m^2
A_{Solar}	. . . Bruttofläche der Sonnenkollektoren in m^2
$Pellets_t$. . . Verbrauchte Pelletsmenge Primärenergie in kWh
$Netzbezug_t$. . . Stromverbrauch durch Netzbezug
$Eigenverbrauch_t$. . . Stromverbrauch des durch die Photovoltaik Anlage erzeugter Strom
$Rückfluss_t$. . . Rückspeisung des durch die Photovoltaik Anlage erzeugten Strom
$Speicher_in_t$. . . Energieflüsse in und aus dem Speicher in kWh
$Speicher_out_t$	
$Speicher_t$. . . Speicherinhalt in kWh

Binäre Variablen:

$PV_{bin} \in \{0,1\}$. . . Entscheidungsvariable ist Eins sobald eine PV Anlage gebaut wird
$Solar_{bin} \in \{0,1\}$. . . Entscheidungsvariable ist Eins sobald eine Solarthermische Anlage gebaut wird

3.2.2.2 Zielfunktion und Nebenbedingungen für ein Wärmepumpen Heizsystem

Zielfunktion

Für eine Wärmepumpe muss die ursprüngliche Zielfunktion in die Form

$$\min C_0 = I_0 + C_{Strom} + C_{Solar} + C_{Wärmepumpe} \quad (3.15)$$

geändert werden. So umfasst I_0 in diesem Fall die Investitionskosten für die Wärmepumpe. Die Kostenfunktion für Strom und Solarthermie sind ident mit der ersten Variante. Die Stromkosten für die Wärmepumpe werden dabei zu dem normalen Strombedarf addiert. Die Wartungskosten für die Wärmepumpe werden in der Kostenfunktion

$$C_{Wärmepumpe} = \text{Wartungskosten}_{WP} * L \quad (3.16)$$

abgedeckt. Auch hier ist angenommen, dass die Wartungskosten mit dem Kalkulationszinssatz steigen.

Wärmepumpen Heizsystem spezifische Nebenbedingungen

In der Lastbedingung für dieses Szenario muss der Stromverbrauch der Wärmepumpe mitberücksichtigt werden. Die Variable $WP\text{Verbrauch}_t$ stellt die, durch die Wärmepumpe bereitgestellte, thermische Energie dar. Um daraus den Stromverbrauch zu ermitteln, muss die Variable noch mit der Leistungszahl COP dividiert werden.

$$\text{Netzbezug}_t + \text{Eigenverbrauch}_t = \text{Verbrauch}_{Strom,t} + \frac{WP\text{Verbrauch}_t}{COP} \quad (3.17)$$

$$\text{Rückfluss}_t + \text{Eigenverbrauch}_t = \text{Einstrahlung}_{PV,t} \quad (3.18)$$

Die Lastgleichung für den Wärmebedarf wird nun wieder als Ungleichung ausgeführt. Der Speicher wird mit solarthermisch erzeugter und durch die Wärmepumpe bereitgestellter Energie befüllt.

$$\text{Speicher_out}_t \geq \text{Verbrauch}_{Wärme,t} \quad (3.19)$$

$$\text{Speicher_in}_t = \text{Erzeugung}_{Solar,t} * \text{Solar} + WP\text{Verbrauch}_t \quad (3.20)$$

Allgemeine Nebenbedingungen

Die Allgemeinen Nebenbedingungen werden ident mit denen in Kapitel 3.2.2.1 beschriebenen Nebenbedingungen ausgeführt.

Indizes, Parameter und Variablen

Zusätzlich zu den Parameter und Variablen in Kapitel 3.2.2.1 werden

Parameter:

COP . . . Leistungszahl konstant über das gesamte Jahr angenommen

Variablen:

WPVerbrauch_t . . . Durch die Wärmepumpe bereitgestellte Wärmeenergie in
kWh_{thermisch}

3.3 Technisches Modell und empirische Skalierung

Im folgenden Unterkapitel wird die Modellierung der Komponenten und die Parameterbestimmung erläutert. Dabei wurden folgende Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

- Die betrachtete Dachfläche ist ausschließlich nach Süden ausgerichtet und nicht verschattet.
- Der Wirkungsgrad des Photovoltaik Moduls ist nicht von der Außentemperatur abhängig.
- Es werden nur thermische Energieflüsse zwischen den Komponenten modelliert.
- Innere thermische Vorgänge im Speicher werden nicht berücksichtigt.
- Die Kostenfunktion für die Photovoltaik und Solarthermische Anlage wird durch einen Fix Anteil und einen von der Fläche abhängigen variablen Anteil dargestellt.

3.3.1 Modell der Solarthermieanlage

Das Solarthermische Modell

Um die optimale Dimensionierung einer Solarthermieanlage zu ermöglichen muss diese in das Modell integriert werden. Dabei ist es notwendig, die durch Solarkollektoren verbauten Flächen in nutzbare Wärmeenergie umzurechnen. Die Modellierung wird in diesem Fall nur für einen Flachkollektor vorgenommen. Im ersten Schritt muss zwischen der Bruttokollektorfläche, der Absorberfläche und der Aperturfläche unterschieden werden. Die Bruttokollektorfläche repräsentiert die benötigte Dachfläche und ist durch die Abmessungen bestimmt. Der Absorber besteht bei Flachkollektoren aus streifenförmigen oder vollflächigen Blechen. Dessen Fläche ist für die Leistungsaufnahme ausschlaggebend. Die Aperturfläche hingegen bezeichnet die Glasfläche auf welche das Sonnenlicht einstrahlt. Das Verhältnis zwischen Bruttofläche und Aperturfläche wird folgend mit $\eta_{\text{Fläche}}$ bezeichnet. Aus dem Verhältnis zwischen der auf die Aperturfläche des Kollektors auftreffenden Sonneneinstrahlung und der nutzbaren Wärme, welche dem Kollektor entnommen werden kann wird der Wirkungsgrad

$$\eta_{\text{Kollektor}} = \eta_0 - \frac{k_1 \cdot \Delta\theta_t}{G_t} - \frac{k_2 \cdot \Delta\theta_t^2}{G_t} \quad (3.21)$$

bestimmt.¹³ Der optische Wirkungsgrad η_0 bezeichnet den Anteil, welcher durch das Glas auf den Absorber trifft und nicht durch Reflexion verloren geht. Die Verlustbeiwerte k_1 k_2 entsprechen den Strahlungsverlusten welche sich durch die Temperaturdifferenz $\Delta\theta_t$ zwischen dem Absorbertemperatur T_a und der Außenlufttemperatur T_u ergeben. Die auf die Aperturfläche eintreffende Strahlung G_t steht dabei im reziproken Verhältnis zu den Strahlungsverlusten. Die Absorbertemperatur T_a kann nur schlecht ermittelt werden. Deswegen wird der Mittelwert aus Vor und Rücklauftemperatur verwendet, welcher in dieser Arbeit mit 50 C° angenommen wird¹⁴. Die Verlustbeiwerte und der optische Wirkungsgrad η_0 werden in einem der Europäischen Norm EN 12975 festgeschriebenen Verfahren ermittelt. In dieser Arbeit wurden Flachkollektoren modelliert, da diese in Österreich die höchste Verbreitung haben, wie in Kapitel 2.1 beschrieben wurde. Die Parameter sind dem Datenblatt

¹³ Vgl.: Viessmann(2008), Planungshandbuch Solarthermie

¹⁴ Vgl.: Wesselak,Schabbach(2009) Regenerative Energietechnik

des Modells Alpine 2500 entnommen, welche durch den TZS, Stuttgart bestimmt wurden. Die Werte sind der Tabelle 3.1 wiedergegeben.¹⁵

	n_0 [%]	k_1 [W/m ² K]	k_2 [W/m ² K ²]
Flachkollektor	80,2	3.806	0.0012

Tabelle 3.1 Kenndaten des Sonnenkollektors Alpine RKEQ 2500

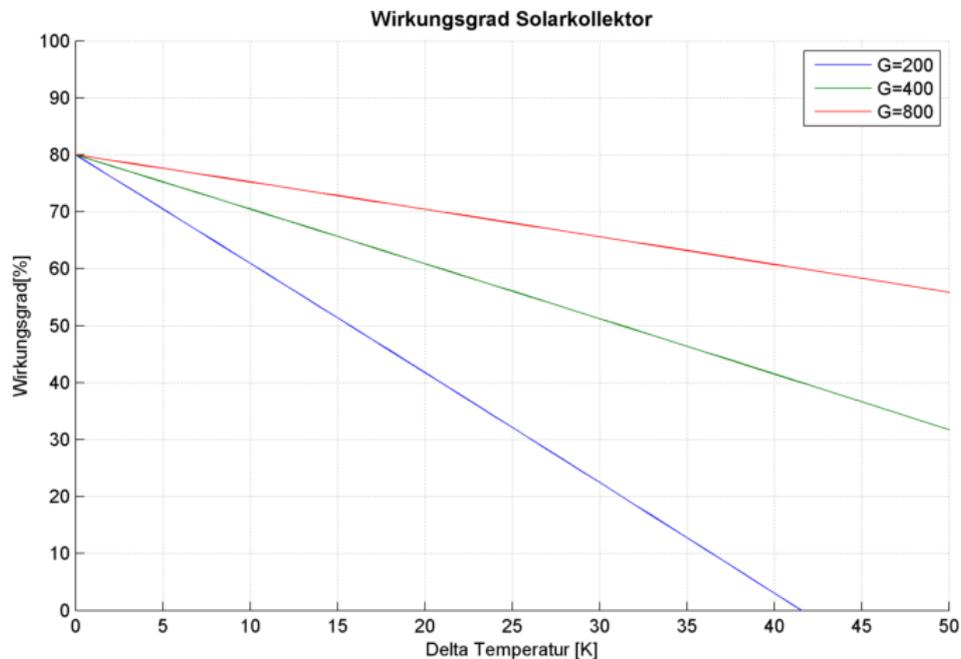


Abbildung 3.3 Der Wirkungsgrad des Solarkollektors RKEQ 2005 bei unterschiedlicher Strahlungsintensität

In Abbildung 3.3 ist der Wirkungsgrad für den Solarkollektor zu sehen. Auffällig ist, dass bei den gegebenen Daten der quadratische Anteil gering ist. Dadurch können auch bei hohen Temperaturdifferenzen noch positive Wirkungsgrade erzielt werden. Wie in Gleichung 3.21 abzulesen werden bei geringer Einstrahlung die Strahlungsverluste dominant und der Wirkungsgrad damit negativ. Deswegen sind in einstrahlungsarmen Perioden nur sehr geringe Erträge möglich sind.

Für den weiteren Wärmetransport vom Kollektor zum Speicher, wird noch ein Wirkungsgrad von η_{TT} zum Abdecken der Leitverluste angenommen. Der Gesamtwirkungsgrad für einen Quadratmeter mit einem Sonnenkollektor verbauten Fläche beträgt

$$\eta_{Gesamt} = \eta_{Fläche} * \eta_{Kollektor}(T, G) * \eta_{TT}. \quad (3.22)$$

Die gesamte durch Solarthermie umgewandelte thermische Leistung beträgt damit

¹⁵ Datenblatt Alpine RKEQ (Abgerufen 20.2.2015) URL ://www.dincertco.de/logos/011-7S1893%20F.pdf

$$P_{t,therm} = G_{t,45^\circ} * \eta_{Gesamt} * A_{Solar}. \quad (3.23)$$

Es werden ausschließlich nach Süden ausgerichtete Dachflächen berücksichtigt welche eine Neigung von 45° aufweisen. Diese Konfiguration ermöglicht eine höhere Ausbeute gegenüber einer horizontalen Bauweise. Die Gegenüberstellung der Einstrahlung und der Erträge aus einem Quadratmeter Sonnenkollektor sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Wie darin deutlich zu sehen ist, beschränken sich die Erträge auf die Frühlings- und Sommermonate. Im Winter ist kein positiver Wirkungsgrad zu erreichen, weshalb eine Solarthermie-Anlage üblicherweise in dieser Periode nicht in Betrieb ist.

Preis Parameter

Um die Parameter für den Preis einer Solarthermie Anlage zu bestimmen wurde ein Bottom-up Ansatz gewählt. So wurden die Investitionskosten und größenabhängigen Kosten addiert und mit Komplettangeboten eines Lieferanten verglichen um die Plausibilität der Preise zu verifizieren.

Es fallen für die Installation einer solarthermischen Anlage folgende Kosten durch Komponenten und Dienstleistungen an. Die Kosten für den Speicher werden getrennt geführt und sind unabhängig von der Größe.

SST25VM inkl. Volumensmessteil	599€
Ausdehnungsgefäß	50€
Montage inkl. Rohre	500€
Dachhacken	125€
Solarmodul	212€/m ²
Dachmontage Solarmodul	30€/m ²

Tabelle 3.2 Auflistung der Kostenfaktoren für eine Solarthermieanlage

Dies ergibt einen Fixbetrag von 1274€ und einem variablen Anteil von 242€ pro m² installierter Solarkollektoren. Verglichen mit den Fertigungsgewinnen der Firma Solarenergy, ergibt dies eine gute Näherung für eine Solarthermieanlage für haushaltstypische Größen. Dies zeigt, dass Skaleneffekte für eine größere Kollektorfläche gut kompensiert werden, mit den Zusatzkosten für leistungsfähigere Komponenten die eine Vergrößerung der Kollektorfläche bedingt.¹⁶

¹⁶ Siehe Preisliste (Abgerufen 20.2.2015) URL www.solarenergy.at/de/solar-strom/preisliste.pdf

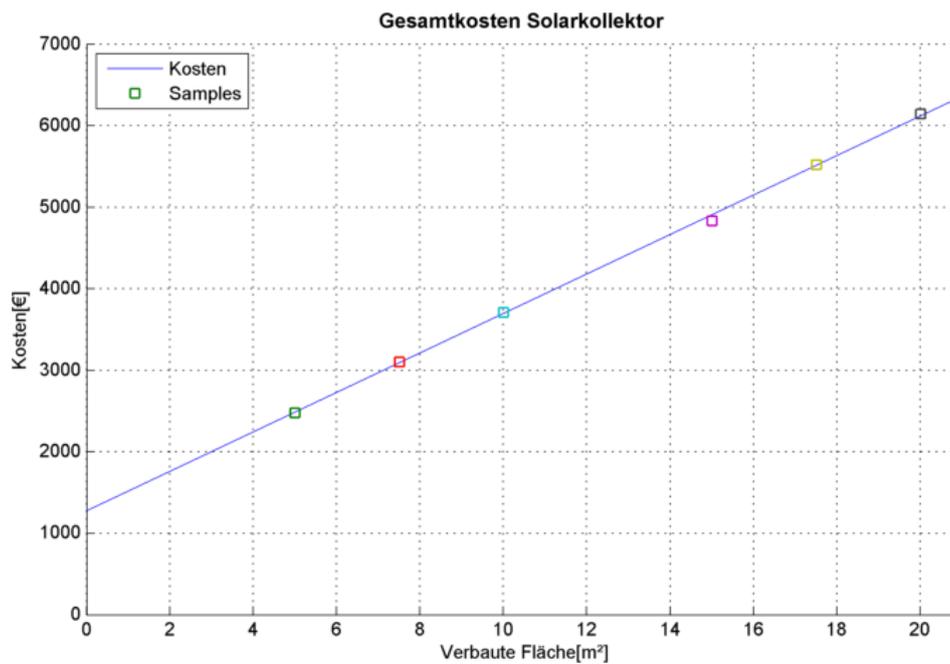


Abbildung 3.4 Die Kostenfunktion für eine Solarthermieanlage mit Vergleichspunkten von verfügbaren Angeboten

3.3.2 Modell der Photovoltaik Anlage

Das Photovoltaik Modell

Der durch eine PV-Anlage erzeugte Strom pro Quadratmeter Dachfläche wird mit

$$P_{t,elekt} = \eta_{PV} * G_{t,45} * PR \quad (3.24)$$

wiedergegeben. Der Wirkungsgrad η_{PV} wird durch die technologische Beschaffenheit des Photovoltaik Modules bestimmt. Dieser ist definiert aus dem Verhältnis der Strahlungsenergie auf das Modul und dem elektrischen Output. G_t bezeichnet die Einstrahlung pro Quadratmeter bei Südausrichtung und einem Neigungswinkel von 45° . Der Skalar PR bezeichnet den Leistungsfaktor. Dieser bewertet die Qualität der installierten Anlage. Er ist unabhängig von der Lage und beschreibt den Zusammenhang zwischen dem theoretischen und dem praktischen Output einer Solarthermieanlage. Er wird beeinflusst durch Heizverluste des Moduls und Verschattung, aber auch durch Verluste der elektrischen Leitungen und der Umwandlungsverluste vom Gleichstrom auf den genutzten Wechselstrom. Da von optimalen Bedingungen ausgegangen wird und keine Verschattung angenommen wird, orientiert sich der Leistungsfaktor in diesem Modell an sehr guten vergleichbaren Photovoltaikanlagen.¹⁷

¹⁷ Mehr Informationen zu Performance Ratio (Abgerufen 10.2.2015) URL http://everto.at/fileadmin/Everto/Fachinfos/Performance_Ratio_01.pdf

Die gewählten Photovoltaik Module und Umrichter verfügen über die Parameter¹⁸:

	PR	η_{PV}
PV Anlage	80%	15.2%

Tabelle 3.3 Die Leistungsparameter des Solarmoduls KIOTO KPU 250 PE poly mit Fronius Symo Wechselrichter

Die gesamten Erträge eines Quadratmeter Solarmodul sind in Abbildung 3.5 erkennbar. Wie das Modell nahe legt, ist der PV-Ertrag proportional zur Einstrahlung da Temperatureffekte nicht berücksichtigt worden sind. Diese würden eine Reduktion der Leistung in der Zeit höchster Strahlungsintensität ergeben.¹⁹

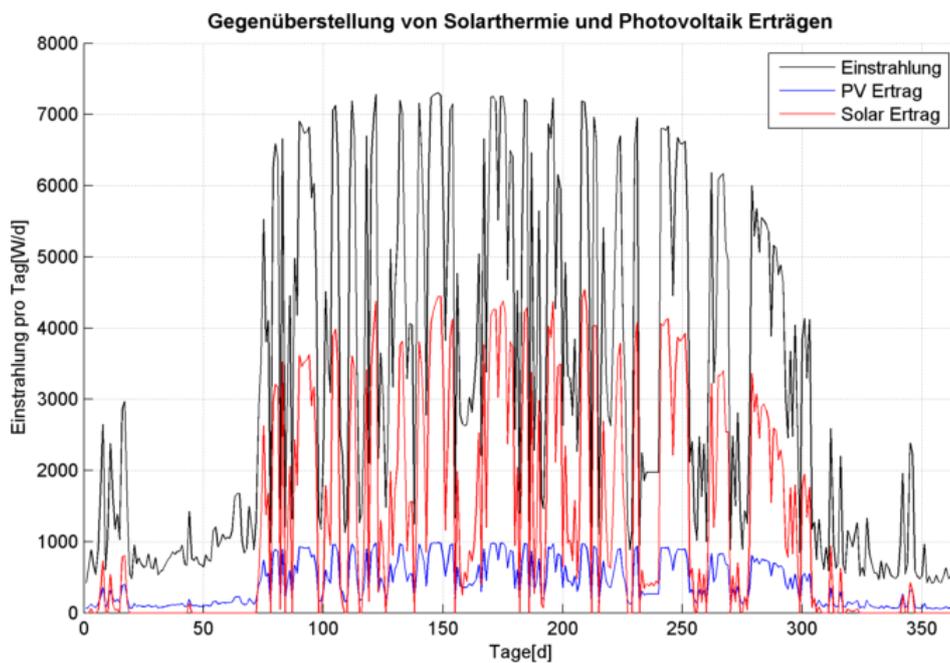


Abbildung 3.5 Vergleich der täglichen Strahlungserträge pro m² zwischen der Solarthermie und der Photovoltaik Anlage bei der Einstrahlung von Fürstenzell in 2005

18 Gewählte Komponenten und Preise (Abgerufen 10.2.2015) URL www.karmawerte.at/photovoltaik-sets/

19 Vgl.: Wesselak, Schabbach(2009)

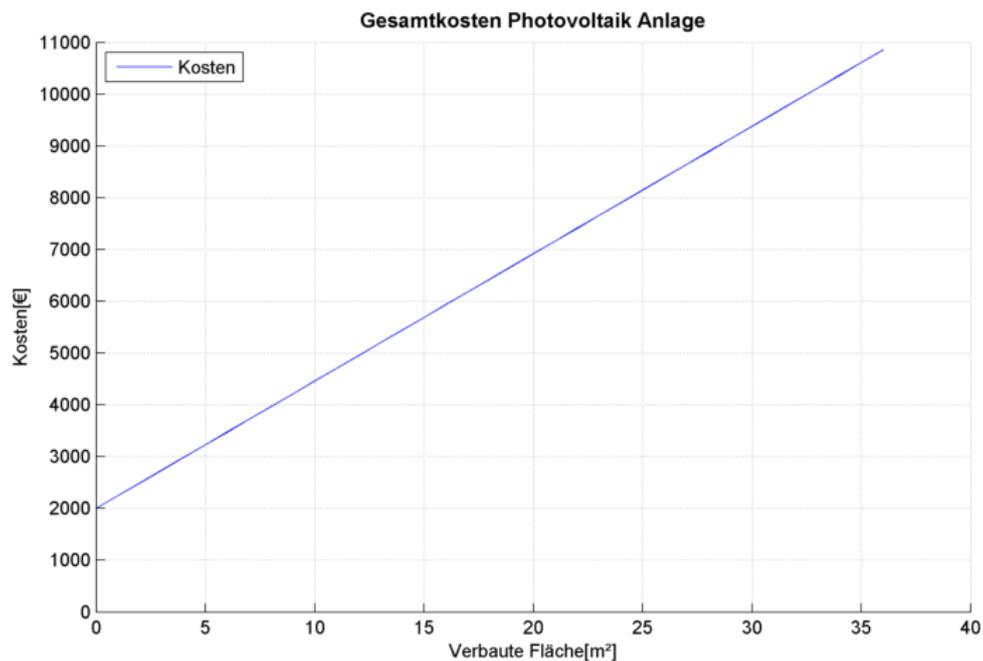
Preis Parameter

Abbildung 3.6 Die Kostenfunktion für eine Photovoltaikanlage mit Vergleichspunkten von verfügbaren Angeboten

Zur Bestimmung von Fixanteil und der größenabhängigen Komponente wurden verschiedene Angebote des gleichen Moduls durch eine Gerade approximiert. Da üblicherweise nur in [€/kWp] verkauft werden, musste noch Anhand des Wirkungsgrad auf [€/m²] umgerechnet werden. In diesem Fall benötigt eine 1 kWp Anlage 6,5 m² Dachfläche. Für kleinere Anlagengrößen kann der Preis nur unzureichend durch die Kostenfunktion dargestellt werden. Der hohe Fixanteil bewirkt jedoch, dass kleinere Anlagen als 7m² ohnehin nicht gebaut werden.

3.3.3 Berechnung des Heizbedarfs

Um den Heizbedarf zu ermitteln wird auf synthetische Lastprofile zurückgegriffen. Dabei werden für die unterschiedlichen Verbraucher nach dem Leitfaden der BGW²⁰ Wärmeprofile erstellt. Die BGW Richtlinien sind ursprünglich für den Gasverbrauch entwickelt worden, jedoch bilden diese eine aussagekräftige Ausgangsbasis für Untersuchungen alternativer Heizkonzepte. Die Auflösung des Wärmebedarfs kann dabei stündlich wiedergegeben werden. Dies steht im Einklang mit den vorhandenen Eingangsdaten.

²⁰ Richtlinien zu BGW Lastprofilen (Abgerufen 10.2.2015)

https://www.eko-netz.de/files/eko-netz/download/3.5_standardlastprofile_bgw_information_lastprofile.pdf

Der Wärmebedarf berechnet sich nun zu

$$Q_n = KW * h(T_a) * F(D) * SF(h) \quad (3.25)$$

KW entspricht dem Kundenfaktor und ist ein Skalar, welcher mit einer bekannten Menge Q_n bestimmt werden kann. Somit kann der jährliche Verbrauch auf einen bestimmten Kundenverbrauch normiert werden.

$h(T_a)$ entspricht der Lastprofilfunktion und hat die Form.

$$h(T_a) = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{T_a - T_0}\right)^C} + D \quad (3.26)$$

Es handelt sich hierbei um eine Sigmoid Funktion welche für eine gemittelte Tagestemperatur T_a einen Gewichtungsfaktor für den Wärmebedarf eines Tages ergibt. Durch Mittelwertbildung der Tagestemperatur wird die Speicherfähigkeit der Gebäudehülle modelliert. Die einzelnen Parameter A,B,C,D werden für jedes zu untersuchte Objekte bestimmt. T_0 bezeichnet die Referenztemperatur und ist auf 40 C° festgelegt.

$F(D)$ stellt den der Wochentagsfaktor dar, welcher vom Gewerbetyp und vom Wochentag abhängig ist. Dadurch ist es beispielsweise möglich das charakteristische Profil eines Gewerbes, welches am Wochenende geschlossen hat, zu modellieren.

$SF(h)$ entspricht dem Stundenfaktor welcher von der geglätteten Tagesmitteltemperatur und der jeweiligen Stunde abhängig ist. Daraus ergibt sich eine prozentuelle Tagesverteilung der Last, womit ein Lastprofil in stündlicher Auflösung möglich ist.

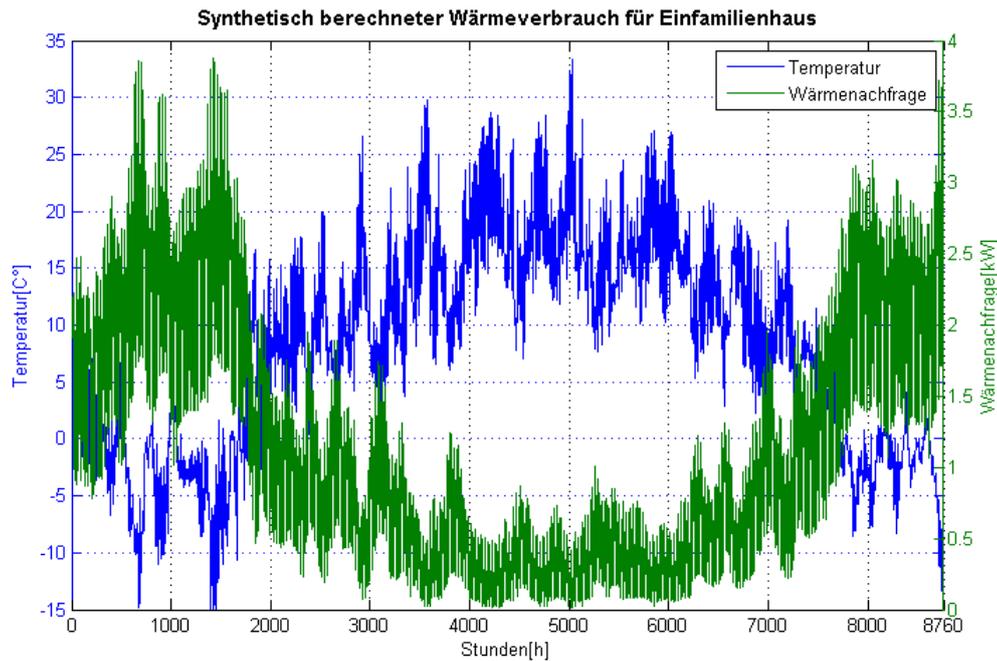


Abbildung 3.7 Das synthetische Wärmeverbrauchsprofil eines Einfamilienhaus über das Jahr 2005 in Fürstzell

Für ein Einfamilienhaus mit der Temperaturmessreihe in Fürstzell ist in Abbildung 3.7 ersichtlich, dass der höchste Bedarf an Wärmeenergie in den Herbst- und Wintermonaten besteht. Hingegen wird in den Sommermonaten, in welchen die Sonneneinstrahlung am höchsten ist, der Wärmebedarf primär durch den Warmwasserverbrauch bestimmt.

3.3.5 Bestimmung der Stromprofile

Um einen möglichst realistischen Verbrauch abzubilden wurden für nicht gewerbliche Verbraucher synthetische Lastprofile verwendet.²¹

Das Profil wird dabei durch ein Bottom-up Konzept erstellt. Dabei wird von den im Haushalt lebenden Personen und der Anzahl an charakteristischen Haushaltsgeräten ausgegangen. In einem weiteren Schritt werden die Verbrauchsprofile der Geräte bei stochastischem Betrieb summiert.²² Im Gegensatz zu einem Standard Last Profil ergibt sich damit eine höhere Fluktuation. Dies entspricht einem realistischen Abbild eines Kunden, was speziell für den durch Photovoltaik erzeugten Strom von Bedeutung ist. Da die Stromgestehungskosten für eine Photovoltaik Anlage höher sind als der Tarif für die Rückeinspeisung ist nur der

²¹ Die Daten wurden im Forschungsprojekt „aDSM – Aktives Demand-Side-Management durch Einspeiseprognose“ erstellt (FFG-Projekt Nr.: 834612). Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „Neue Energien 2020“ durchgeführt.

²² mehr Informationen zu synthetischen Lastprofilen (Abgerufen 10.2.2015) URL: http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_227437.pdf

Eigenverbrauch profitabel.²³ Deswegen sollte sichergestellt werden, dass die Photovoltaikanlage für den Verbrauch richtig dimensioniert ist.

Die Zusammenstellung der Verbraucher in einem Einfamilienhaus ist in der Tabelle 3.4 wiedergegeben.

	Umwältpumpe	Kühlschränke	Gefriergeräte	Waschmaschine	Wäschetrockner	Geschirrspüler	T V	P C	Licht
Einfamilienhaus 4 Personen	1	2	1	1	0	1	3	2	1
Einfamilienhaus 2 Personen	1	2	1	1	0	1	2	1	1

Tabelle 3.4 Die Gerätezuordnung zu den synthetischen Stromprofilen für ein Einfamilienhaus mit zwei oder vier Personen

Werden nun die synthetischen mit den Standardlastprofilen in Abbildung 3.8 für eine Woche verglichen, wird schnell der Unterschied deutlich. So verfügt das H0 Profil über denselben Jahresverbrauch wie der vier Personen Haushalt, jedoch fällt der Unterschied zwischen Lastspitze und Lastsenke sehr viel deutlich aus. Auch ist nicht ersichtlich wie viele Personen in einem Haushalt leben.

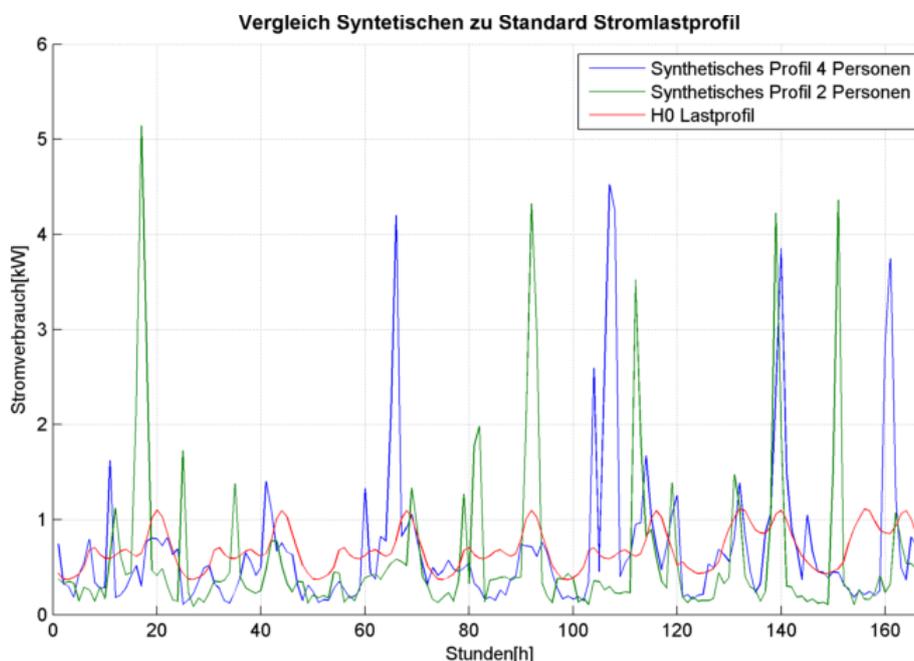


Abbildung 3.8 Darstellung des Stromverbrauchs über einer Woche für das Standardlastprofil und zwei synthetischen Lastprofilen

²³ Lettner, Auer (2013)

Das Stromprofil für ein Mehrfamilienhaus wurde aus der Summe von 10 synthetischen Haushaltsprofilen gebildet, mit einer Gesamtanzahl von 18 Einwohnern.

Für die Großkunden Szenarien wurden Standard Last Profile nach BDEW verwendet. Da die konstruierten Großkunden nicht mehr als 100 000 kWh pro Jahr verbrauchen ist dies zulässig. In Abbildung 3.9 sind für die gewählten Gewerbetypen die Profile für eine Werk Woche abgebildet. Jedes dieser Profile weist eine charakteristische Struktur auf. Ein Lebensmittelladen weist eine hohe Grundlast auf, da der Kühlbedarf auch über die Öffnungszeiten hinausgeht. Ab 8 Uhr steigt der Verbrauch stark an. Zu Mittag reduziert sich der Verbrauch wieder. Nachmittags stellt sich wieder eine Verbrauchsspitze ein, bis in die Nacht der Bedarf wieder auf die Grundlast zurückfällt. Eine Bäckerei hingegen zeichnet sich durch einen sehr zeitigen Verbrauch aus. So steigt ab 4 Uhr der Verbrauch und erreicht um 7 seine Spitze. Ab 11 Uhr reduziert sich der Verbrauch wieder. Die Schule hingegen zeichnet sich durch eine sehr geringe Grundlast, dafür über eine hohe Spitzenlast aus. Ab 8 Uhr steigt der Bedarf und erreicht um 12 die Verbrauchsspitze.

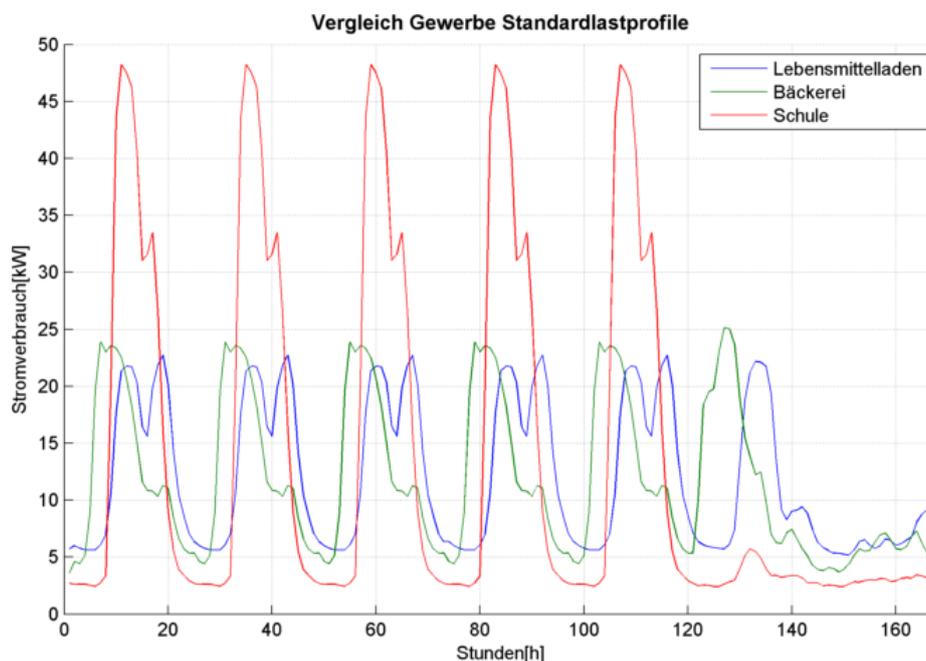


Abbildung 3.9 Darstellung des Stromverbrauchs über einer Woche für die Standardlastprofil einer Bäckerei, eines Lebensmittelhandels und einer Schule

4. Ergebnisse

Dieses Kapitel widmet sich den Lösungen des im vorigen Kapitel vorgestellten linearen Optimierungsproblems. Die Resultate werden durch Sensitivitätsanalysen zu Energiepreiserhöhungen, Kalkulationszinssatz, Investitionskosten und Wärmebedarf dargestellt. Dabei wird von unbegrenzter Dachfläche ausgegangen und die optimale Verteilung zwischen Photovoltaik- und Solarthermieanlagen verglichen. Außerdem werden für ausgewählte Preisszenarien, der Einsatz beider Technologien bei begrenzter Fläche analysiert.

Das Kapitel beinhaltet eine Auswertung der Simulationen für sechs Verbrauchertypen:

- Einfamilienhaus mit vier oder zwei Haushaltsangehörigen, mit und ohne Subventionen
- Mehrfamilienhaus
- Lebensmittelhandel
- Bäckerei
- Schule

Die Fläche für die Gewerbebetriebe und die öffentlichen Einrichtungen wurde so dimensioniert, dass alle über denselben Stromverbrauch verfügen. Ausgehend von der Fläche des Gewerbebetriebs wurde dann der typische Wärmebedarf für das jeweilige Unternehmen bestimmt. Durch die unterschiedlichen Lastprofile soll der Unterschied zwischen dem optimalen Einsatz von Photovoltaik- und Solarthermieanlagen hervorgehoben werden.

Für das Szenario Einfamilienhaus mit vier Haushaltsangehörigen wird dabei die detaillierteste Untersuchung angestellt. Hierbei wird auch anhand von Modifikationen des Modells dessen Plausibilität kontrolliert. Für die weiteren Verbrauchertypen wird auf charakteristische Unterschiede eingegangen.

Die Ergebnisdarstellung unterscheidet zwischen den zwei Heizvarianten. Das Pellet-Heizsystem verfügt durch den Pelletpreis über einen weiteren Freiheitsgrad. Dadurch ist ein direkter Vergleich nur für den Strompreis gegeben.

4.1 Optimale Flächenallokation bei Pelletheizsystemen

Der Kapitalwert eines Pellet- Heizsystems steht in starker Abhängigkeit zum Pellets- und Strompreis. Damit sind zwei variable Energiekosten Komponenten zu analysieren. Diese entwickeln sich über die Laufzeit mit einem jeweils eigenen prognostizierten Kostenanstieg. Als erklärendes Beispiel sei dazu auf die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 4.1 links verwiesen. Diese wird dreidimensional dargestellt, womit jeder Punkt in der betrachteten Bandbreite des Kostenanstiegs ablesbar wird. Die Z-Achse der linken Abbildung stellt die Summe der verbauten Module in m² dar. Da bei Pelletsanlagen Strom und Wärme entkoppelt sind, ist leicht zu erkennen, dass eine Strompreiserhöhung nur Einfluss auf die Photovoltaikfläche hat. Umgekehrt verhält es sich mit Preiserhöhungen von Pellets, welche ausschließlich Einfluss auf die optimale Solarfläche haben. Der Kapitalwert wird durch die Färbung repräsentiert. Jedoch verfügt diese Darstellung über keine Information, welchen Einfluss der Bau der jeweiligen Technologie auf den Kapitalwert hat. Zu diesem Zweck wurde ein Konkurrenzfaktor definiert.

$$\text{Konkurrenzfaktor}(p_p, p_s) = 0 \quad (4.1a)$$

$$\text{Konkurrenzfaktor}_{\text{Färbung}}(p_p, p_s) = \text{Kapitalwert}_{\text{Optimal}} \quad (4.1b)$$

$$\forall (PV = 0, \text{Solar} = 0)$$

$$\text{Konkurrenzfaktor}(p_p, p_s) = -\left(\frac{\text{Kapitalwert}_{PV=0} - \text{Kapitalwert}_{\text{Optimal}}}{\text{Kapitalwert}_{PV=0}}\right) * 100 \quad (4.2a)$$

$$\text{Konkurrenzfaktor}_{\text{Färbung}}(p_p, p_s) = \text{Kapitalwert}_{PV=0} \quad (4.2b)$$

$$\forall (\text{Kapitalwert}_{\text{Solar}=0} > \text{Kapitalwert}_{PV=0})$$

$$\text{Konkurrenzfaktor}(p_p, p_s) = \left(\frac{\text{Kapitalwert}_{\text{Solar}=0} - \text{Kapitalwert}_{\text{Optimal}}}{\text{Kapitalwert}_{\text{Solar}=0}}\right) * 100 \quad (4.3a)$$

$$\text{Konkurrenzfaktor}_{\text{Färbung}}(p_p, p_s) = \text{Kapitalwert}_{\text{Solar}=0} \quad (4.3a)$$

$$\forall (\text{Kapitalwert}_{\text{Solar}=0} < \text{Kapitalwert}_{PV=0})$$

Bei dieser Darstellung wird davon ausgegangen, dass nur die Anlagentechnologie gebaut wird, welche den besseren Kapitalwert ergibt. Dieser Kapitalwert wird durch die Färbung repräsentiert. Der Konkurrenzfaktor, stellt die auf den gegebenen Kapitalwert bezogene Einsparung in Prozent dar, welche durch den Bau der zweiten Technologie möglich ist. Das Vorzeichen gibt an welche Technologie gewählt worden ist. Wird nur eine

Solarthermieanlage installiert ist dieser Faktor negativ, bei einer Photovoltaikanlage positiv. Somit kann aus beiden Darstellungen in Abbildung 4.1 sowohl auf den Einfluss auf den Kapitalwert, als auch mit Hilfe der linken Grafik auf den Platzbedarf geschlossen werden. Wenn die Simulation entweder keine Solar- oder Photovoltaikfläche berechnet beträgt der Konkurrenzfaktor Null und die Färbung ist ident mit dem optimalen Fall. Zur besseren Sichtbarkeit ist noch entlang eines synchronen Preisanstiegs eine graue Linie ausgeführt.

4.1.1 Einfamilienhaus

Der Stromverbrauch der Einfamilienhäuser wurde durch das synthetische Stromprofil ermittelt. Der Wärmebedarf orientiert sich an Musterhäusern, welche über eine gute Wärmedämmung verfügen. Für die Parameter der Lastprofilfunktion 3.26 wird auf den Anhang verwiesen.

	Stromverbrauch[MWh]	Wärme[MWh]	W-Profil	E-Profil
Einfamilienhaus 4 Personen	4,754	10	Efh0	Syn
Einfamilienhaus 2 Personen	3,583	7	Efh0	Syn

Tabelle 4.1 Beschreibung der Kennwerte der Einfamilienhaushalte

4.1.1.1 Einfluss der Anzahl an Haushaltsangehörigen auf die Flächenallokation

Sensitivitätsanalyse für einen 4 Personen Haushalt

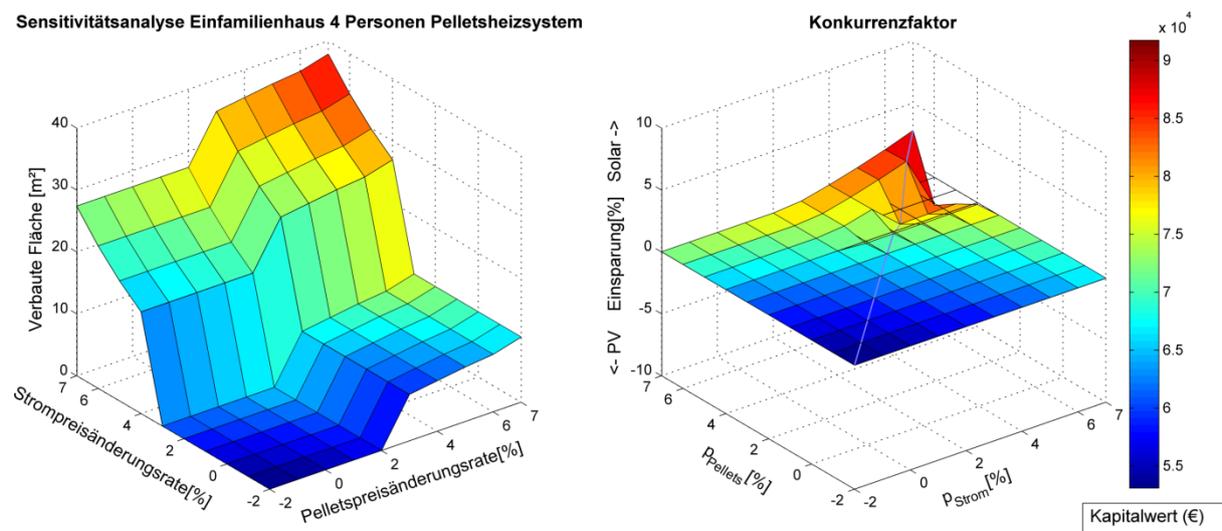


Abbildung 4.1 Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5.01c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

Wird nun eine Sensitivitätsanalyse für ein Einfamilienhaus angestellt, fällt in Abbildung 4.1 links auf, dass sich die Aufteilung zwischen Photovoltaik und Solar in vier Bereiche gliedern lässt. Bis zu einer Pelletpreissteigerung von 3% und einer Strompreissteigerung von 4% führt keine der beiden Technologien zu einem verbesserten Kapitalwert. Die Optimierung berechnet, dass ab einer jährlichen Pelletpreissteigerung von 3% eine Solarthermieanlage mit 7.4m² Fläche profitabel ist. Die benötigte Fläche steigt auf 10.5 m² an, bei 7% Steigerung. Im dritten Bereich wird ab einer Strompreissteigerung über 4% der Bau einer 16.4m² großen Photovoltaikanlage rentabel. Der Flächenbedarf der PV- Anlage steigt dabei auf 27.3m² für 7 % Strompreissteigerung. Einzig im Preiskorridor von über 3% Pellets- und 4% Strompreissteigerung wird sowohl PV als auch Solar gebaut. Die Konkurrenz ist damit auf diesen Bereich beschränkt. Wie in Abbildung 4.1 rechts zu sehen, folgt die Hilfslinie für synchrone Preissteigerung keinem monotonen Verlauf. Bei 4 und 5 % Steigung ergibt eine Solarthermieanlage einen billigeren Kapitalwert. Ab 6 bis 7 % ist eine Photovoltaikanlage im Vorteil. Für den Punkt einer 4% Steigung ergibt sich ein Konkurrenzfaktor von -0.17% und ein Kapitalwert von 75062€. Dies ist gleichbedeutend damit, dass mit dem Bau einer zusätzlichen Photovoltaikanlage zu einer bestehenden Solarthermieanlage, der Kapitalwert um 0.17% verbessert werden kann. Der Platzbedarf in diesem Fall würde sich damit von 8.1m² auf 24.5m² erhöhen. Eine Verbesserung des Kapitalwerts von 0.17% bedarf also einer um 202% erhöhten Fläche. Dies zeigt, dass in dem gegebenen Fall durch den zusätzlichen Bau einer Photovoltaikanlage nur eine sehr geringe Verbesserung des Kapitalwerts möglich ist, jedoch ein Vielfaches an Platz benötigt wird.

Um die Flächenkonkurrenz bei begrenzter Fläche noch genauer zu analysieren wird für das Preisszenario einer synchronen Preissteigerung von 4 % die vom Kapitalwert optimale Verteilung von Solar und PV Flächen bei steigender verfügbarer Dachfläche untersucht. Wie in Abbildung 4.2 zu sehen ist, werden Solarthermieanlagen erst ab einer Mindestfläche von 4 m² gebaut, was durch den Fixkostenanteil der Installation bedingt ist. Danach wächst der Anteil mit der verfügbaren Fläche bis zum Optimum von 7.76m². Erst ab einer Dachfläche von 19 m² wird es, bei geringer Reduktion der Solarkollektorflächen, rentabel eine PV-Anlage zu installieren. Am Kapitalwert entlang der verfügbaren Dachfläche wird ersichtlich, dass der Bau einer Solarthermieanlage einen viel signifikanteren Einfluss hatte, als die Erweiterung um eine Photovoltaikanlage.

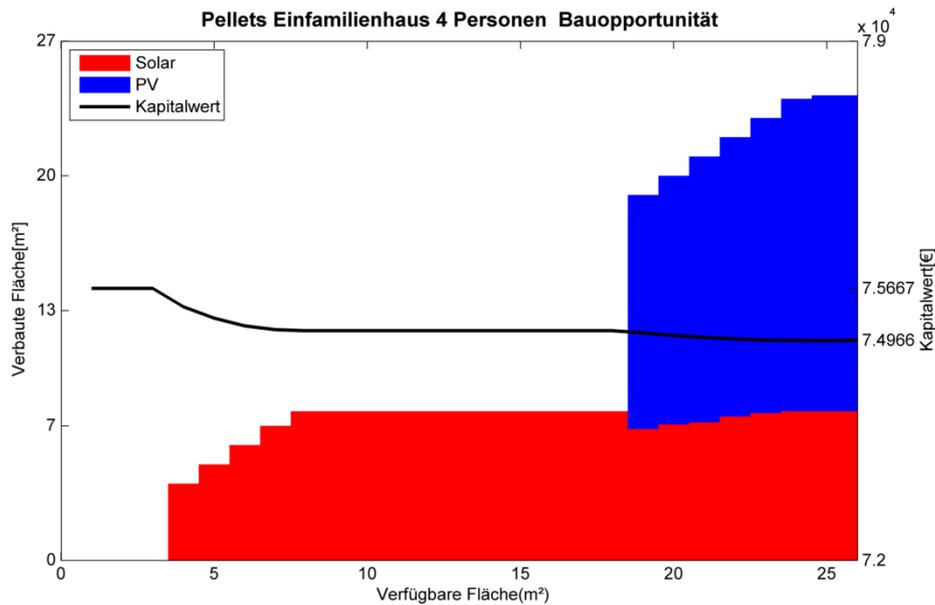


Abbildung 4.2 Bau Opportunität zwischen Photovoltaik und Solarthermieanlage für ein Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen, 4% Strom und Pelletpreissteigerung, 3.5% Kalkulationszinssatz

Eine weitere Möglichkeit die Konkurrenz zwischen Photovoltaik- und Solarthermieanlagen darzustellen, ist die Einsparung pro Quadratmeter verbauter Kollektoren, respektive Photovoltaikmodule zu berechnen. Da die beiden Technologien bezüglich Pellets- und Strompreissteigerung entkoppelt sind, kann diese Darstellung zweidimensional erfolgen. Dabei wird wieder von synchronem Preisanstieg von Pellets und Strom ausgegangen. Wie in Abbildung 4.3 abzulesen, ist die mögliche Einsparung bei einer Solarthermieanlage in jedem Punkt signifikant höher als bei einer PV- Anlage. Bei 4% Preissteigerung beträgt die Einsparung pro Quadratmeter 74€ für eine Solarthermieanlage und 7.9€ für eine Photovoltaikanlage.

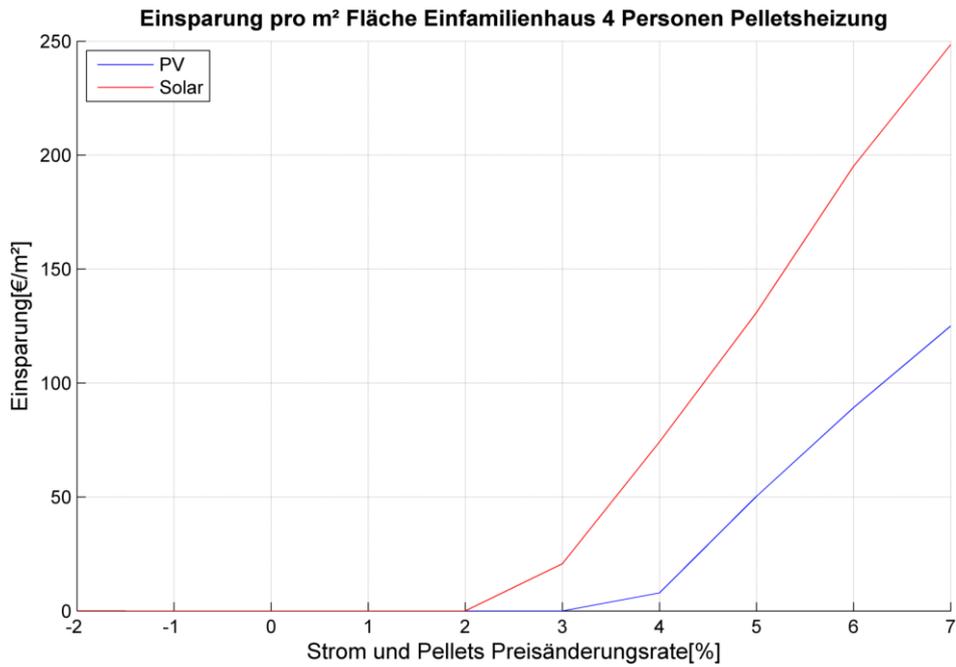


Abbildung 4.3 Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5.01c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

Sensitivitätsanalyse für 2 Personen Haushalt

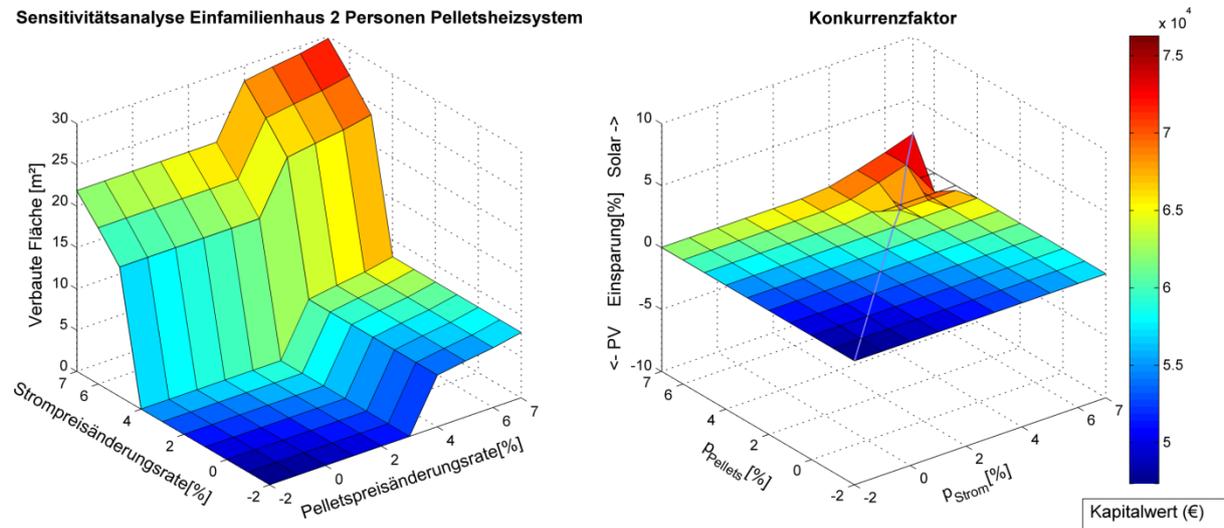


Abbildung 4.4 Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Einfamilienhaus 2 Personen mit Pelletofen, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5.01c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

In Abbildung 4.4 ist eine Sensitivitätsanalyse für einen zwei Personen Haushalt abgebildet. Die Simulation zeigt ein zum vier Personen Haushalt vergleichbares Bild. Wieder ist der Einsatz der beiden Technologien in vier Teile geteilt, jedoch sind die Grenzen verschoben. Der geringere Strombezug führt zu einem höheren Schwellenwert für den Bau von

PV-Anlagen. Erst bei 5% jährlicher Strompreissteigerung werden Photovoltaikanlagen mit 15.6m² rentabel. Die PV- Fläche wächst auf 21.8m² bei 7 % Preissteigerung.

Auch eine Solarthermieanlage wird erst ab 4% Pelletpreissteigerung rentabel. Dessen Dimensionierung beträgt dabei 6.25m² und erhöht sich auf 7.8 m², bei 7% Preissteigerung. Dies bewirkt eine wesentlich geringere Flächenkonkurrenz. Der Konkurrenzfaktor bei jeweils maximaler Steigung von 7% beträgt nur 2.15 %. Der Trend welcher schon in Abbildung 4.1 auftritt wird auch hier festgestellt. So erwirtschaften Solarthermieanlagen bei synchronem Preisanstieg bis 5% einen niedrigeren Kapitalwert. Für höhere Steigerungsraten ergibt eine Photovoltaikanlage als primäre Technologie, jedoch einen geringeren Kapitalwert.

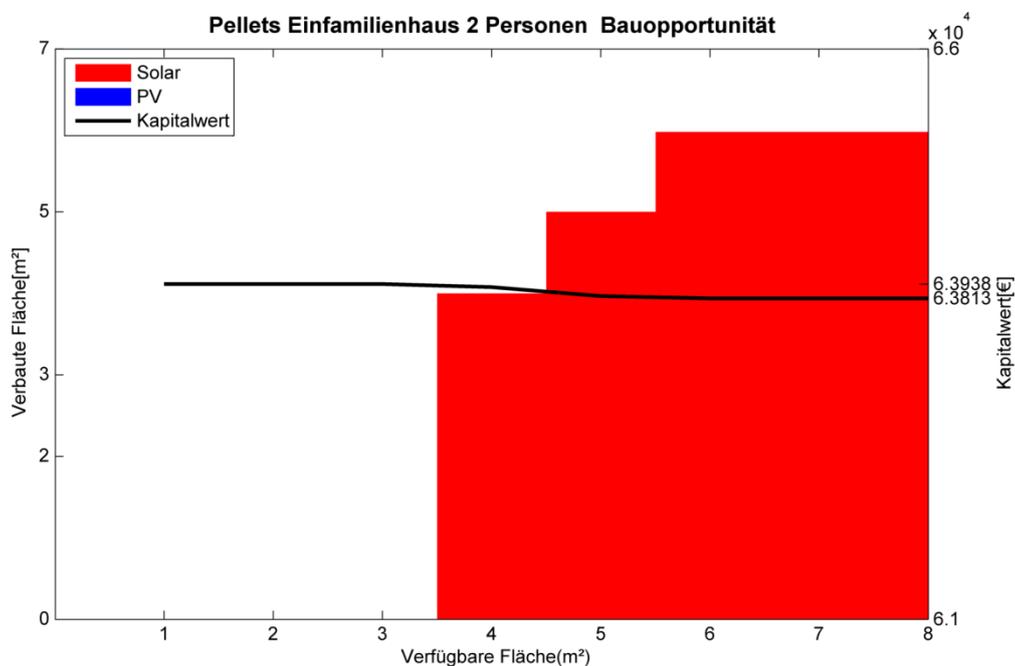


Abbildung 4.5 Bau Opportunität zwischen Photovoltaik und Solarthermieanlage für ein Einfamilienhaus 2 Personen mit Pelletofen, 4% Strom und Pelletpreissteigerung, 3.5% Kalkulationszinssatz

In Abbildung 4.5 ist nun die Bauopportunität bei jeweils 4 % Steigung zwischen PV und Solarthermie zu sehen, welche in diesem Fall eindeutig ausfällt. So wird ab dem Schwellwert von 4 m² sukzessive die Solarthermieanlage bis zum maximalen Wert von 5.98 m² ausgebaut. Die Reduktion des Kapitalwerts beträgt dabei 125€. Der Bau einer Photovoltaikanlage ist in diesem Szenario nicht rentabel.

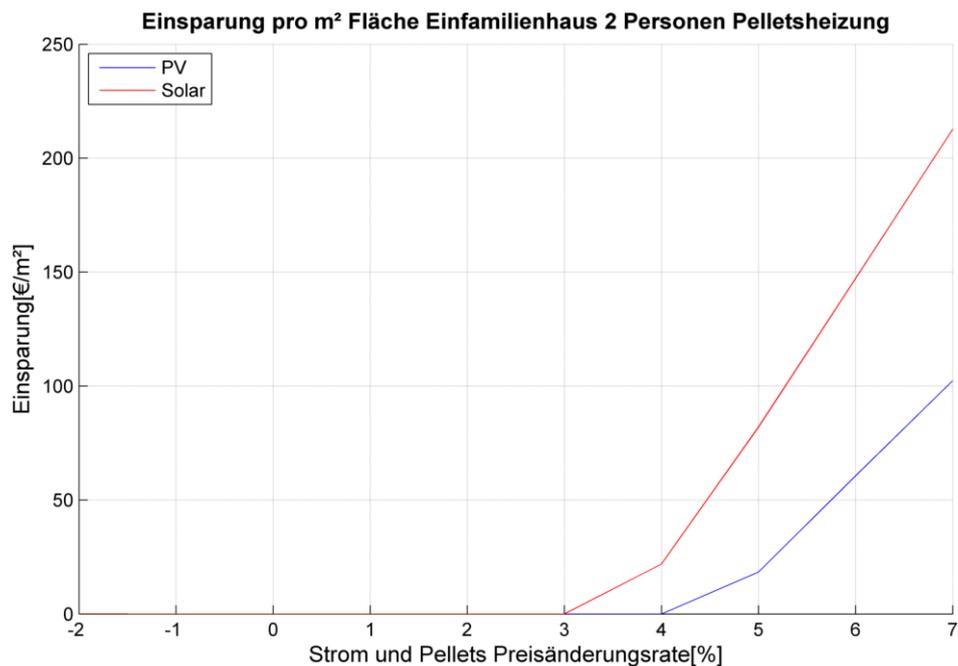


Abbildung 4.6 Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Einfamilienhaus 2 Personen mit Pelletofen, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5.01c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

Auch in der Abbildung 4.6 zur Einsparung pro Quadratmeter fällt auf, dass diese einen zu Abbildung 4.3 vergleichbaren Verlauf aufweist. Einzig, die Schwelle ab wann auf die Technologie zugegriffen wird, wurde verschoben.

4.1.1.2 Einfluss von Förderungsmöglichkeiten auf die Flächenallokation

Sensitivitätsanalyse für einen 4 Personen Haushalt mit Förderungen

Nun werden von den Investitionskosten typische Subventionen abgezogen, wie sie im Anhang beschrieben sind. Es handelt sich dabei ausschließlich um eine einmalige Prämie, für Solarthermieanlagen jeweils mit einem fixen und einem größenabhängigen Anteil. In Abbildung 4.7 links, sind die Ergebnisse inklusive Subventionen abgebildet. Im Unterschied zum ursprünglichen Ergebnis ist auffallend, dass die Subvention einen großen Einfluss auf die Solarfläche hat. So wird durch die Simulation schon bei geringer Pelletpreisreduktion von 2%, eine Fläche 4.9 m² berechnet. Diese wächst sukzessive an und beträgt 12.1m² bei einer Pelletpreissteigerung von 7%. Eine Photovoltaikanlage ist schon ab 3 Prozent Strompreissteigerung mit einer Modulfläche von 22.2m² rentabel. Für eine 7% jährliche Strompreissteigerung ergibt sich eine Fläche von 39.1m². Wie in Abbildung 4.6 rechts zu sehen ist, bewirken Subventionen eine sehr ausgeprägte Konkurrenz zwischen den Technologien. Für eine synchrone Preissteigerung liegt diese von 3 bis 5 % zugunsten von

Solarthermieanlage als primäre Technologie. Danach erweist sich eine Photovoltaikanlage als rentabler. Der Konkurrenzfaktor ist sehr viel ausgeprägter und damit ist die Einsparung durch eine sekundäre Technologie auf den Kapitalwert höher. Für das Szenario von jeweils 4% Preissteigerung ergibt sich ein Konkurrenzfaktor von -1.8% mit einem Kapitalwert von 71929€. Wird nun in diesem Punkt zu einer Solarthermieanlage mit 9.2m² eine Photovoltaikanlage mit 26.1m² gebaut kann der Kapitalwert um 1.8% verbessert werden.

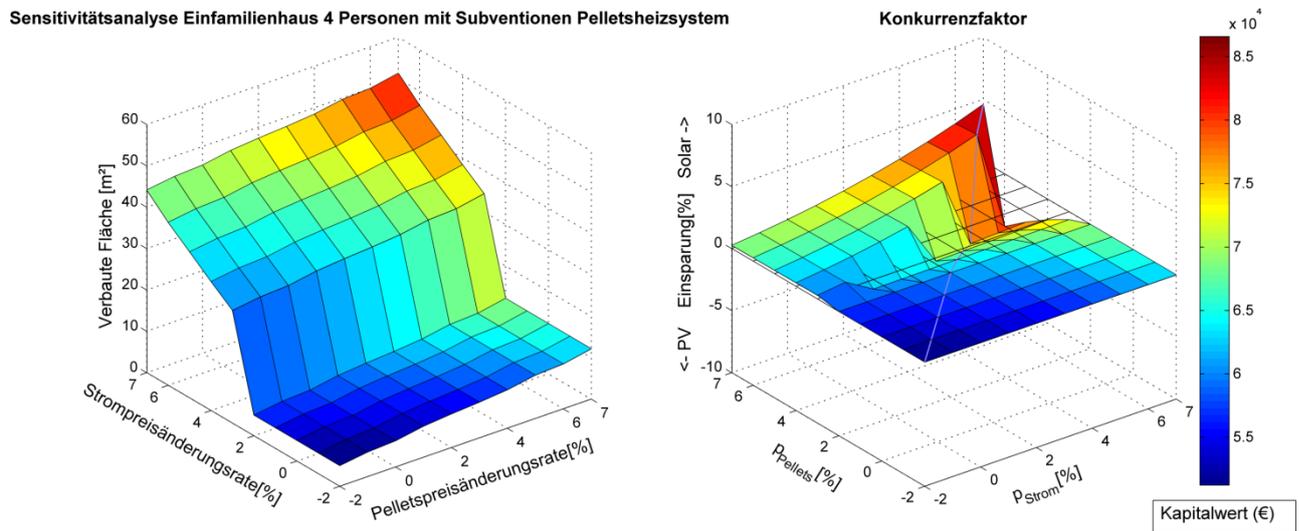


Abbildung 4.7 Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen inklusive Subventionen, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5.01c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

Vergleicht man nun den Punkt maximaler Steigung erhöht sich der Konkurrenzfaktor von 2.7% auf 4.5%. Allgemein werden durch Subventionen die Opportunitätsverluste bei der Beschränkung auf eine Technologie vergrößert. Diese Dynamik ist auch deutlich in Abbildung 4.8 zu beobachten. Im Gegensatz zum subventionsfreien Fall ist nun eine deutlichere Reduktion des Barwertes durch den Bau einer Photovoltaikanlage möglich. Die mögliche Einsparung bei Verwendung beider Technologien wird durch Subventionen von 701€ auf 3314 € erhöht.

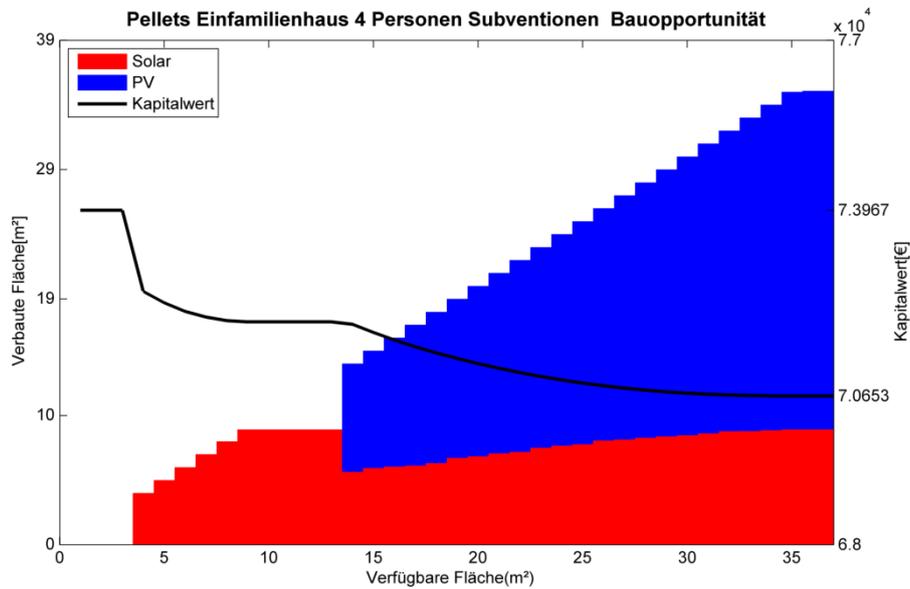


Abbildung 4.8 Bau Opportunität zwischen Photovoltaik und Solarthermieanlage für ein Einfamilienhaus mit 4 Personen mit Pelletofen inklusive Subventionen, 4% Strom und Pelletpreissteigerung, 3.5% Kalkulationszinssatz

Auch in der Darstellung zur Einsparung bezogen auf den Quadratmeter verbauter Fläche in Abbildung 4.9, fällt der markante Einfluss von Subventionen auf die Solarthermieanlage auf. Die Einsparung liegt dabei in jedem Punkt über dem Szenario in Abbildung 4.3. Auffällig ist, dass die Einsparung durch Photovoltaikanlagen zwar schon bei 3% Preissteigerung beginnt, jedoch auf den Quadratmeter bezogen diese Einsparung geringer steigt als im subventionsfreien Fall. Für 4% Preissteigerung ergibt sich ein Einsparungspotenzial von 219.9€ für eine Solarthermieanlage und 50.5€ für eine Photovoltaikanlage. Interessant ist des Weiteren, dass die solarthermische Anlage selbst bei einem Pelletpreisverfall Einsparungen bewirkt, was einen definitiven Kaufgrund für diese Technologie darstellt.

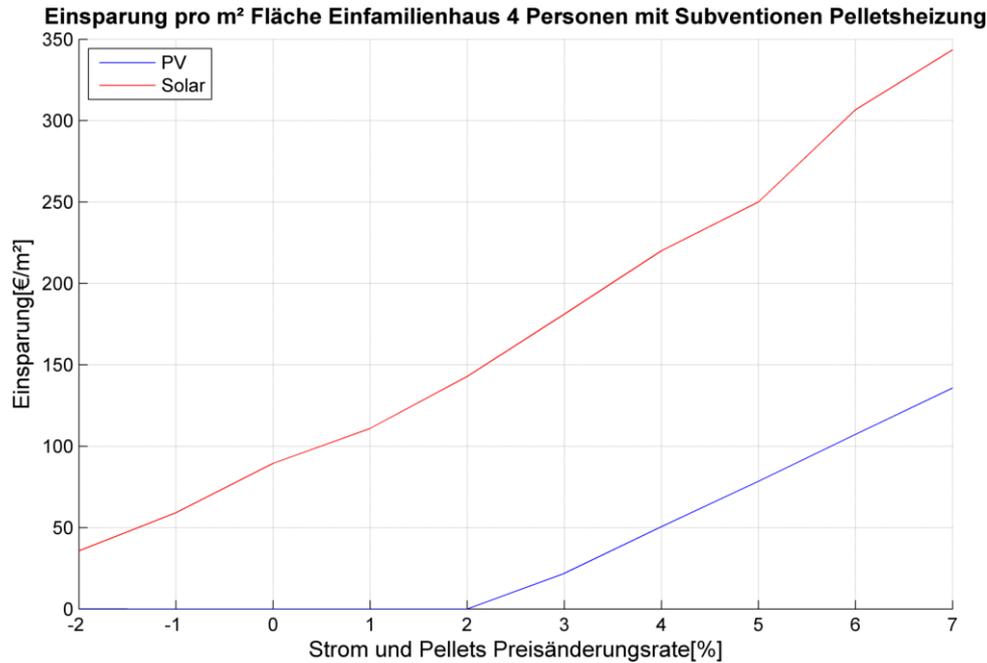


Abbildung 4.9 Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen inklusive Subventionen, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5.01c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

Sensitivitätsanalyse für einen 2 Personen Haushalt mit Förderungen

In Abbildung 4.10 sind die Ergebnisse der Simulation mit einer Einbindung von Subventionen in die Sensitivitätsanalyse abzulesen. Es zeigen sich wieder Parallelen zum Haushalt mit vier Personen. So ist schon bei einer Pelletpreisreduktion von -2% der Bau einer Solarthermieanlage mit 3.7m² rentabel. Bei 7% Steigung erreicht sie eine Größe von 9.5 m². Ab 4 % Strompreissteigerung wird eine Photovoltaikanlage mit 21.1 m²berechnet. Diese vergrößert sich auf 30.3 m² bei einer Preissteigerung von 7%. Auch die Konkurrenz ist damit weitaus ausgeprägter. So beträgt der maximale Konkurrenzfaktor bei 7% Steigung 4.1%. Auch ist der Verlauf bei synchroner Preissteigerung ident mit dem eines vier Personen Haushalt.

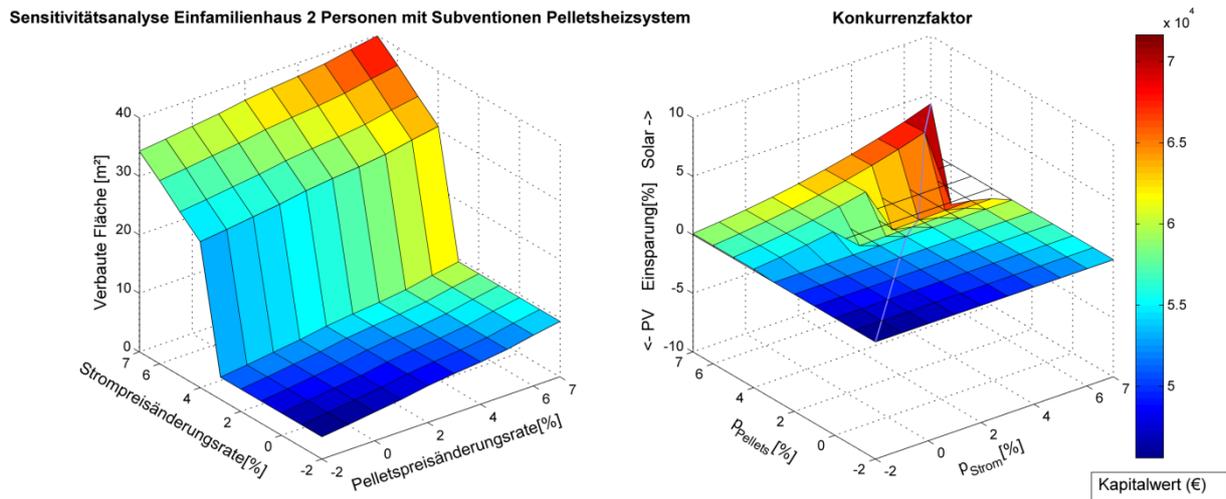


Abbildung 4.10 Sensitivitätsanalyse über Strom- und Pelletpreise, Einfamilienhaus 2 Personen mit Pelletofen inklusive Subventionen, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5.01c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

Bei der Bauopportunität für einen zwei Personen Haushalt inklusive der Förderung in Abbildung 4.11, ist in diesem Fall die Photovoltaikanlage rentabel. Diese wird ab einer verfügbaren Fläche von 15m² gebaut. Die Fläche der PV- Anlage beträgt dabei 10m² und wächst stetig auf das Optimum von 21.1m². Die Solarthermieanlage wird ab einer minimalen Fläche von 4m² rentabel, das Optimum liegt bei 7m².

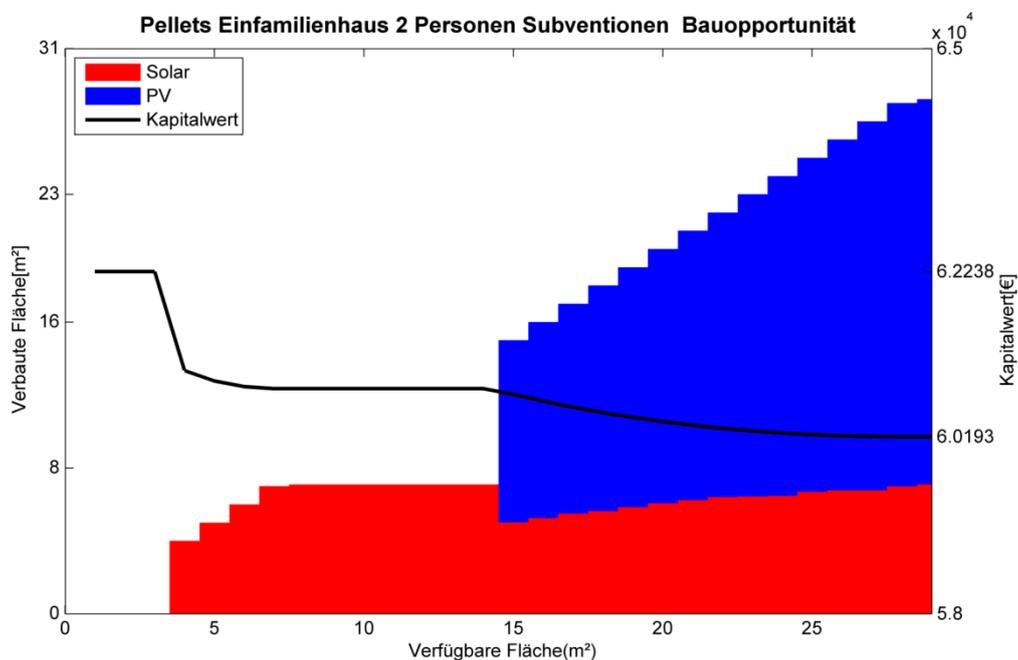


Abbildung 4.11 Bau Opportunität zwischen Photovoltaik und Solarthermieanlage für ein Einfamilienhaus 2 Personen mit Pelletofen inklusive Subventionen, 4% Strom und Pelletpreissteigerung, 3.5% Kalkulationszinssatz

Wird die Einsparung pro Quadratmeter in Abbildung 4.12 verglichen mit den Abbildungen 4.3 und 4.6 stellt man fest, dass Subventionen bei Einfamilienhäusern allgemein die Profitabilität pro Quadratmeter eingesetzter Fläche der jeweiligen Technologie erhöhen. Diese weist dabei einen abgeflachten Verlauf auf. Dies zeigt, dass Subventionen das Risiko bezüglich der Preisentwicklung für Einfamilienhäuser reduzieren können.

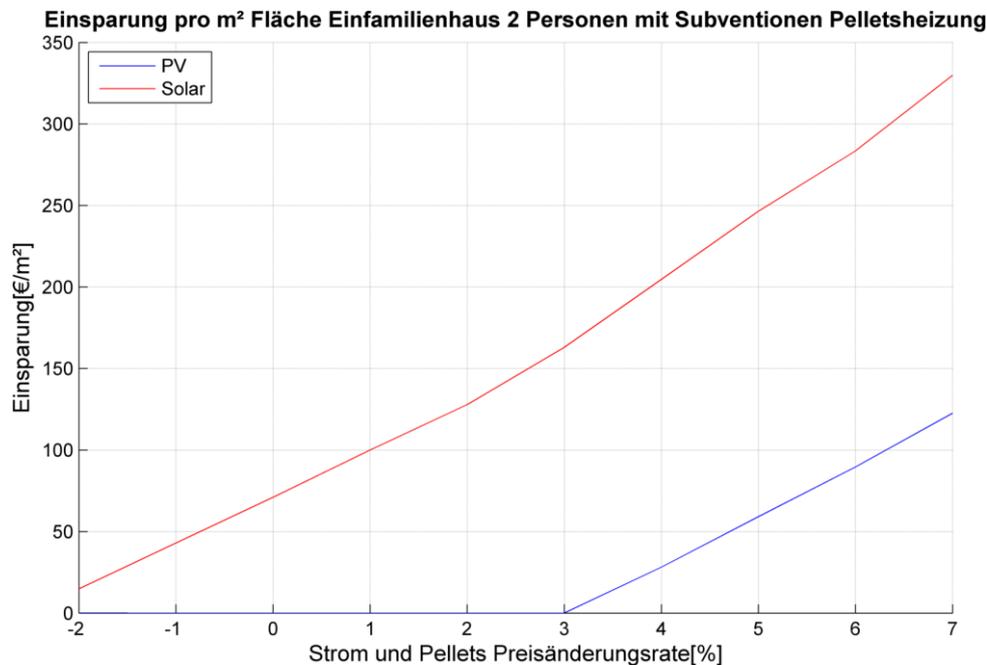


Abbildung 4.12 Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Einfamilienhaus 2 Personen mit Pelletofen inklusive Subventionen, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5.01c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

4.1.1.3 Einfluss von Zins- und Investitionskosten auf die Flächenallokation

Nun wird mit der gleichen Methode der Einfluss des Kalkulationszinssatzes und der Investitionskosten untersucht. Die Investitionskosten werden dabei gleichmäßig bei den eingesetzten Technologien variiert. Die Strom und Pelletpreissteigerungen betragen wieder jeweils 4%. Wie in Abbildung 4.13 links zu sehen ist, haben die Investitionskosten auf die verbaute Fläche nur einen minimalen Einfluss. Der Zinssatz ist dominant und eine Erhöhung über 4% führt zu einem Verzicht auf die Photovoltaiktechnologie. Ab einem Kalkulationszinssatz von 6 % wird der Bau jeglicher Technologien unrentabel. Durch eine Reduktion des Kalkulationszinses steigt hauptsächlich die Photovoltaikfläche und wie in Abbildung 4.13 rechts zu sehen, wird diese unter einem Zins von 4% ausschließlich als primäre Technologie gebaut. Wie an der Färbung zu sehen, wird durch einen hohen Kalkulationszinssatz der Kapitalwert sehr gering. Dies liegt an der Kapitalwertmethode,

welche Zahlungen in der Zukunft mit dem Zinssatz diskontiert. Der hohe Zinssatz bewirkt, dass die laufenden Kosten von Pellets und Strom reduziert werden, da diese nur mit dem fixen Satz von 4% steigen. Durch den hohen Zinssatz werden zukünftige Zahlungen schwächer gewichtet, womit die Kurzsichtigkeit steigt und auf Investitionen verzichtet wird.

Sensitivitätsanalyse Einfamilienhaus 4 Personen Zins und Investitionskosten Pelletsheizsystem

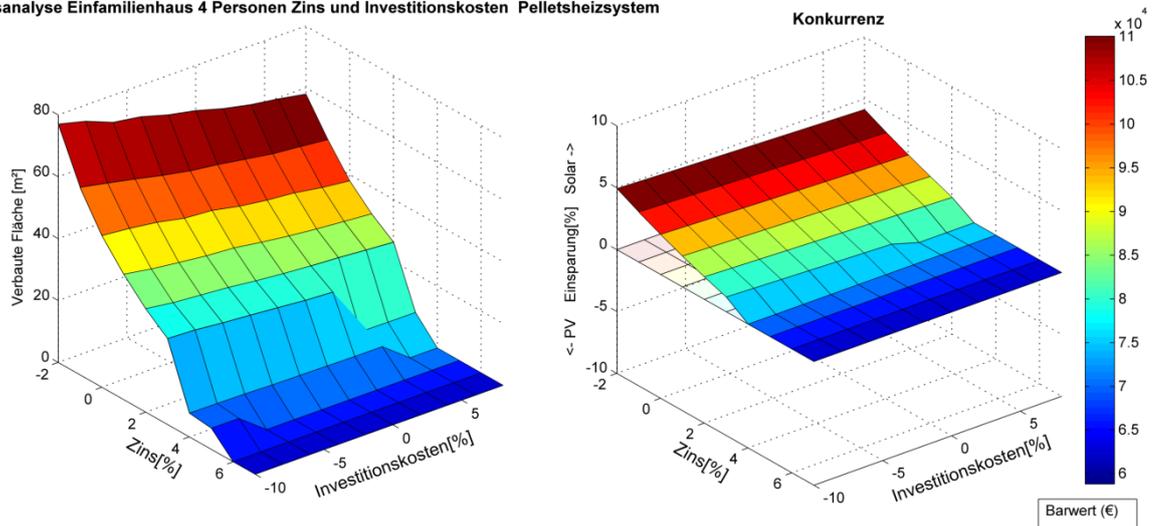


Abbildung 4.13 Sensitivitätsanalyse von Zins und Investitionskosten für ein Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen , 4% Strom und Pelletpreissteigerung

4.1.1.4 Einfluss der Bausubstanz auf die Flächenallokation

In einem weiteren Schritt wurde die Sensitivität bezüglich der Bausubstanz untersucht. Es wird wieder von Szenario einer Pellet- und Strompreissteigerung von 4% ausgegangen. Dazu wurden die Parameter für den Wärmebedarf neu angepasst, um eine schlechtere Isolation zu simulieren. Wie in Abbildung 4.14 zu sehen ist, führt eine bessere Isolation zu einem höheren Eigenverbrauch und einem graduell geringeren Kapitalwert. Auch ist bemerkenswert, dass die Fläche der Solarkollektoren für die bessere Isolation anwächst und für eine schlechtere Isolation anfänglich sinkt. Dies kann durch das Modell für die Berechnung des Wärmebedarfs in Kapitel 3.3.3 erklärt werden. Das Modell welches auf einer Sigmoid Kurve basiert gewichtet den Wärmebedarf nach der Tagesmitteltemperatur. Für eine gute Isolation fällt nun ein proportional höherer Anteil des Gesamtverbrauchs im Sommer an, wo der Bedarf durch eine Solarthermieanlage gedeckt werden kann. Umgekehrt verhält es sich mit einem Haus mit schlechter Isolation. Die erhöhte Heizlast fällt dabei hauptsächlich in einstrahlungsschwache Zeiten, womit die Solarthermieanlage unrentabler wird. Die Steigung des Barwerts ist sehr gering und beträgt bei 30% mehr Wärmebedarf nur 7.2% des Ursprungswertes.

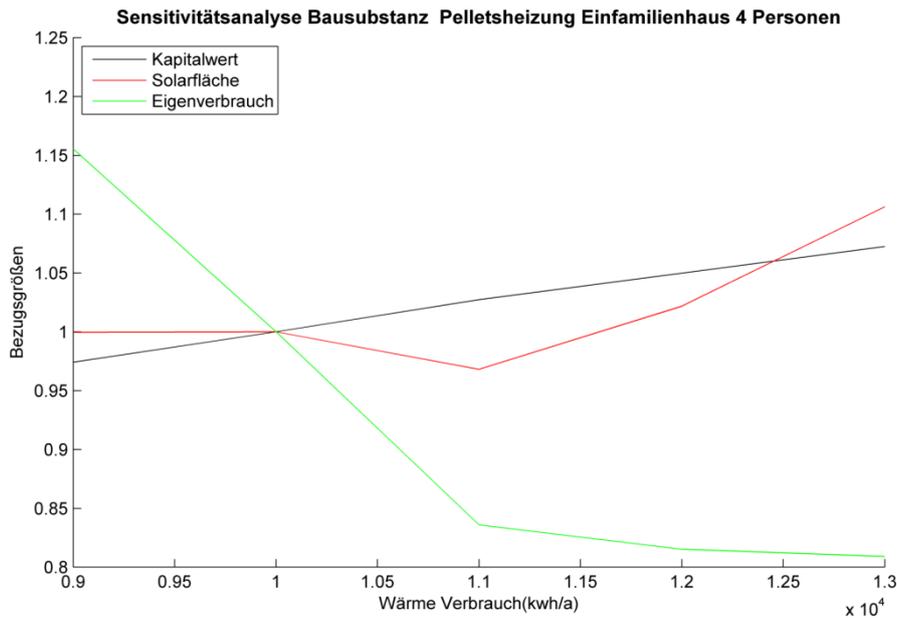


Abbildung 4.14 Sensitivitätsanalyse der Bausubstanz eines Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen, Der Wärmeverbrauch bei 1 liegt bei 10MWh, der Barwert für den Bezugswert 1 beträgt 74941€ , die Solarfläche 7.763 und der Eigenverbrauch 20%

4.1.1.5 Einfluss alternativer Modell Annahmen auf die Flächenallokation

In einem weiteren Schritt wird der Einfluss verschiedener Modellannahmen untersucht. Es wird analysiert, inwieweit der Einsatz von synthetischen Stromlastprofilen Einfluss auf das Resultat hat. Dazu wird der vier Personen Haushalt nun mit dem H0 Standardlast Profil, welches in Abbildung 3.8 dargestellt ist, simuliert. Dieses verfügt über die selbe bezogene Strommenge pro Jahr, ist jedoch weitaus homogener verteilt.

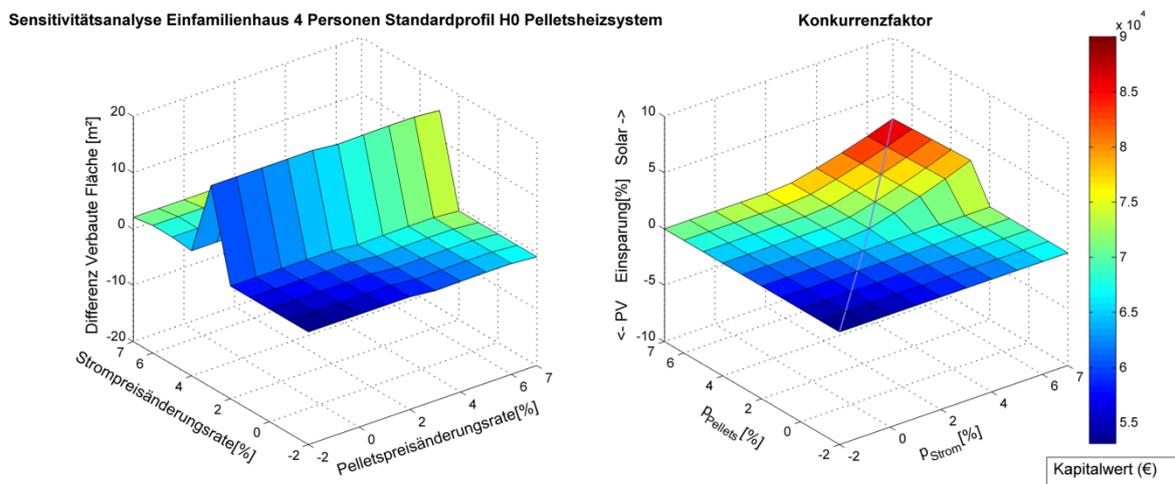


Abbildung 4.15 Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen für H0 Strom Lastprofil, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5.01c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

Wie in Abbildung 4.15 links ersichtlich, hat das neue Stromprofil erwartungsgemäß keinen Einfluss auf die Solarthermieanlage. Jedoch wird im Vergleich zum synthetischen Lastprofil in Abbildung 4.1 nun schon ab einer Strompreissteigerung von 3% eine Photovoltaik-Anlage gebaut. Zur deutlicheren Darstellung wurde dazu links die Differenz zum Synthetischen Profil dargestellt. Die, durch die Simulation berechnete Photovoltaikfläche beträgt 15.8m^2 bei 3% Preissteigerung und erreicht 29.4m^2 für eine 7% Steigerung. Im Vergleich dazu betrug dieser Wert 16.4m^2 bei 4% Strompreissteigerung und 27.3m^2 bei 7%. Der Maximalwert weist damit also nur einen geringen Unterschied auf, jedoch verschob sich die Schwelle ab welcher Photovoltaik rentabel ist. Die Konkurrenz in Abbildung 4.15 rechts zeigt, dass nun für eine Photovoltaikanlage als primäre Technologie ab einer Strompreissteigerung über 3% immer der bessere Kapitalwert erzielt werden kann. Wird nun die Einsparung pro Quadratmeter in Abbildung 4.16 dargestellt, ist der Unterschied zu Abbildung 4.3 deutlich erkennbar. So weisen die Einsparungen durch Solar- und Photovoltaikanlagen auf die benötigte Fläche bezogen bei 3% nur eine Differenz von 0.5€ auf. Ab diesem Punkt liegt das solare Einsparungspotenzial zwar höher. Im Vergleich zum synthetischen Profil verbessert sich die Profitabilität jedoch deutlich. Bei der Annahme des Standardlastprofil verbessert sich der Kapitalwert von 74932€ auf 73982€.

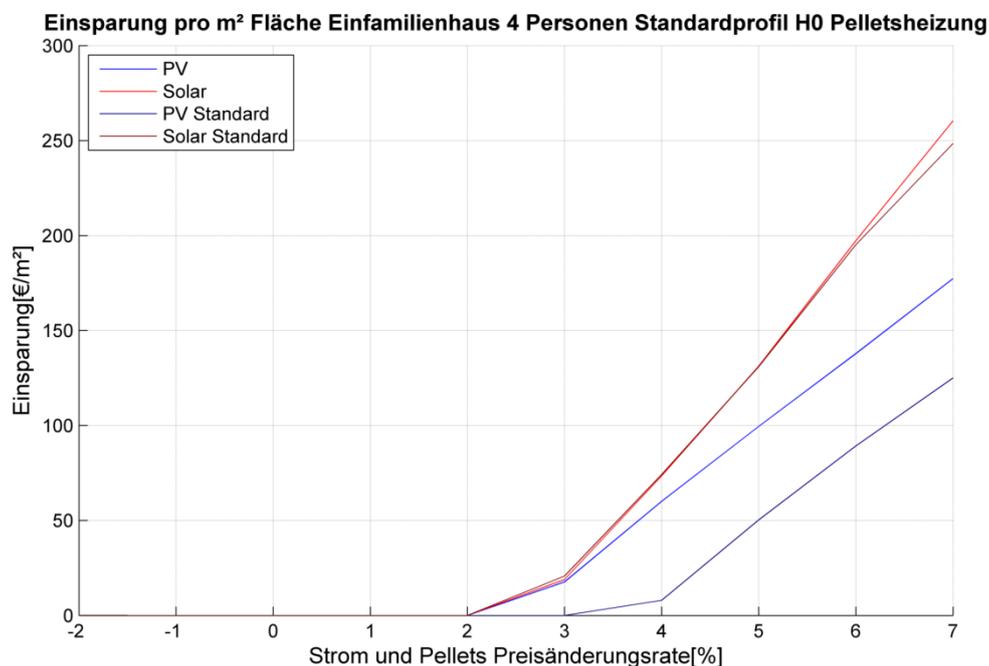


Abbildung 4.16 Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen für H0 Strom Lastprofil, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5.01c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass durch die Verwendung eines Standardlastprofils die Profitabilität von PV-Anlagen steigt. Dies ist in der Tatsache begründet, dass Standardlastprofile dem Mittel vieler Haushalte entsprechen. Die synthetischen Profile sind jedoch stochastisch aufgebaut. Die Folge dieser Unterschiede ist, dass im Standardfall PV-Erzeugung und Strombedarf öfter kongruent sind. Das H0-Profil hat auf den Kapitalwert und maximalen PV-Wert nur einen geringen Einfluss. Somit stellt die Wahl von synthetischen Profilen eine plausible Verfeinerung gegenüber anderen Modellen dar.

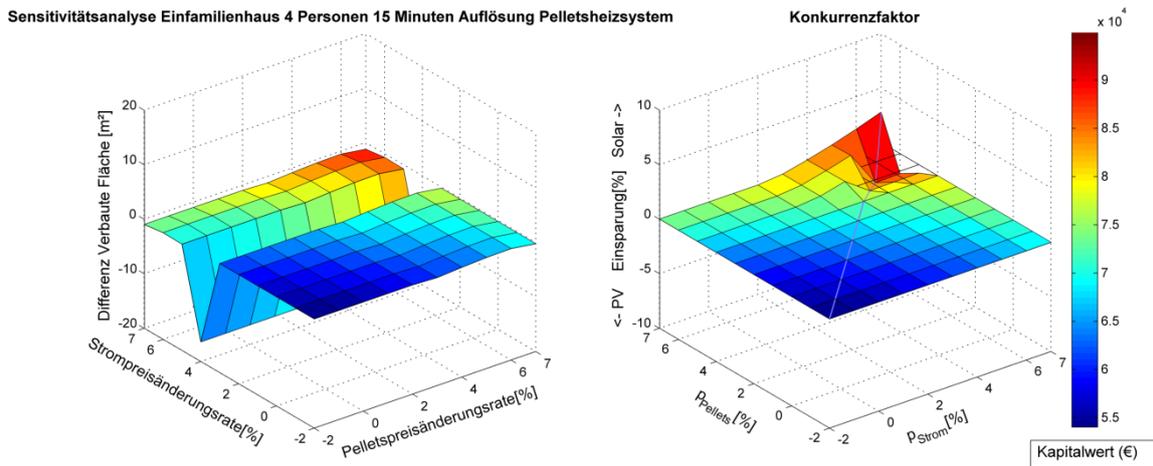


Abbildung 4.17 Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen für 15 Minuten Auflösung, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5.01c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

In einem weiteren Schritt wurde der Unterschied der stündlichen zu einer 15-minütigen Auflösung untersucht. Eine effektive Auflösungssteigerung ist dabei nur bei dem synthetischen Stromprofil möglich. Sowohl bei der Wärmenachfrage, als auch bei den Erträgen aus Solar und Photovoltaik-Anlagen, werden die stündlichen Werte als konstant über die vier 15-Minuten-Schritte angenommen. Dies ist jedoch nicht problematisch, da durch den Speicher der Wärmebedarf sowieso nicht gleichzeitig mit der Wärmeerzeugung erfolgen muss. In Abbildung 4.17 ist zu sehen, dass der Einfluss synthetischer Profile verstärkt wird, da elektrische Last und Erzeugung weniger synchron verlaufen. Nun wird eine Photovoltaik-Anlage erst ab 5%, mit einer Fläche von 18.8m² rentabel. Bei 7% Preissteigerung beträgt die Fläche nun 26.38 m². Die verbesserte Auflösung erhöht die Solarfläche im Vergleich zum Ursprungsmodell. Die benötigte Fläche beträgt bei 3% Steigerung nun 7.2m² und bei 7% 10.24m². Die Abbildung 4.18 zeigt deutlich, wie die Profitabilität einer PV-Fläche durch die höhere Auflösung geringer wird. Allgemein kann gesagt werden, dass die Modellannahmen ein glaubwürdiges Bild ergeben. Auf die maximalen Baugrößen für Solarthermie, PV und den Kapitalwert haben alternative Modelle nur einen geringen Einfluss. Einzig die Schwelle für

den Bau der Photovoltaikanlage verschiebt sich, was die Konkurrenzsituation für ein gewisses Preisszenario verändern kann. Negativ ist außerdem, dass für eine Auflösungserhöhung auf 15 Minuten eine Vervielfachung der Rechenzeit in Kauf genommen werden müsste.

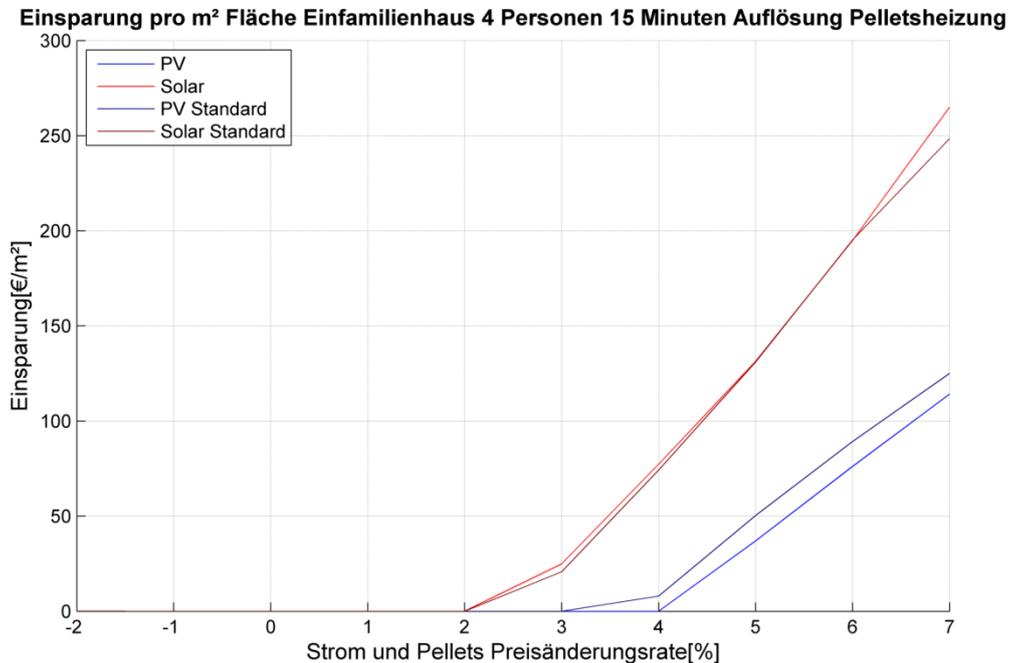


Abbildung 4.18 Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen für 15 Minuten Auflösung, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5.01c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

4.1.2 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für ein Mehrfamilienhaus

In einem weiteren Verbrauchsszenario wird die Situation bei einem größeren Verbraucher untersucht. In diesem Fall wird ein Mehrfamilienhaus mit einem Wärmeverbrauch von 50 MWh und einem Stromverbrauch von 24,4 MWh betrachtet. Die sonstigen Modellannahmen sind ident mit der Simulation für ein Einfamilienhaus. Das Stromprofil ist zusammengesetzt aus 10 Einzelprofilen welche synthetisch erstellt worden sind. Das Wärmeprofil wurde nach dem BWG Standard erstellt, dessen Parameter für ein Mehrfamilienhaus im Anhang ersichtlich sind.

	Stromverbrauch[MWh]	Wärme[MWh]	W-Profil	E-Profil
Mehrfamilienhaus	24,5	50	Mfh0	Syn

Tabelle 4.2 Beschreibung der Kennwerte für ein Mehrfamilienhaus

Wird nun wieder die Sensitivität gegenüber Strom und Pelletpreissteigerungen in Abbildung 4.19 analysiert fällt auf, dass durch den gestiegenen Strombedarf die PV- Anlage schon bei gleichbleibenden Strompreisen rentabel ist. Die Photovoltaikfläche beträgt in diesem Fall 48m² und wächst exponentiell ($R^2=0,998$), bei steigenden Strompreis, auf 126 m² an. Trotz des gleichen Verbraucherpreises, stellt sich hier die Grid Parity schon viel früher ein, da die erzeugte Leistung über einen besseren Eigenverbrauchsanteil verfügt und nur ein geringerer Anteil durch den niedrigen Rückflusstarif vergütet wird. Auch der Bau einer Solarthermieanlage ist schon bei einer jährlichen Preisreduktion von -2% rentabel. Die berechnete Solarkollektorfläche beträgt in diesem Szenario 17m², welche für 7% Preissteigerung auf 46m² linear anwächst.

Der Konkurrenzfaktor macht deutlich, dass für ein Mehrfamilienhaus Photovoltaikanlagen gegenüber dem Einfamilienhaus sehr viel konkurrenzfähiger sind. So ergibt bei synchronen Steigen der Pellet- und Strompreise eine PV- Anlage als Primäre Technologie immer den besseren Kapitalwert. Allgemein ist die Konkurrenzsituation sehr viel ausgeprägter zwischen den beiden Technologien, was besonders durch den starken Sprung in Abbildung 4.19 links dargestellt ist. Für die Annahme einer jeweils 4% Preissteigerung, ergibt sich eine mögliche Verbesserung um 2.9% des Kapitalwertes, durch den Bau einer Solarthermieanlage zu einer bestehenden Photovoltaikanlage.

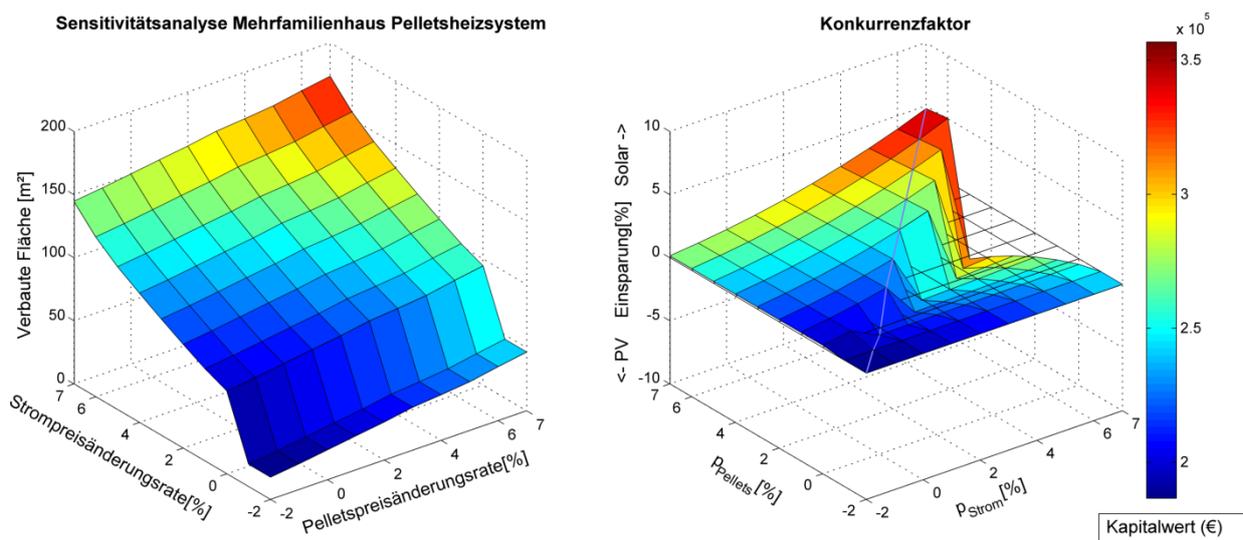


Abbildung 4.19 Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Mehrfamilienhaus mit Pelletofen, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

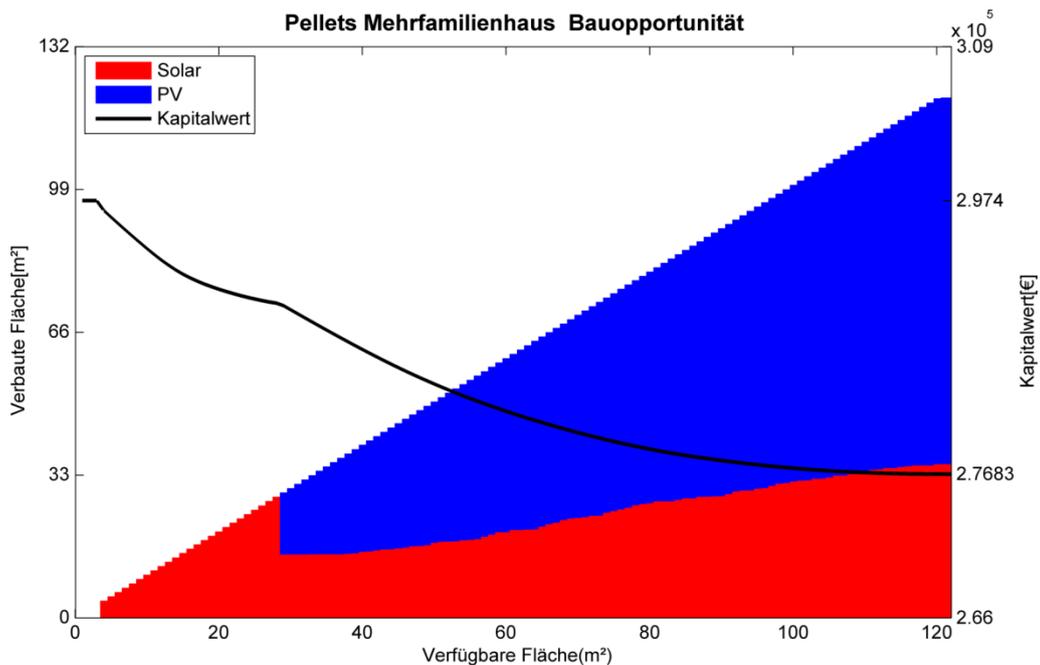


Abbildung 4.20 Bau Opportunität zwischen Photovoltaik und Solarthermieanlage für ein Mehrfamilienhaus mit Pelletofen, 4% Strom und Pelletpreissteigerung, 3.5% Kalkulationszinssatz

Das Szenario einer 4 % Preissteigerung wird in Abbildung 4.20 noch detaillierter dargestellt. Wie zu sehen ist, wird bis zu 29 m² verfügbarer Dachfläche Solarthermie gebaut. Zwar ist dies nicht die maximale Solarfläche von 54 m², jedoch teilt sich ab diesem Punkt die Fläche in 14.6² Solarthermie und 13.3 m² Photovoltaikfläche auf. Das Optimum der PV- Fläche beträgt in diesem Fall 84.6 m². Dies ist ein weiteres Indiz für die höhere Profitabilität einer Photovoltaikanlage. Wie in den Abbildungen 4.2,8,11 zu sehen, entspricht bei einem Einfamilienhaus das erste Maximum der Solarfläche auch einem globalen Maximum.

In Abbildung 4.21 ist die Einsparung pro Quadratmeter dargestellt und zeigt deutlich die hohe Profitabilität beider Technologien in Mehrfamilienhäusern. In keinem berechneten Profil kann mit einer Photovoltaikanlage so hohe Einsparungen erzielt werden. Diese betragen 25€/m² für gleichbleibende Preise und steigen auf 243€ für 7% Strompreissteigerung. Auch die Einsparungen durch den Bau einer Solarthermieanlage sind für eine positive Strompreissteigerungsrate sogar höher als für ein gefördertes Einfamilienhaus mit vier Personen.

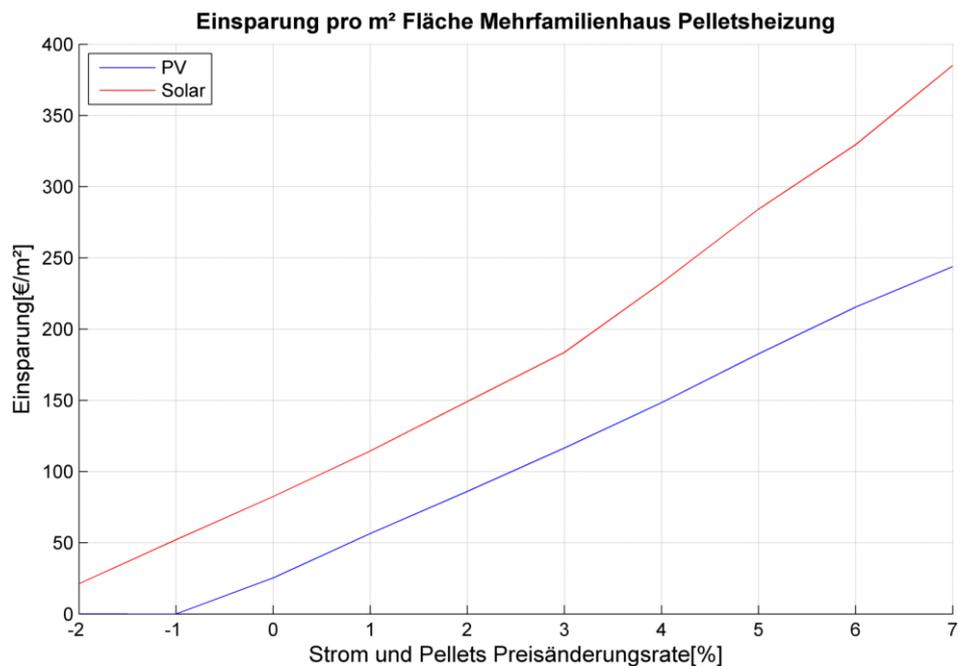


Abbildung 4.21 Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Mehrfamilienhaus, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh und ein Pelletpreis von 5c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

4.1.3 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für ein Lebensmittelgeschäft

Der Gewerbetyp „Handel“ entspricht einem Lebensmittelgeschäft ohne Backabteilung. Der Wärmebedarf beschränkt sich hierbei auf den Heizbedarf. Typischerweise verfügen Lebensmittelgeschäfte über einen hohen Kühlbedarf und damit einen hohen elektrischen Verbrauch.²⁴ Die Stromprofile entsprechen Standardprofilen für den Lebensmittelhandel, weswegen keine zusätzliche Kühlung simuliert wird. Auch die Wärmenachfrage wird durch das Standardlastprofil modelliert. Die Parameter dafür werden im Anhang wiedergegeben.

	Fläche[m ²]	Stromverbrauch[MWh]	Wärme[MWh]	W-Profil	E-Profil
Handel	514,4	100	79,474	GHA03	G4

Tabelle 4.3 Beschreibung der Kennwerte für einen Lebensmittelhandel

In Abbildung 4.22 links ist deutlich zu sehen, dass die Solarthermieanlagen, im Vergleich zu der optimalen Photovoltaik-Anlage, nur einen geringen Platzbedarf aufweisen. So wird die Solarthermieanlage mit 17m² dimensioniert, wenn der Pelletpreis um 2% jährlich wächst und erreicht 38m² bei 7% Preissteigerung. Eine optimal ausgelegte Photovoltaikanlage erreicht bei 2% Strompreissteigerung schon 173m² und wächst auf 372m² bei 7% an. In Abbildung 4.22

²⁴ Kennzahlen zum Energieverbrauch (Abgerufen 22.2.2015) URL in Dienstleistungsgebäuden http://www.oegut.at/downloads/pdf/e_kennzahlen-ev-dlg_zb.pdf

fällt auf, dass nur eine geringe Konkurrenz vorliegt. So ist eine Photovoltaikanlage auch bei einer sehr unsymmetrischen Preisentwicklung, im Sinne einer höheren Pelletpreissteigerung, als primäre Technologie profitabel. Auch beträgt die maximale Einsparung durch den Bau einer Solarthermieanlage zu einer bestehenden PV- Anlage nur 1.09% bei 7 % Preissteigerung.

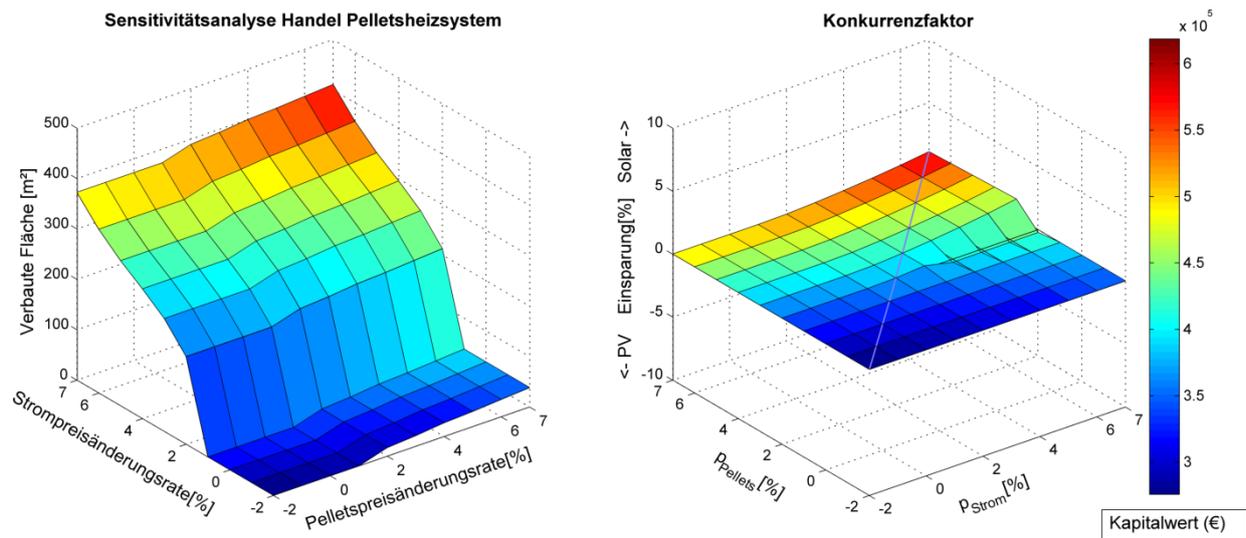


Abbildung 4.22 Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Handel mit Pelletofen, für 0% gilt ein Strompreis von 15c/kWh und ein Pelletpreis von 4.5c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 5%

Dieser Trend wird auch in der Einsparung pro Quadratmeter in Abbildung 4.23 deutlich. Die Einsparung beider Technologien ist deutlich niedriger als beim Mehrfamilienhaus, was durch die geringeren Energiepreise zu erklären ist. Auffällig ist, dass die Photovoltaikanlage nur geringfügig weniger Einsparung pro m² ermöglicht, aber über eine weitaus höhere optimale Fläche verfügt. So ist bei einem Lebensmittelhandel der Bau einer Photovoltaikanlage als primäre Technologie vorzuziehen.

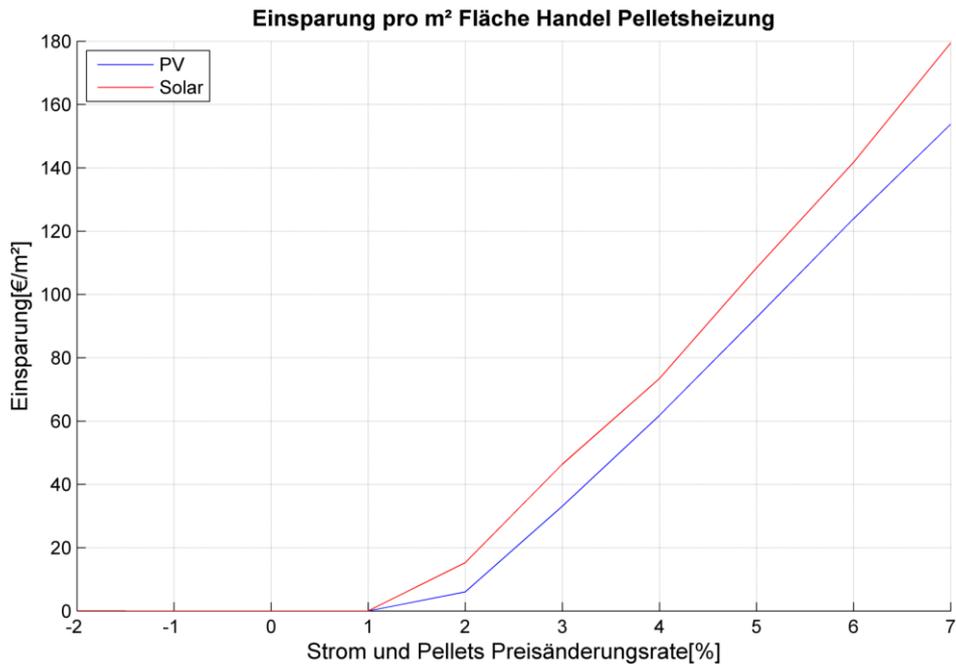


Abbildung 4.23 Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Handel mit Pelletofen, für 0% gilt ein Strompreis von 15c/kWh und ein Pelletpreis von 4.5c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 5%

4.1.4 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für eine Bäckerei

Das charakteristische Verbrauchsprofil einer Bäckerei zeichnet sich durch einen hohen Verbrauch in einstrahlungsarmen Zeiten aus. Das gewählte Stromverbrauchsprofil beschreibt das Gewerbe als Bäckerei mit Backstube. Im Unterschied zum Lebensmittelhandel ist bei einer Bäckerei ein großer Teil des Wärmeverbrauches durch den Produktionsprozess bedingt.²⁵ Dabei wird hier nur der Anteil an niedrig Temperatur Wärme betrachtet.

	Fläche[m ²]	Stromverbrauch[MWh]	Wärme[MWh]	W-Profil	E-Profil
Bäckerei	200	100	185,7	GBA03	G5

Tabelle 4.4 Kennwerte einer Bäckerei

²⁵ Klima: Aktiv Fond (Abgerufen 22.2.2015) URL: www.wko.at/Content.Node/Service/Umwelt-und-Energie/Energie-und-Klima/Energieeffizienz/ee_baecker.pdf

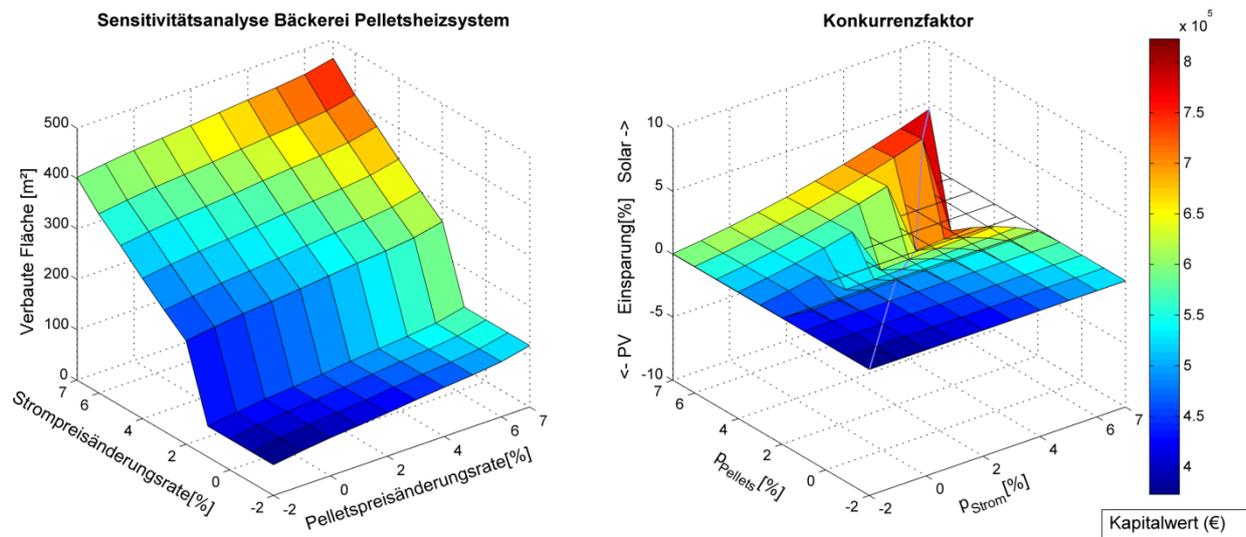


Abbildung 4.24 Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Bäckerei mit Pelletofen, für 0% gilt ein Strompreis von 15c/kWh und ein Pelletpreis von 4.5c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 5%

Wie in Abbildung 4.24 zu sehen ist, reduziert sich die maximale PV-Fläche bei gleichem Strombedarf im Vergleich zum Handel von 372 m² zu 341 m². Ab einer jährlichen Strompreissteigerung von 2% wird eine Anlage mit der Größe von 144m² gebaut. Der Wärmebedarf einer Bäckerei liegt jedoch weit über dem eines Handelsgewerbes. Dieser Bedarf kann durch den Speicher auch unabhängig von der Tageszeit genutzt werden. Damit wird selbst bei einer jährlichen Strompreisreduktion von -2%, eine solarthermische Anlage mit einer Fläche von 60.9m² rentabel. Diese Fläche steigt stetig und beträgt 121 m² bei 7 % Pelletpreissteigerung. Das Konkurrenzverhältnis zwischen Photovoltaik und Solarthermie liegt überwiegend zugunsten von Solarthermie. Bei symmetrisch steigenden Preisen von 2% bis 5% ergibt eine Solarthermieanlage als primäre Technologie einen niedrigeren Kapitalwert. Erst darüber führen Photovoltaikanlagen zu einem niedrigeren Kapitalwert. Auch ist die Konkurrenz sehr ausgeprägt. So kann durch den Bau einer Solarthermieanlage bei 7% Preissteigerung, der Kapitalwert um 4.44% reduziert werden.

In Abbildung 4.25 ist das höhere Einsparungspotential einer Solarthermieanlage gegenüber dem Lebensmittelhandel deutlich abzulesen. Bei einer 2% Preisreduktion beträgt dieses 2€/m² und wächst auf 315€/m² an bei 7% Preissteigerung. Die Photovoltaikanlage ist bei einer Bäckerei ab dem selben Schwellenwert von 2% rentabel. Das Einsparungspotential liegt für diese Technologie, in allen Punkten, unter dem eines Lebensmittelladens.

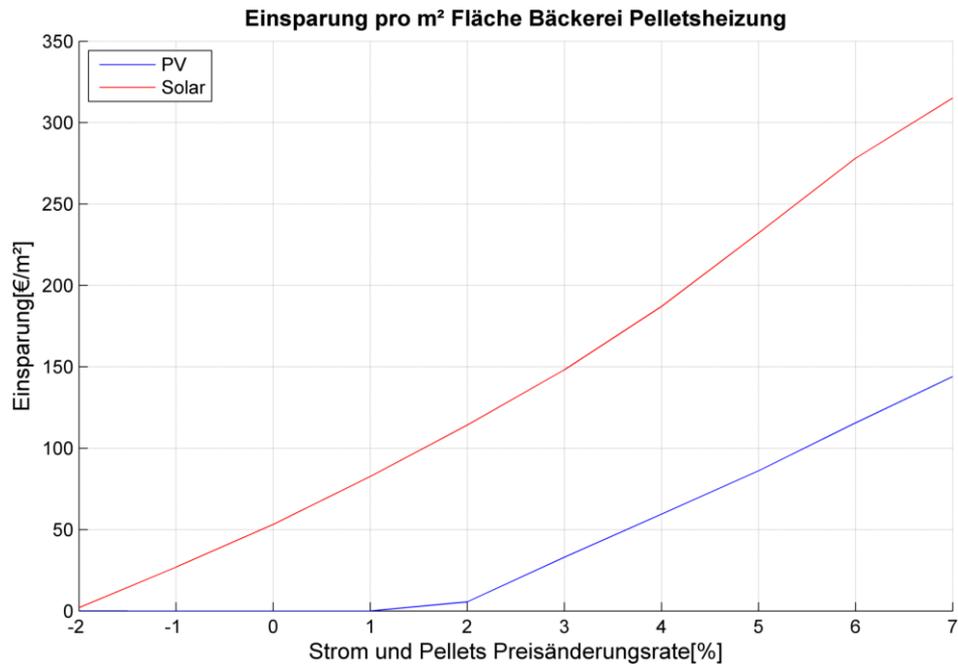


Abbildung 4.25 Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Bäckerei mit Pelletofen, für 0% gilt ein Strompreis von 15c/kWh und ein Pelletpreis von 4.5c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 5%

4.1.5 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für eine Schule

Im letzten Szenario wurde eine Schule, welche über das gesamte Jahr geöffnet hat, untersucht. Die Schule selbst, zeichnet sich durch einen geringen Stromverbrauch in Relation zum Gesamtenergiebezug aus. Hierbei ist zu beachten, dass in dieser Schule nur sehr begrenzt technische Hilfsmittel eingesetzt werden. Typischerweise handelt es sich dabei um den Sekundärbereich oder Volksschulen. Berufsschulen und HTLs weisen einen sehr viel höheren Stromverbrauch auf.²⁶

	Fläche[m ²]	Stromverbrauch[MWh]	Wärme[MWh]	W-Profil	E-Profil
Schule	8000	100	1232	GKO03	G1

Tabelle 4.5 Kennwerte einer Schule

²⁶ Oberösterreichischer Energiesparverband (Abgerufen 22.2.2015) URL http://www.pv-schule.at/fileadmin/redakteure/ESV/Info_und_Service/Publikationen/Strom_sparen_Schule_fin.pdf

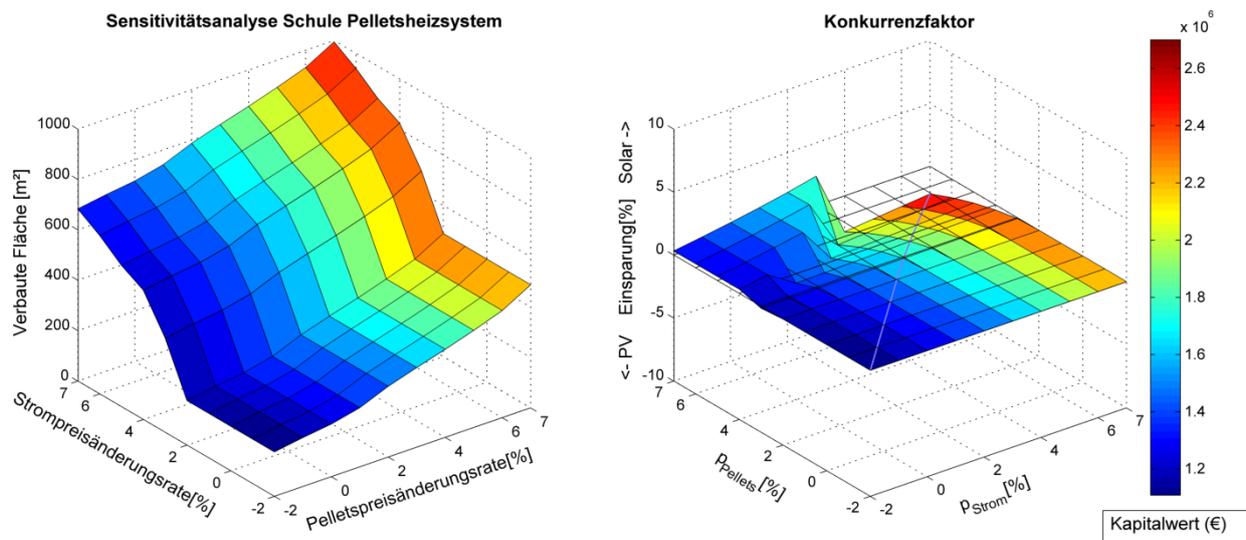


Abbildung 4.26 Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Schule mit Pelletofen, für 0% gilt ein Strompreis von 15c/kWh und ein Pelletpreis von 4.5c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 5%

Wie in Abbildung 4.26 zu sehen, ist die Fläche der solarthermischen Anlage und der PV-Anlage bei maximaler Preissteigerung fast gleich groß. Ab einer Strompreissteigerung von 3% ist eine PV-Anlage mit 197m² rentabel und erreicht eine Größe von 505m² bei 7% Strompreissteigerung. Auffällig ist, dass im Unterschied zum Handel das Wachstum der PV-Flächen bei hoher Preissteigerung abfällt. Die Konkurrenz ist nur sehr gering und in fast jedem Szenario, ist der Bau von nur der Solar Technologie zu präferieren. Der Konkurrenzfaktor zeigt an, dass durch den Bau einer PV-Anlage neben der solarthermischen Anlage im Punkt 4% Steigerung die Reduktion des Barwertes nur 1.2 % ausmacht. Der Platzbedarf der solarthermischen Anlage beträgt auch bei einer Pelletpreisreduktion von -2% jährlich 176m² und wächst auf 487 m² für 7% Preissteigerung an. Die Färbung lässt erkennen, dass der Barwert hauptsächlich vom Pelletpreis abhängig ist.

In Abbildung 4.27 ist nun die Einsparung pro Quadratmeter abzulesen. Hier zeigt die solarthermische Anlage über alle gewählten Pelletpreis Szenarios einen hohen positiven Wert. Selbst bei -2% Preisreduktion ist eine Einsparung von 23€/m² möglich. Die mögliche Einsparung durch eine Photovoltaikanlage fällt geringer aus als beim Lebensmittelhandel und tritt erst ab 3% Strompreissteigerung ein. Die berechneten Photovoltaik Flächen sind für hohe Preissteigerungsraten aber höher, als bei den Gewerbe Szenarios.

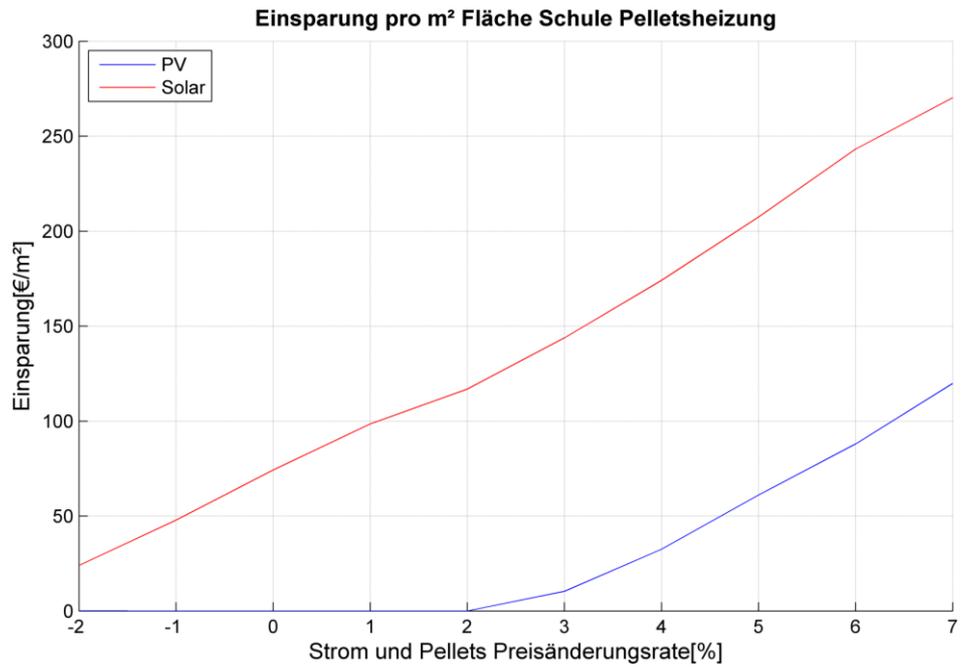


Abbildung 4.27 Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Schule mit Pelletofen, für 0% gilt ein Strompreis von 15c/kWh und ein Pelletpreis von 4.5c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 5%

4.2 Optimale Flächenallokation bei einem Wärmepumpenheizsystem

4.2.1 Einfamilienhaus

Das Einfamilienhaus verfügt über dieselben Parameter wie für das Pelletheizsystem in Kapitel 4.1.1 .

4.2.1.1 Einfluss der Anzahl an Haushaltsangehörigen auf die Flächenallokation

4 Personen Haushalt

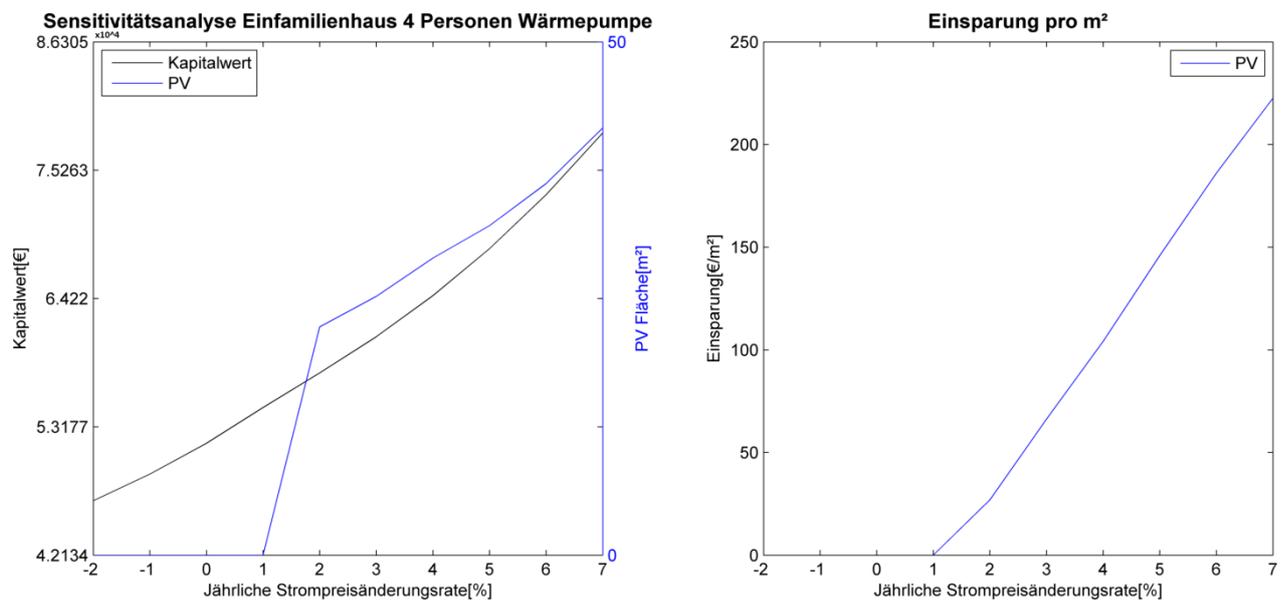


Abbildung 4.28 Sensitivitätsanalyse über Strom, Einfamilienhaus 4 Personen mit Wärmepumpe, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3,5%

Für ein Wärmepumpen-Heizsystem ist von den variablen Energiekosten nur mehr die Strompreisänderung zu analysieren. Wie in Abbildung 4.28 zu sehen ist, steigt der Kapitalwert kontinuierlich mit dem Strompreis, jedoch wird die Steigung durch den Bau von Photovoltaik- Anlagen reduziert. Ab 2% jährlicher Strompreissteigerung wird 22 m² PV gebaut. Dieser Wert wächst nun stetig mit dem steigenden Strompreis auf 41m² für eine 7% Strompreissteigerung. Die Einsparung pro verbauter Fläche von Photovoltaik Modulen beträgt 26€ für eine 1 prozentige Preissteigerung und wächst mit konstanter Steigung auf 222€ für 7% Strompreissteigerung.

Für eine Strompreissteigerung von 4 % wird wieder eine detaillierte Untersuchung für ein begrenztes Platzangebot gemacht. Wie in Abbildung 4.29 zu sehen ist, wird ab 7 m² eine Photovoltaikanlage profitabel. Eine solarthermische Anlage ist in diesem Szenario nicht rentabel.

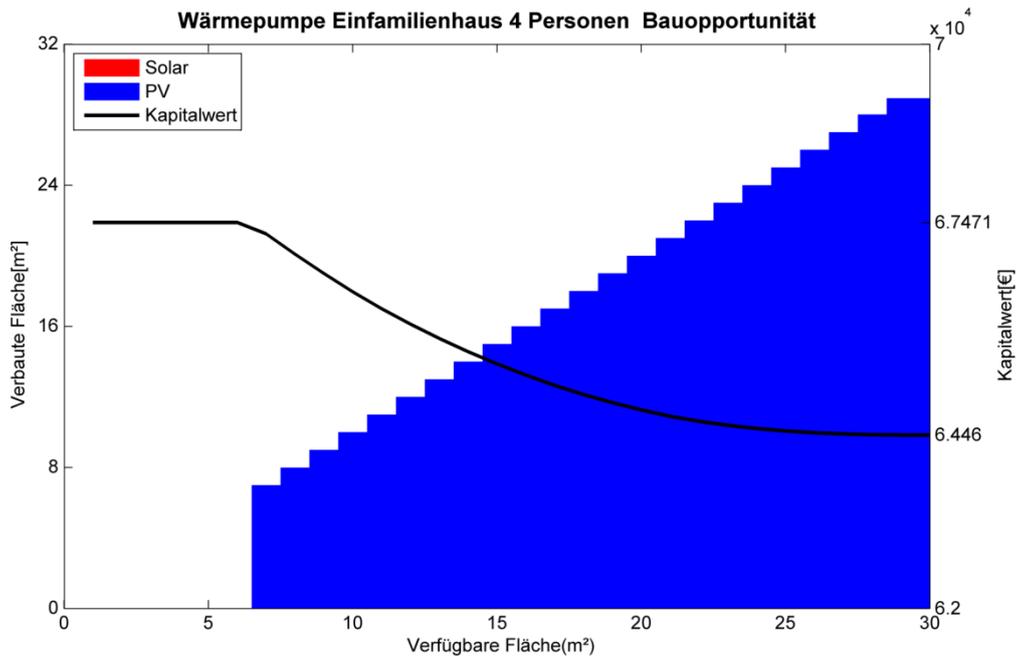


Abbildung 4.29 Bauopportunität zwischen Photovoltaik- und Solarthermieanlage für ein 4 Personen Einfamilienhaus mit Wärmepumpe, 4% Strom und Pelletpreissteigerung, 3,5% Kalkulationszinssatz

2 Personen Haushalt

Für das zwei Personenprofil eines Einfamilienhauses ähnelt der Verlauf dem, des vier Personen Haushaltes. In Abbildung 4.29 ist zu sehen, dass ab einer Strompreissteigerung von 2% eine Photovoltaikanlage gebaut wird. Einzig die Dimension des Barwertes ist reduziert und die Fläche der PV-Anlage wird an den geringeren Verbrauch angepasst. Allgemein ist auffällig, dass im Unterschied zum Pelletheizsystem die Differenz zwischen einem vier und einem zwei Personen Haushalt weitaus geringer ausfällt.

4. Ergebnisse 4.2 Optimale Flächenallokation bei einem Wärmepumpenheizsystem

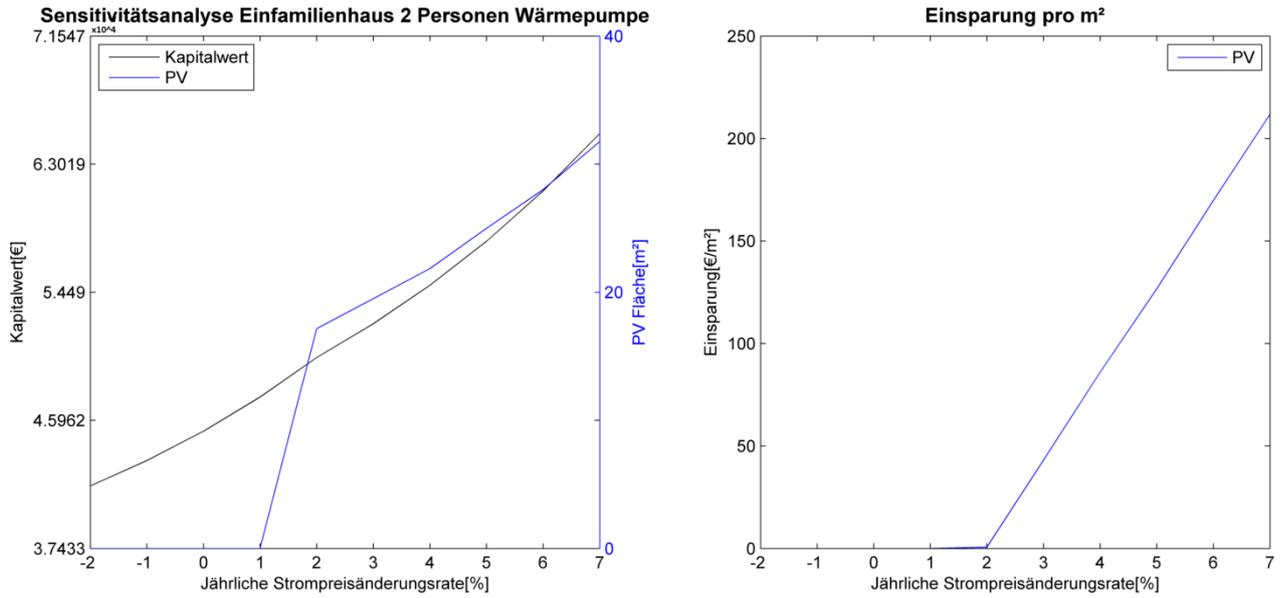


Abbildung 4.30 Sensitivitätsanalyse über Strom, Einfamilienhaus 2 Personen mit Wärmepumpe, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

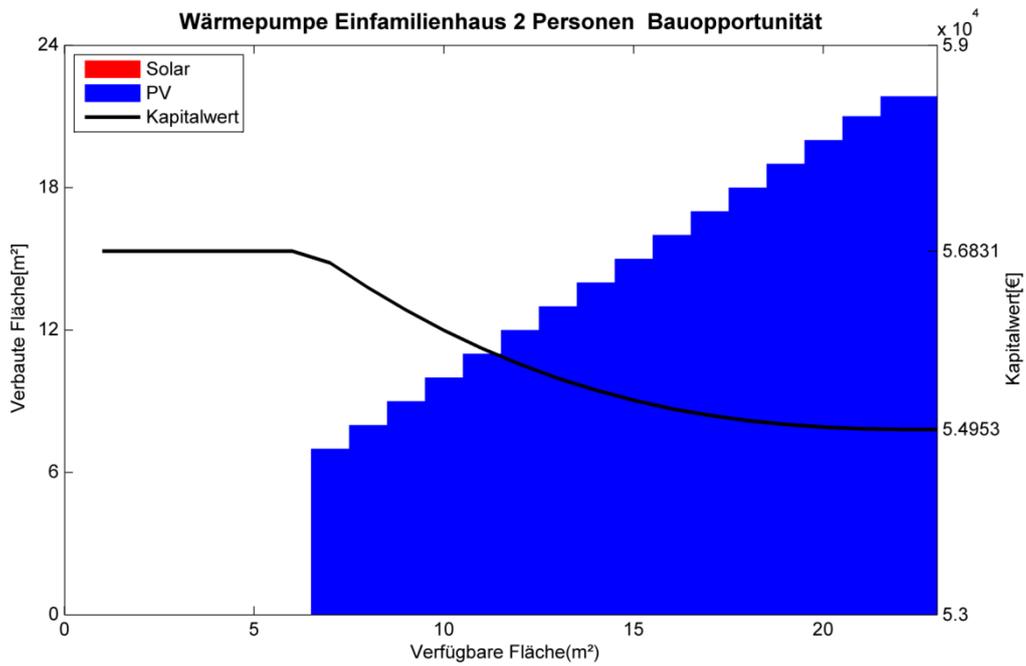


Abbildung 4.31 Bauopportunität zwischen Photovoltaik- und Solarthermieanlage für ein 2 Personen Einfamilienhaus mit Wärmepumpe, 4% Strom und Pelletpreissteigerung, 3.5% Kalkulationszinssatz

4.2.1.2 Einfluss von Förderungsmöglichkeiten auf die Flächenallokation

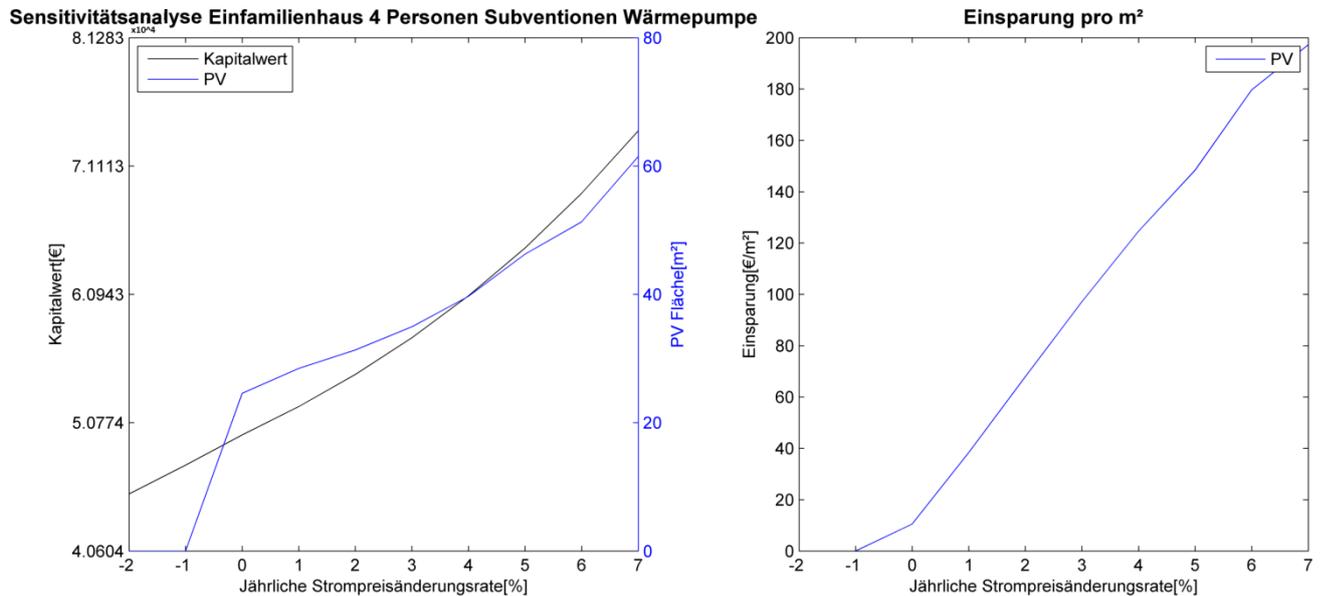


Abbildung 4.32 Sensitivitätsanalyse über Strom, Einfamilienhaus 4 Personen mit Wärmepumpe inklusive Subventionen, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

Die Sensitivität gegenüber der Strompreisänderung wird durch die Subvention der Investitionskosten drastisch verändert. Wie in Abbildung 4.32 links zu sehen ist, wird sogar im Preisszenario eines konstanten Strompreises die Installation einer PV-Anlage rentabel. Das Maximum bei einer Strompreissteigerung von 7% verschiebt sich von 41m² auf 61m². Die Erlöse pro Quadratmeter sind durch die niedrige Schwelle anfänglich höher als im subventionsfreien Szenario. Bei einer Strompreisänderungsrate von 7% reduziert sich der Erlös jedoch von 222€ auf 197€ pro m².

Der Einfluss von Subventionen hat jedenfalls noch einen interessanten Effekt, wenn von einem begrenzten Platzangebot ausgegangen wird. In Abbildung 4.33 fällt deutlich auf, dass bei einer begrenzten Dachfläche von 3m² bis 6m² eine Solarthermieanlage rentabel wird. Allerdings sind im Gegensatz zur Pelletsanlage, die Solarthermie und die PV- Anlage nicht voneinander entkoppelt. So ist zu sehen, dass eine solarthermische Anlage zwar den Kapitalwert reduziert, jedoch ab der Grenze von 6m² von der Photovoltaik-Anlage ersetzt wird. In diesem Energiesystem sind Solarthermie und PV- Anlagen für die Wärmeerzeugung substituierbar. Die PV- Anlage erzeugt mit einem Wirkungsgrad von η_{PV} Strom, welcher dann mit einer Wärmepumpe mit einem Leistungszahl, größer als Eins, in Wärme umgewandelt werden kann. Der Wirkungsgrad $\eta_{PV} \cdot COP$ ist dabei im Mittel schlechter als bei einer Solarthermieanlage. So sind PV- Anlagen vielseitig einsetzbar ,da auch die Stromnachfrage bedient werden kann. Außerdem liegt der Wirkungsgrad einer Solarthermieanlage laut Kapitel 3.3.1 in den Wintermonaten bei null. Eine Photovoltaik- Anlage hingegen, kann aber in dieser Zeit noch einen geringen Ertrag liefern, welcher dann die gestiegene Wärmenachfrage im Winter teilweise decken kann.

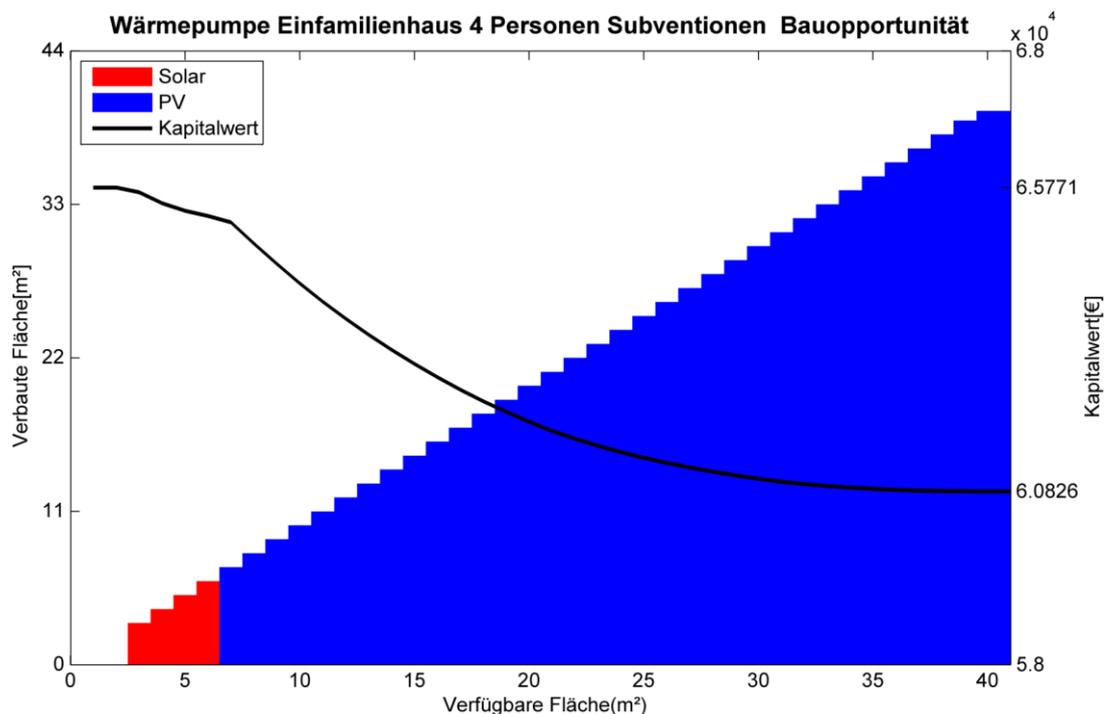


Abbildung 4.33 Bauopportunität zwischen Photovoltaik- und Solarthermieanlage für ein Einfamilienhaus 4 Personen mit Wärmepumpe inklusive Subventionen, 4% Strom und Pelletpreissteigerung, 3.5% Kalkulationszinssatz

4. Ergebnisse 4.2 Optimale Flächenallokation bei einem Wärmepumpenheizsystem

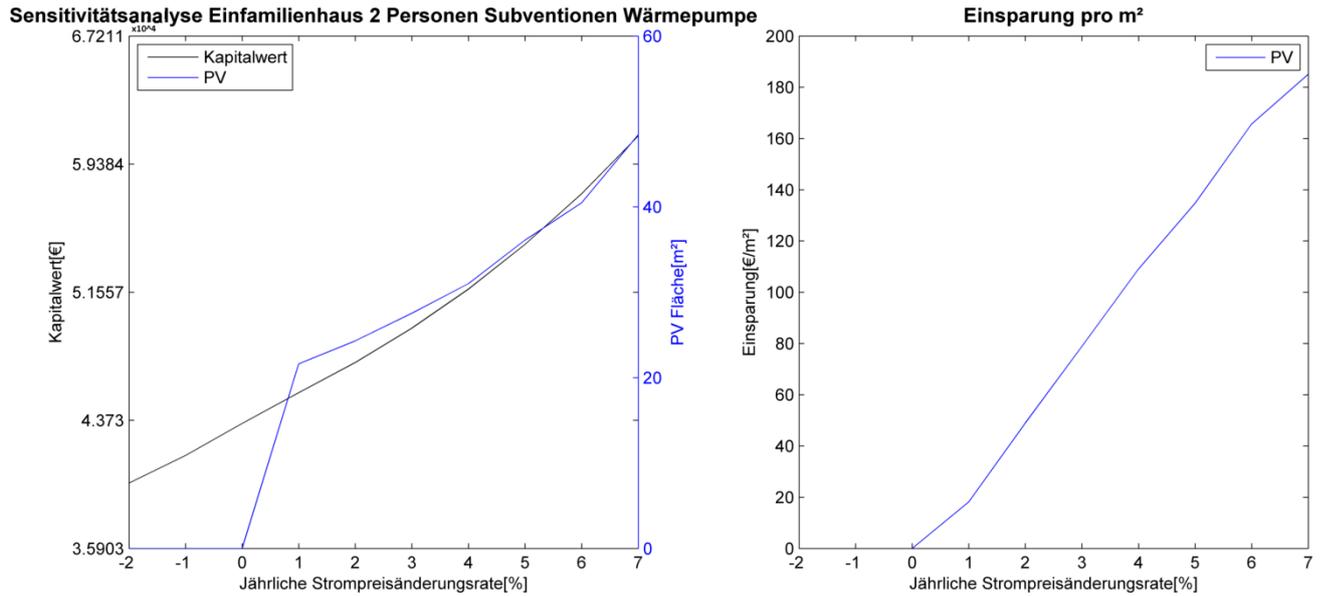


Abbildung 4.34 Sensitivitätsanalyse über Strom, Einfamilienhaus 2 Personen mit Wärmepumpe inklusive Subventionen, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

Auch für den Fall einer Förderung fällt auf, dass zwischen zwei und vier Personen Haushalten nur ein geringer Unterschied besteht. So ist in Abbildung 4.35 derselbe Effekt ersichtlich, wie in Abbildung 4.33, trotz des weitaus geringeren Bezugs.

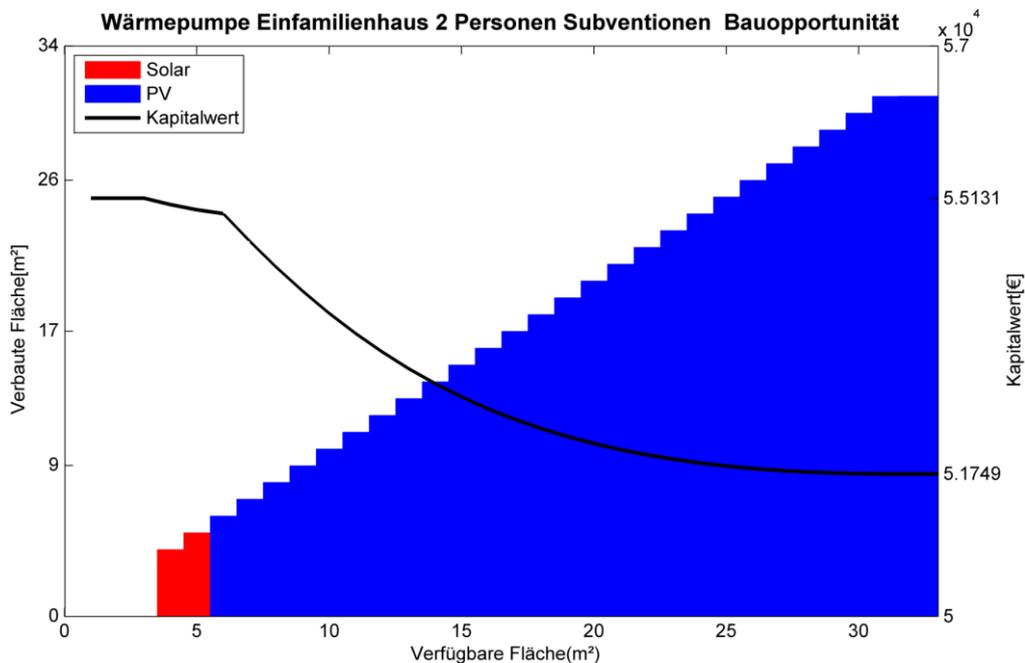


Abbildung 4.35 Bauopportunität zwischen Photovoltaik- und Solarthermieanlage für ein Einfamilienhaus 2 Personen mit Wärmepumpe inklusive Subventionen, 4% Strom und Pelletpreissteigerung, 3.5% Kalkulationszinssatz

4.1.1.3 Einfluss von Zins und Investitionskosten auf die Flächenallokation

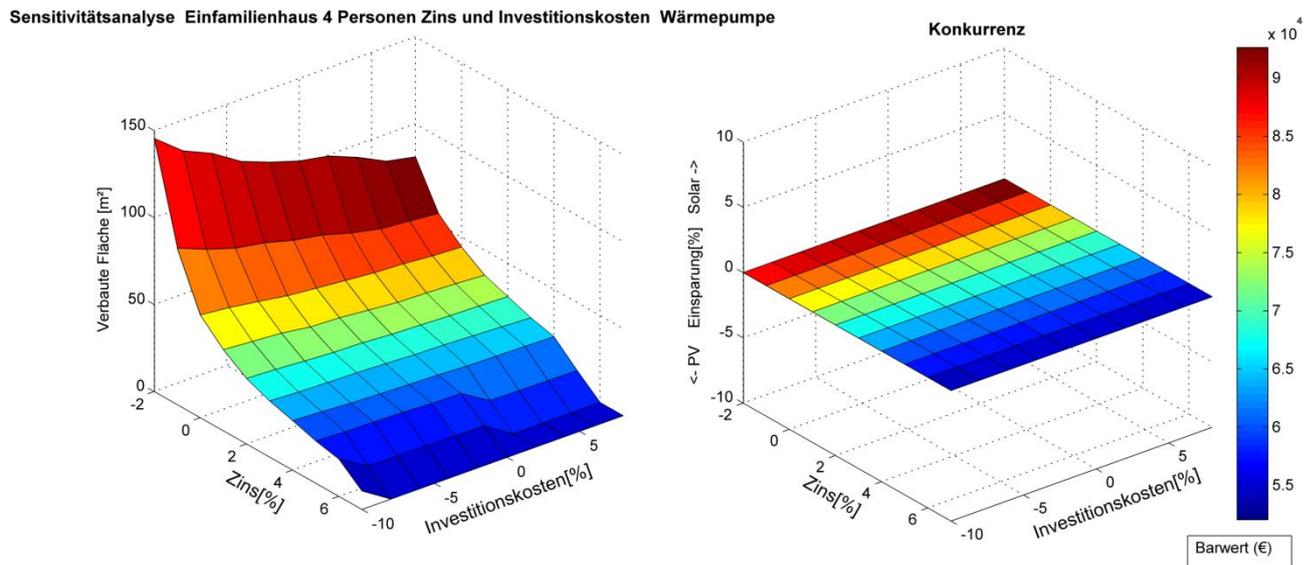


Abbildung 4.36 Sensitivitätsanalyse von Zins und Investitionskosten für ein Einfamilienhaus 4 Personen mit Wärmepumpe, 4% Strompreissteigerung

Die Sensitivitätsanalyse für Zins und Investitionskosten ist in Abbildung 4.34 links dargestellt. Ähnlich der Pelletvariante sind die Investitionskosten nur marginal ausschlaggebend für die Dimension der Anlage. Für einen hohen Zinssatz und bei um 10 % reduzierten Investitionskosten wird Solarthermie rentabel. Bei reduzierten Zinssätzen, wird die Solarthermieanlage durch eine Photovoltaik- Anlage ersetzt. Deren Größe steigt mit einem sinkenden Kalkulationszinssatz stark an. Eine direkte Flächenkonkurrenz tritt wie in Abbildung 4.34 rechts zu sehen, in keinem der betrachteten Szenarios auf, weil in jedem betrachteten Punkt nur eine Technologie gebaut wird.

4.2.1.4 Einfluss der Bausubstanz auf die Flächenallokation

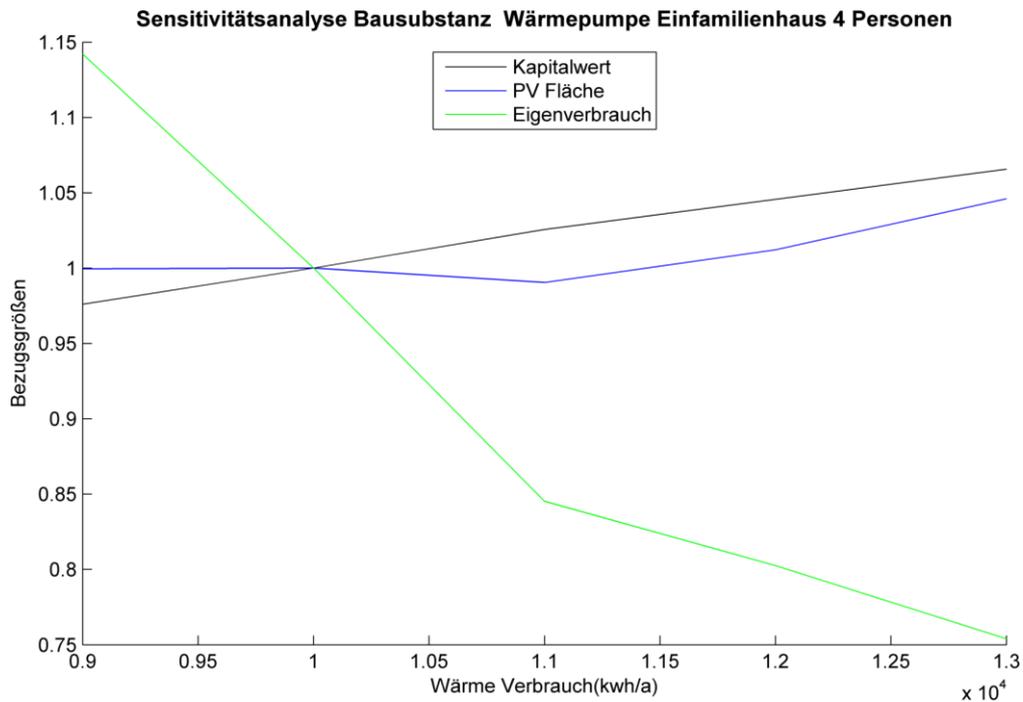


Abbildung 4.37 Sensitivitätsanalyse der Bausubstanz eines Einfamilienhaus 4 Personen mit Wärmepumpe, Der Wärmeverbrauch bei 1 liegt bei 10MWh, der Barwert für den Bezugswert 1 beträgt 64464€ , die PV- Fläche 28.9 und der Eigenverbrauch 28.4%

Anhand einer Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss unterschiedlicher Bausubstanz bei einem Wärmepumpen Heizsystem analysiert. Die Strompreissteigerung beträgt nun wieder 4 %. In der Abbildung 4.35 fällt auf, dass eine leichte Variation des Wärmebedarfs keinen nennenswerten Einfluss auf die Dimensionierung der PV- Anlage hat. Der Kapitalwert steigt hingegen kontinuierlich an. Somit ist ersichtlich, dass eine schlechtere Isolation den Stromverbrauch in einem Zeitraum vergrößert in welchem die PV- Anlage keinen wesentlichen Ertrag abwirft. Dies ist auch deutlich im starken Abfall der Eigenverbrauchsquote des gesamten Energiebezugs zu bemerken. Erst durch eine weitere Steigung des Wärmebedarfs wird eine größere PV- Anlage profitabler. Bei einem 30% höheren Verbrauch steigt der Barwert um 7,3%.

4.2.1.5 Einfluss alternativer Modellannahmen auf die Flächenallokation

Im Vergleich zu einem Pelletheizsystem wurden keine neuen Erkenntnisse gewonnen. Durch das Standardlastprofil würde die optimale Photovoltaikfläche steigen. So bietet das synthetische Stromprofil ein weitaus glaubwürdiges Abbild der Realität und damit der optimalen Flächenallokation.

Die höhere Auflösung würde hingegen den Effekt synthetischer Profile verstärken. Diese Abweichungen sind in einem vertretbaren Ausmaß vorhanden, weswegen die stündliche Auflösung einen guten Kompromiss bildet.

4.2.2 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für ein Mehrfamilienhaus

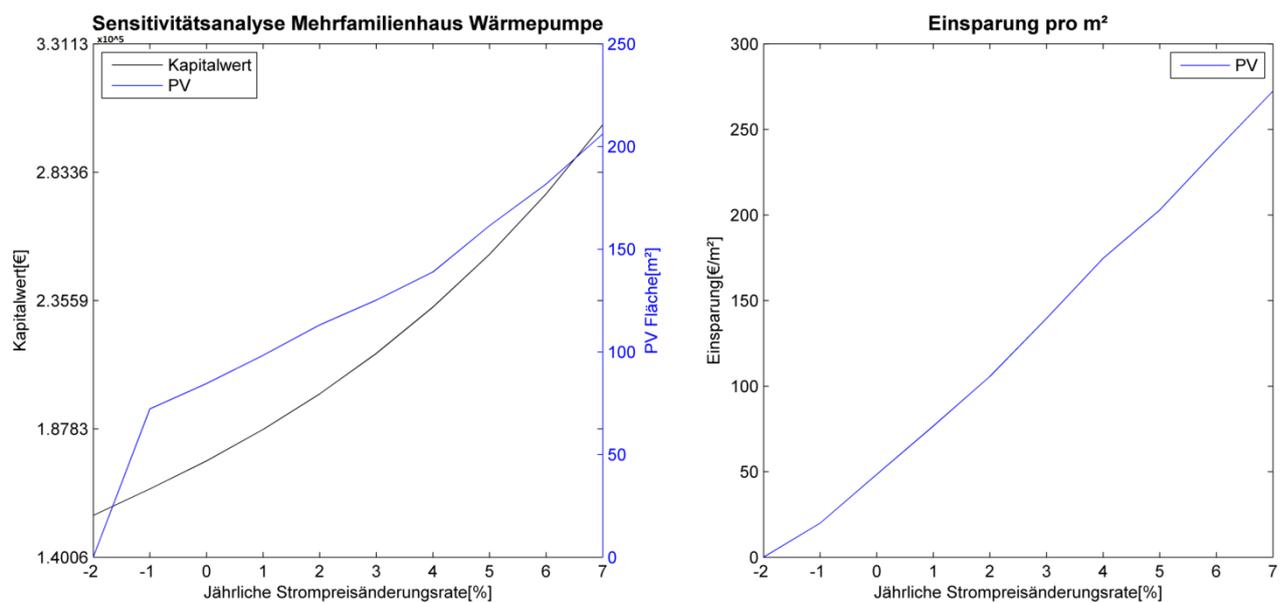


Abbildung 4.38 Sensitivitätsanalyse über Strom, Mehrfamilienhaus mit Wärmepumpe, für 0% gilt ein Strompreis von 19c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 3.5%

Das Mehrfamilienhaus mit einer Wärmepumpe als Heizsystem in Abbildung 4.38, verhält sich analog zu dem Szenario mit der Pelletheizung in Kapitel 4.1.2. Durch den höheren Verbrauch wird die Schwelle verschoben, ab welcher eine Photovoltaik-Anlagen rentabel gebaut werden können. Hier liegt diese bei -1% jährlicher Strompreisreduktion, mit einer Dimensionierung der Anlage von 72,2m². Die Abbildung 4.38 links zeigt deutlich, dass die Steigerungsrate der Anlagengröße für höhere Strompreissteigerungen über 4% weiter zunimmt. In der Abbildung rechts zur Einsparung, ist jedoch auch ersichtlich, dass die mögliche Einsparung pro m² nur linear verläuft. Die Einsparung durch Photovoltaikanlagen liegt dabei über dem Szenario einer Pelletheizung. Für eine Preissteigerung von 4% ist die Bauopportunität wie in Abbildung 4.39 dargestellt. Dabei fällt auf, dass unabhängig vom Platzangebot nur eine Photovoltaik-Anlage den Kapitalwert reduzieren kann. Diese wird ab einer Mindestgröße von 7m² gebaut und wächst auf eine Fläche von 139m² an.

4. Ergebnisse 4.2 Optimale Flächenallokation bei einem Wärmepumpenheizsystem

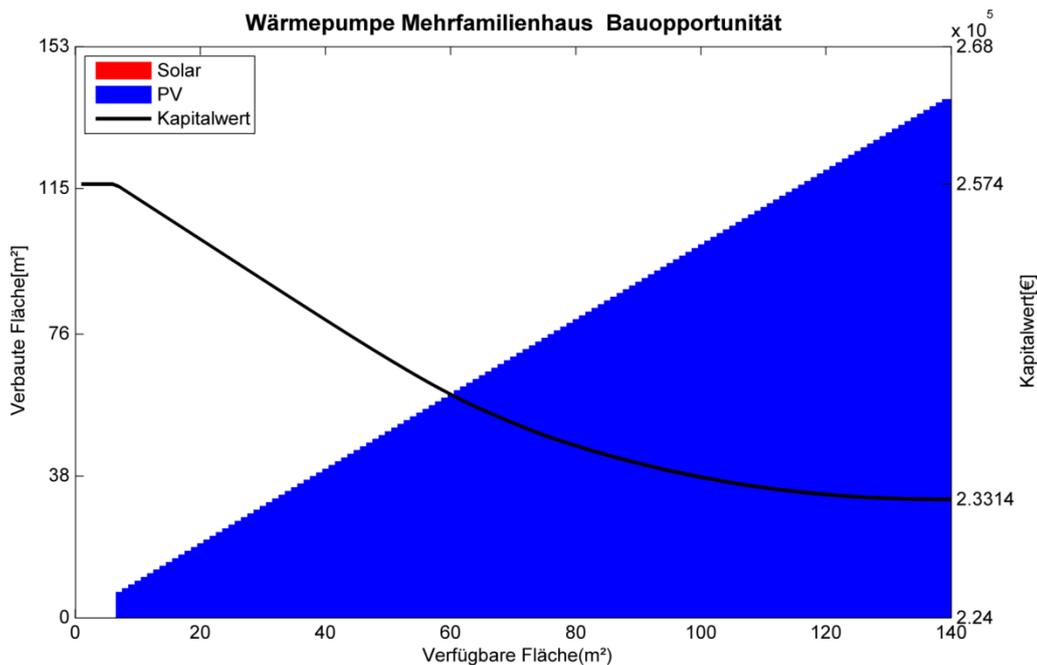


Abbildung 4.39 Bauopportunität zwischen Photovoltaik- und Solarthermieanlage für ein Mehrfamilienhaus mit Wärmepumpe inklusive Subventionen, 4% Strom und Pelletpreissteigerung, 3.5% Kalkulationszinssatz

4.2.3 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für ein Lebensmittelgeschäft

Ausgehend von den Basisdaten in Kapitel 4.1.3, wird für einen Lebensmittelhandel dessen Wärmebedarf durch eine Wärmepumpe bereitgestellt wird, eine Untersuchung bezüglich der Strompreissensitivität angestellt.

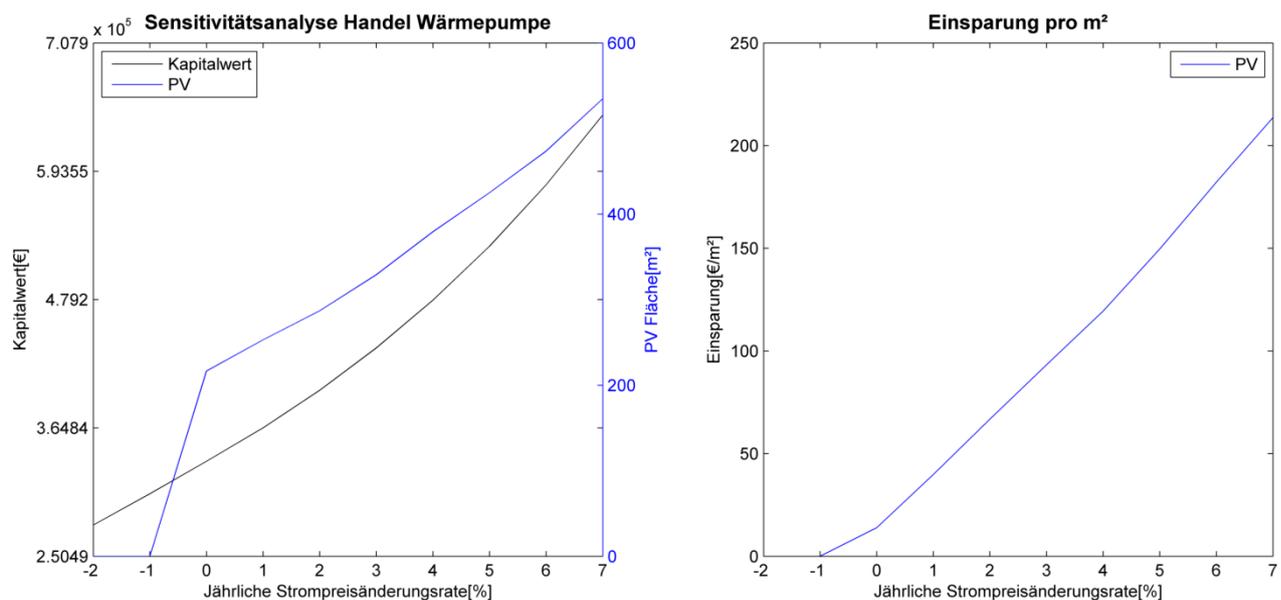


Abbildung 4.40 Sensitivitätsanalyse über Strom, Handel mit Wärmepumpe, für 0% gilt ein Strompreis von 15c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 5%

Wie in Abbildung 4.40 links zu sehen ist, wurde im Vergleich zu einem Mehrfamilienhaus die Grenze verschoben ab welcher Photovoltaikanlagen rentabel sind. Erst bei stagnierenden Strompreisen wird durch eine 216 m² große Anlage ein Optimum erzielt. Zwar verfügt der betrachtete Lebensmittelhandel über einen weitaus höheren Stromverbrauch, jedoch ist der Strompreis für ein Gewerbe niedriger. Dies ist auch deutlich in der rechten Abbildung zu sehen. Die Profitabilität pro verbauten Quadratmeter wird drastisch reduziert.

4.2.4 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für eine Bäckerei

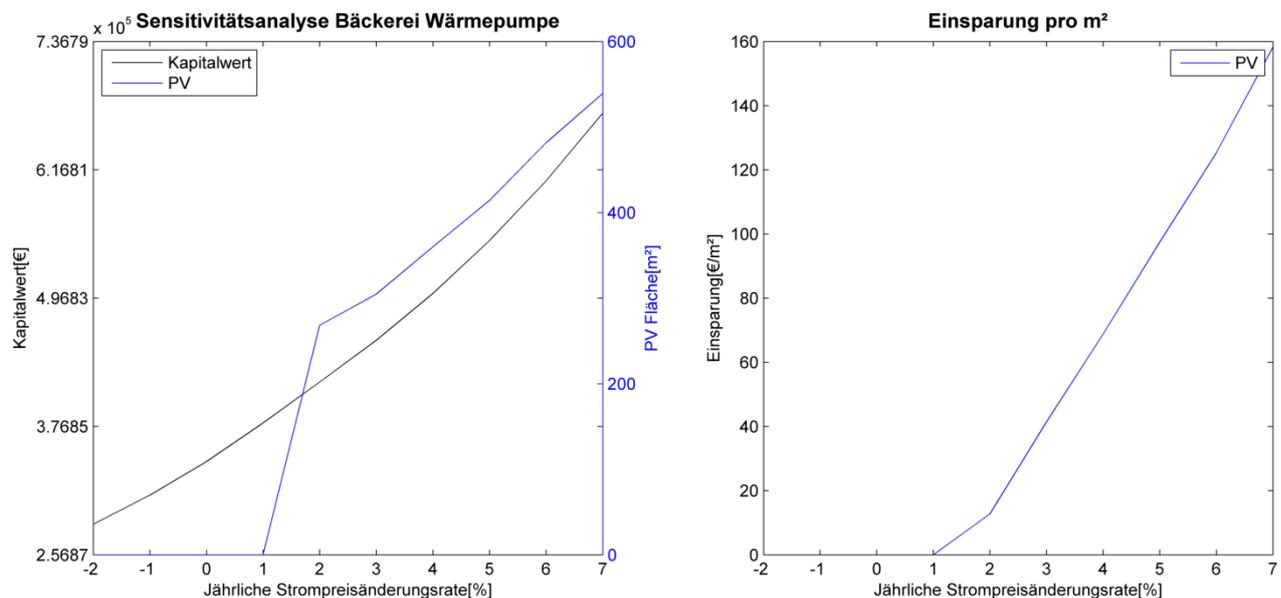


Abbildung 4.41 Sensitivitätsanalyse über Strom, Bäckerei mit Wärmepumpe, für 0% gilt ein Strompreis von 15c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 5%

Wird für die angenommene Bäckerei nun eine Wärmepumpe zur Wärmeversorgung verwendet, steigert sich der Flächenbedarf für die Photovoltaik- Anlagen beträchtlich. So ist, gleich der Pellets Variante, erst ab einer Strompreissteigerung von 2%, eine Photovoltaik-Anlage rentabel. In diesem Punkt beträgt die Anlagengröße 268m². Im Vergleich zum Handel beträgt die PV- Fläche bei 7% Preissteigerung 539m² zu 534m², obwohl der Wärmebedarf 146% über dem des Handels liegt. Dies zeigt, dass es aufgrund des Stromprofils in vielen Fällen billiger ist den Strom über das Netz zu beziehen, als in einstrahlungsreichen Zeiten den Photovoltaikstrom über die Wärmepumpe zu speichern. Die Vermutung wird auch in Abbildung 4.41 bestätigt. Die Profitabilität pro Quadratmeter liegt in allen Punkten unter dem eines Lebensmittelhandels.

4.2.5 Allgemeine Sensitivitätsanalyse der Flächenallokation für eine Schule

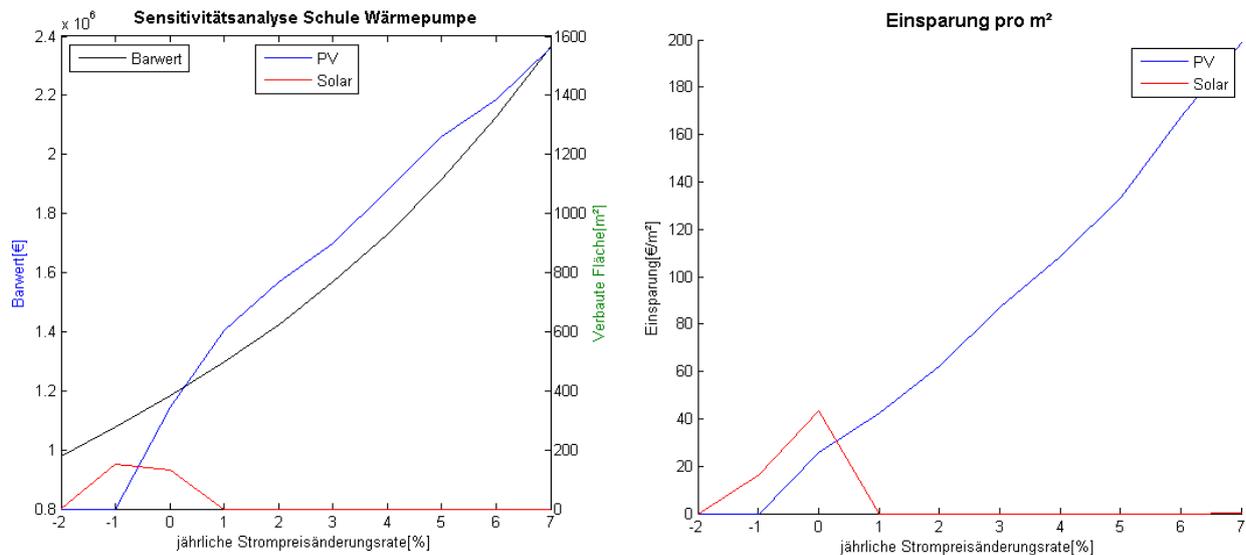


Abbildung 4.42 Sensitivitätsanalyse über Strom, Schule mit Wärmepumpe, für 0% gilt ein Strompreis von 15c/kWh, der Kalkulationszins beträgt 5%

Wird die Schule mit einer Wärmepumpe versorgt, so sieht man in Abbildung 4.42, dass sich die optimale Allokation von PV und Solarthermie im Vergleich zu den Gewerbeprofilen drastisch ändert. Die optimale Größe der PV- Anlage wird bei gleichbleibenden Strompreisen mit 344m² erreicht. Bei 7 % Preissteigerung beträgt die Anlagengröße 1561 m². Im Gegensatz zu den anderen Wärmepumpen Szenarios. wird bei -1% Steigung bis 0% Strompreissteigerung, eine Solarthermieanlage mit 153 und 131m² Fläche rentabel. Bei sinkenden Strompreisen würde die Versorgung der Wärmepumpe ausschließlich durch den Netzbezug, die billigere Wärmeversorgung darstellen. Steigt der Strompreis hingegen kann mittels einer entsprechend dimensionierten Photovoltaik- Anlage eine höhere Einsparungen erzielt werden. Dies ist auch deutlich in der rechten Abbildung 4.40 zu sehen. Eine Solarthermieanlage kann dabei eine hohe Einsparung erreichen, wird jedoch ab 1% Strompreissteigerung zur Gänze durch die Photovoltaik- Anlage substituiert.

5. Synthese der Ergebnisse

Dieses Kapitel widmet sich dem Vergleich zwischen allen Szenarios und den simulierten Energiesystemen. Zuerst wird dabei der solare Deckungsgrad untersucht. In einem nächsten Schritt werden für beide Heizsysteme die aggregierten Kapitalwerte für unterschiedliche Preissteigerungsraten analysiert.

Um einen Vergleich zwischen Pellet- und Wärmepumpenheizsystemen zu ermöglichen, wird von einer synchronen Preissteigerungsrate von Strom und Pellets ausgegangen.

5.1 Vergleich des solaren Deckungsgrades

Der solare Deckungsgrad in dieser Betrachtung, bezeichnet die Substitution des konventionellen Energieträgers mittels einer Solarthermie- oder einer Photovoltaikanlage

$$Deckungsgrad_{Solarthermie} = \frac{Pellets_t(Solar=0) - Pellets_t(Solar=Opt.)}{Pellets_t(Solar=0)} \quad (5.1)$$

$$Deckungsgrad_{PV} = \frac{Netzbezug_t(PV=0) - Netzbezug_t(PV=Opt.)}{Netzbezug_t(PV=0)}. \quad (5.2)$$

Dabei ist es unerheblich wie hoch der Ertrag der Anlage war. So ist bei einer Solarthermieanlage der Anteil an der durch Sonneneinstrahlung gewonnenen Energie weitaus höher als durch den solaren Deckungsgrad angegeben. Jedoch können diese Anteile in einstrahlungsreichen Zeiten nicht zur Gänze genutzt werden. So werden diese entweder nicht genutzt oder sind höheren Speicherverlusten ausgesetzt. Bei einer Photovoltaikanlage wird ebenso, nur die Reduktion des durch das Stromnetz gedeckten Stromverbrauchs berücksichtigt, auch wenn Überschüsse in das Netz zurück gespeist werden und somit nicht verloren gehen. Der solare Deckungsgrad ist dabei nur ein Vergleichsparameter und sagt nichts über die Wirtschaftlichkeit der Anlage aus. Dieser bildet immer einen Kompromiss zwischen der Nutzung in Zeiten mittlerer Einstrahlung und den Überschüssen zu Spitzenzeiten.

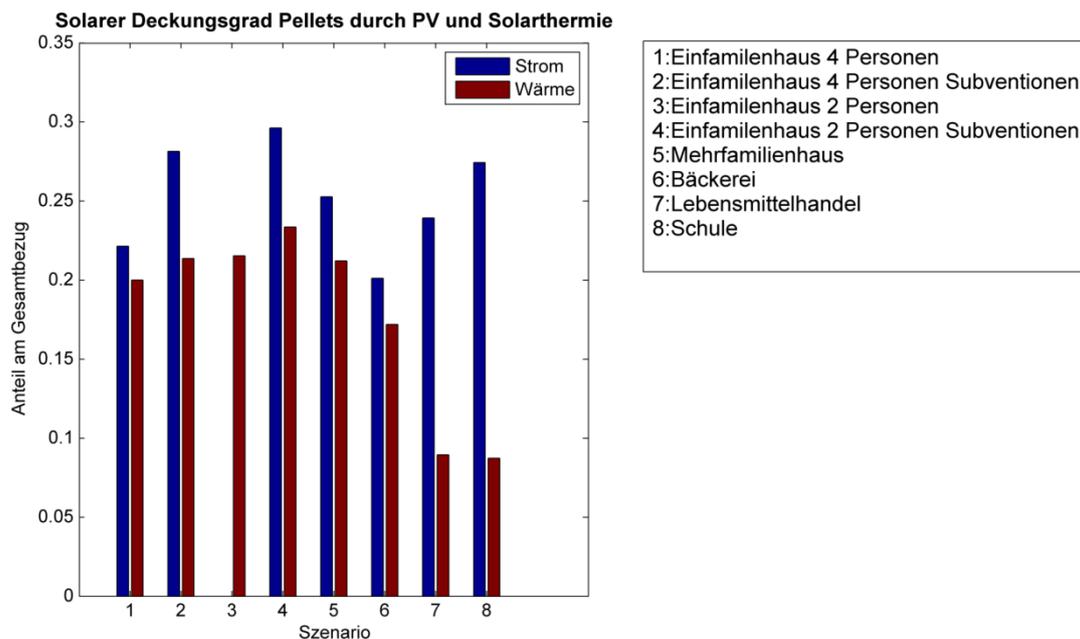


Abbildung 5.1 Vergleich der Deckungsgrade bei dem Heizsystem Pelletofen für alle Szenarien, 4% Preissteigerungssrate

In Abbildung 5.1 ist der solare Deckungsgrad für ein Pelletsheizsystem dargestellt. Es fällt auf, dass für Einfamilienhäuser der Deckungsgrad durch Förderungen gesteigert werden kann. Besonders klar ist dies für ein Einfamilienhaus mit 2 Personen auszumachen. Für solche ist im subventionsfreien Szenario eine Photovoltaikanlage allerdings nicht rentabel. Der solare Deckungsgrad steigt dabei für Photovoltaikanlagen weitaus höher als für Solarthermieanlagen. Es ist im Vergleich zwischen den zwei und den vier Personen Haushalten ersichtlich, dass der kleinere Haushalt über einen höheren Deckungsgrad verfügt. Für ein Mehrfamilienhaus wurde der Deckungsgrad für den Wärmebedarf simuliert, sodass er mit dem von Einfamilienhäusern vergleichbar ist. Der solare Deckungsgrad der Stromversorgung liegt jedoch im förderungsfreien Fall darüber. Dies ist zu erwarten, da die Summe der synthetischen Stromprofile eine gleichmäßigere Nachfrage ergeben. Auch die Ergebnisse der Gewerbe entsprechen den Erwartungen. Eine Bäckerei weist die geringste solare Deckung des Strombedarfs auf, da wie in Kapitel 3.3.5 gezeigt, der Stromverbrauch nur eine geringe Kongruenz mit der Einstrahlung aufweist. Die, durch die Solarthermieanlage gewonnene Energie kann jedoch gespeichert werden, womit die höchste solare Deckungsrate für Gewerbe erreicht werden kann. Ein weiterer Grund für die hohe Deckungsrate bei einer Bäckerei besteht in der Tatsache, dass Wärme dort nicht ausschließlich zum Heizen sondern auch für die Prozesswärme benötigt wird. Die Prozesswärme fällt über das gesamte Jahr an.

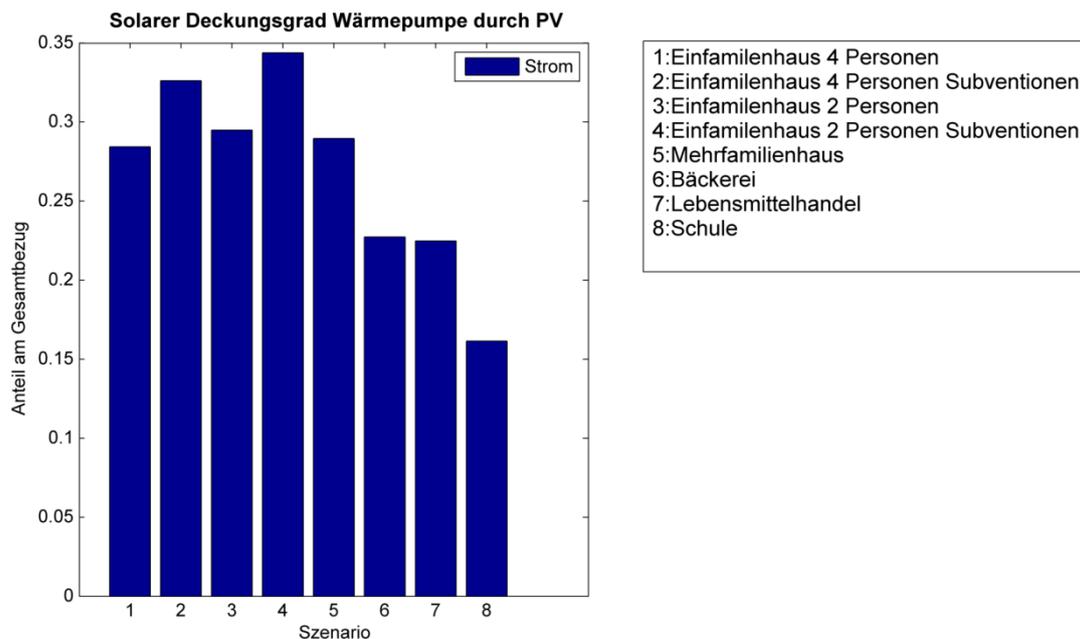


Abbildung 5.2 Vergleich des Deckungsgrades durch PV für das Heizsystem Wärmepumpe für alle Szenarien, 4 % Preissteigerungsrate

In Abbildung 5.2 sind nun die Verhältnisse für eine Wärmepumpe ersichtlich. In allen Szenarios beschränkt sich die Nutzung auf eine Photovoltaikanlage. Diese kann sowohl elektrische als auch durch das Heizsystem, auch thermische Energie bereitstellen. Durch diese Flexibilität sind die solaren Deckungsgrade für Ein- und Mehrfamilienhäuser höher als bei einem Pelletsheizsystem. Wieder zeigt sich, dass in einem zwei Personen Haushalt die Deckungsrate marginal höher ist als für einen vier Personen Haushalt. Über die höchste Deckungsrate von 34% verfügt dabei ein 2 Personen Haushalt mit Subventionen.

Bei den Gewerbeszenarios sind Bäckerei und Lebensmitteladen fast gleichauf. Nur die Schule fällt stark zurück. Dies spiegelt den hohen Heizbedarf in den Wintermonaten wieder, der nur zu sehr geringen Teilen durch eine Photovoltaikanlage gedeckt werden kann.

5.2 Aggregierte Kapitalwerte der Szenarien

Um einen Vergleich der Heizkonzepte zu erlauben, wurden die aggregierten Kapitalwerte beider Technologien miteinander verglichen. Hierbei handelt es sich um negative Kapitalwerte und der Geringste stellt dabei auch den wirtschaftlichsten dar. Für Ein- und Mehrfamilienhäuser geben die Kapitalwerte dabei die vollen Investitionskosten und laufenden Kosten wieder. Dabei wurden die Kosten pro Haushaltsangehörigen verglichen um einen umfassenden Vergleich zu erlauben. Für die Gewerbe und Schul Profile sind hingegen nur die Investitionskosten für Solarthermie- und Photovoltaikanlagen, sowie die laufenden

Energiekosten berücksichtigt worden. Es sind jeweils die Preis Szenarien für gleichbleibende Preise, 4% und 7 % Steigung aufgelistet.

Ein und Mehrfamilienhäuser

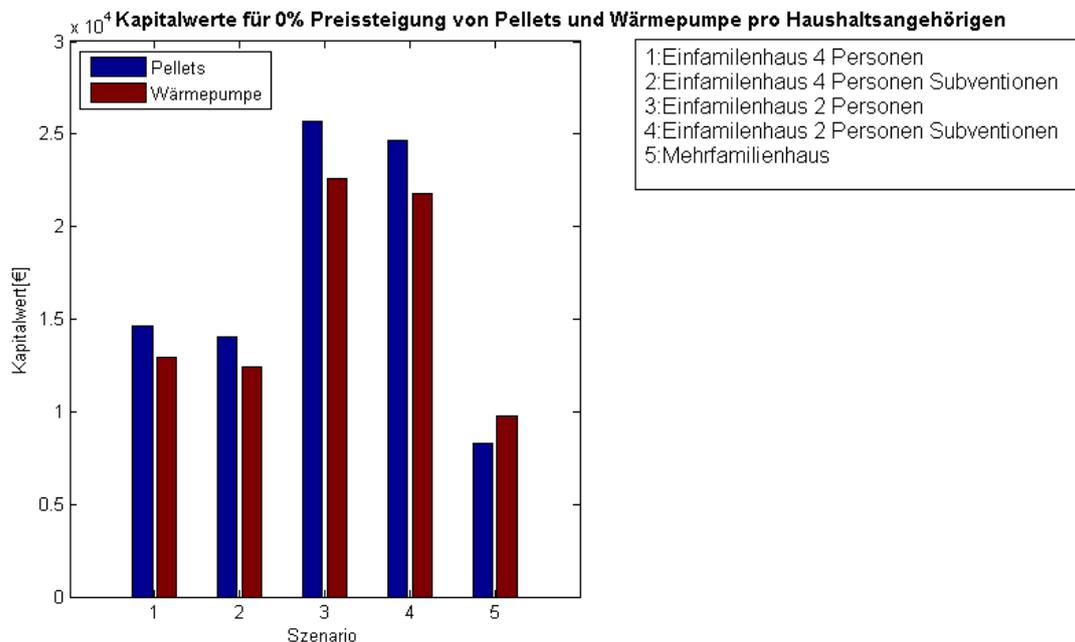


Abbildung 5.3 Vergleich zwischen den Heizsystemen über die Kapitalwerte für alle Klein und Mittelverbraucher, für 0 % Preissteigerungsrate von Strom und Pellets

Wie in Abbildung 5.3 zu sehen, ergibt für ein Einfamilienhaus das Heizsystem mit einer Wärmepumpe den geringsten Kapitalwert. Die Differenz zwischen Pelletsheizung und Wärmepumpe beträgt dabei 12 bis 13% des Kapitalwerts für eine Wärmepumpe. Sowohl Haushaltsgröße, als auch Förderungen machen haben auf die Differenz nur einen geringen Einfluss. Für ein Mehrfamilienhaus ergibt sich jedoch ein konträres Bild. In diesem Fall kann durch einen Pelletofen ein 15 % geringere Kapitalwert erzielt werden. Dies ist überraschend, da der Pelletofen wie im Anhang ersichtlich bei einem Mehrfamilienhaus sowohl über höhere Investitionskosten, als auch über höhere Wartungskosten verfügt. Wie in Kapitel 4.1.2 und 4.2.2 zu lesen, fällt die Einsparung bei stagnierenden Preisen nur sehr gering aus. Dies bedeutet, dass die Differenz durch das unterschiedliche Verbrauchsprofil begründet ist.

In Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5 sind die Kapitalwerte für 4 und 7 % Preissteigung. Während die Reihenfolge durch die Preissteigerung ident bleibt, kann deutlich abgelesen werden, dass die Differenz zwischen Wärmepumpe und Pelletsheizung, für Einfamilienhäuser ansteigt. Diese beträgt 16% bis 17% für alle Szenarien. Für ein Mehrfamilienhaus hingegen

reduziert sich die Differenz immer weiter. Dies lässt sich durch die höhere Einsparung pro m² bei hohen Steigerungsraten, für ein Mehrfamilienhaus erklären. Die Gesamtkosten pro Haushaltsangehörigen sind für einen zwei Personen Haushalt am höchsten. Die Kosten können durch eine höhere Anzahl, an in einem Haus wohnenden Personen reduziert werden. Jedoch ist die Differenz zwischen einem zwei zu einem vier Personen Haushalt weitaus ausgeprägter, als bei einem vier Personen Haushalt zu einem Mehrfamilienhaus.

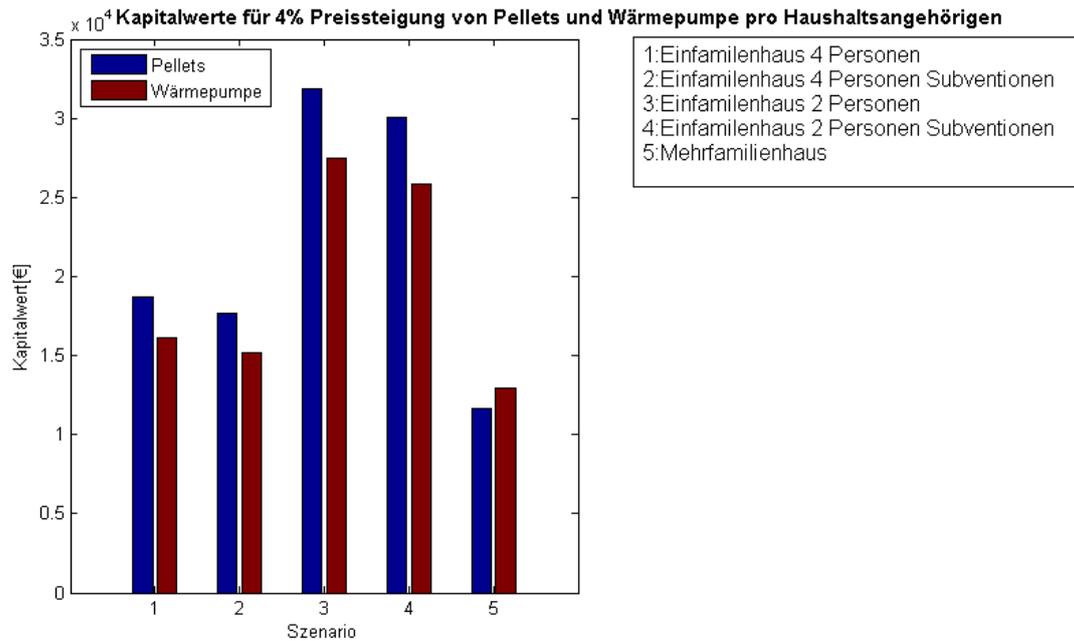


Abbildung 5.4 Vergleich zwischen den Heizsystemen über die Kapitalwerte für alle Klein und Mittelverbraucher, für 4 % Preissteigerungsrate von Strom und Pellets

5. Synthese der Ergebnisse 5.2 Aggregierte Kapitalwerte der Szenarien

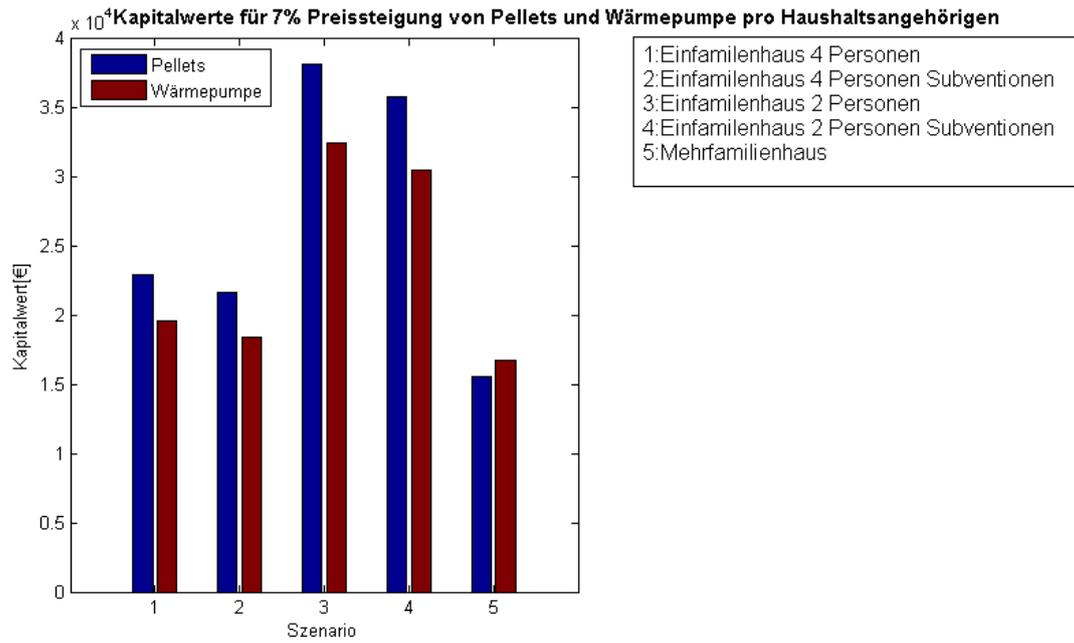


Abbildung 5.5 Vergleich zwischen den Heizsystemen über die Kapitalwerte für alle Klein und Mittelverbraucher, für 7 % Preissteigerungsrate von Strom und Pellets

5. Synthese der Ergebnisse

Gewerbe und öffentliche Gebäude

In Abbildung 5.5 sind die Kapitalwerte für die Bäckerei, einen Lebensmittelhandel und einer Schule dargestellt. Hierbei sind für jeden Verbrauchertyp unterschiedliche Präferenzen abzulesen. Eine Bäckerei, kann durch eine Wärmepumpe am billigsten versorgt werden, wohingegen bei einem Lebensmittelhandel beide Technologien gleichauf liegen. Eine Schule mit Wärmepumpe bietet ebenfalls den geringsten Kapitalwert. Auch für unterschiedliche Wachstumsprognosen ändert sich an der Relation der Kapitalwerte zwischen den beiden Heizsystemen wenig. Dazu soll auf die Abbildungen in Anhang B verwiesen werden. Allgemein bietet die Wärmepumpe bei hohem Wärmebedarf das bessere Ergebnis.

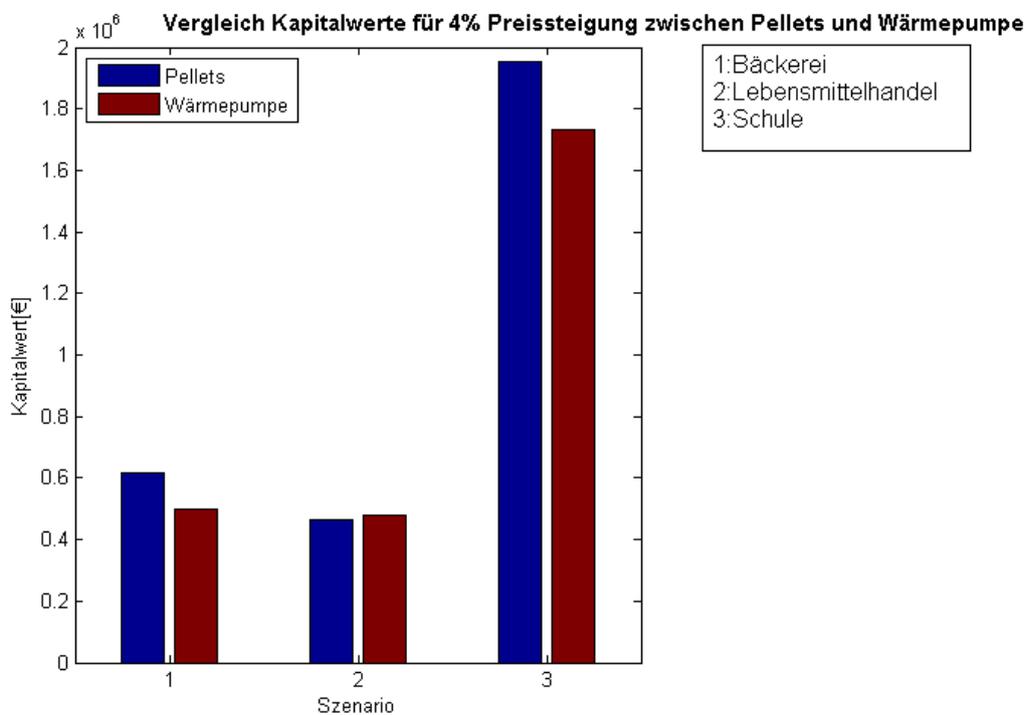


Abbildung 5.6 Vergleich zwischen den Heizsystemen über die Kapitalwerte für alle Großverbraucher, für 2 % Preissteigerungsrate von Strom und Pellets

6. Schlussfolgerungen

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Flächenkonkurrenz zwischen Photovoltaik- und Solarthermie- Anlagen in Kombination mit Wärmepumpen- und Pelletsheizsystemen zu analysieren. Durch die lineare Optimierung kann für unterschiedliche Verbrauchsprofile die ideale Dachflächenallokation ermittelt werden. Dabei stellt sich heraus, dass das jeweilige Heizsystem den größten Einfluss auf den Einsatz der zu verwendenden Technologie hat.

Für Pelletsheizsysteme in Einfamilienhäusern konnte gezeigt werden, dass eine hybride Nutzung von sowohl Photovoltaik- als auch solarthermischen Anlagen bei moderaten Strom- und Pelletpreissteigerungen den geringsten Kapitalwert ergibt. Für geringe Preissteigerungsraten hat eine Solarthermieanlage den größeren Einfluss auf den Kapitalwert, für hohe Preissteigerungsraten ist der Einfluss der Photovoltaikanlage dominant. Die sich ergebende Einsparung auf die Fläche bezogen ist für einen Solarkollektor in jedem Fall höher. Der spezifische Flächenbedarf für Solarthermie ist aber geringer. Dies führt dazu, dass bei einer geringen nutzbaren Dachfläche ausschließlich eine Solarthermieanlage optimal ist. Für Einfamilienhäuser ist die optimale Photovoltaikanlagengröße kleiner dimensioniert als die weit verbreitete 5 kWp Anlage. Diese Arbeit zeigt, dass ein geringerer Kapitalwert mit einer kleineren Photovoltaikanlage, in Kombination mit einer solarthermischen Anlage, erreicht werden kann. Förderungen verschieben die Grenzen ab welcher Preissteigerung eine Technologie wirtschaftlich ist. Des Weiteren wird festgestellt, dass die Bausubstanz auf die Dachflächenallokation von Solarkollektoren Einfluss hat. Erwartungsgemäß steigt der Bedarf an Kollektorfläche bei schlechterer Isolation und höherem Wärmebedarf.

Mehrfamilienhäuser, welche mit einer Pelletsheizung bedient sind, erweisen sich laut den Berechnungen dieser Arbeit als prädestiniert um mit einer Kombination aus solarthermischen Anlagen und Photovoltaikanlagen unterstützt zu werden. Auch ohne Förderungen kann durch den hohen Eigenverbrauchsanteil eine signifikant höhere Einsparung über alle berechneten Preisszenarios erzielt werden. Der Einfluss auf den Kapitalwert von sowohl Solarthermie-, als auch Photovoltaikanlage ist hierbei zu fast gleichen Teilen ausgeprägt. Gewerbebetriebe unterscheiden sich drastisch, einerseits in der Allokation der Dachflächen, als auch in der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Technologien. Es wird für alle Verbrauchsprofile eine Kombination aus Solarthermie und PV vorgeschlagen. Ein Lebensmittelgeschäft, welches typischerweise über einen hohen Strombedarf, jedoch nur einen geringeren Wärmebedarf verfügt, kann mittels einer Photovoltaikanlage eine große Einsparung erzielen. Zwar kann auf

5. Synthese der Ergebnisse

die Fläche bezogen auch eine Solarthermieanlage höhere Gewinne erzielen, aber das Flächenverhältnis zwischen beiden Technologien liegt nur bei dem Faktor 10. Eine Bäckerei, dessen Verbrauch in der Regel nicht der Einstrahlung der Sonne folgt, kann andererseits durch Photovoltaik nur in sehr viel geringerem Ausmaß profitieren. Eine Solarthermieanlage deren erzeugte Wärme gespeichert werden kann, verfügt hingegen über eine weitaus höhere Profitabilität. Ähnlich verhält sich eine Schule, welche sich durch einen hohen Wärmeverbrauch über die gesamte Heizsaison auszeichnet. Auch in diesem Fall kann durch eine Solarthermieanlage die höchste Einsparung erzielt werden.

Ein Heizsystem basierend auf einer Wärmepumpe weist eine grundlegend andere Dachflächenallokation auf. Bei dieser werden nur in Grenzfällen solarthermische Anlagen installiert. Es werden auch nicht gleichzeitig eine Photovoltaik- und eine Solarthermieanlage gebaut, da deren Funktion in diesem Heizsystem substituierbar ist.

Für ein Einfamilienhaus bedeutet dies, dass die Wirtschaftlichkeit durch die Wärmepumpe verbessert wird. Der gesamte Platzbedarf liegt über dem Vergleichssystem einer Pelletsheizung mit Solarthermie- und Photovoltaikanlage. Einfamilienhäuser mit einer Wärmepumpe weisen im Vergleich der Heiztechnologien den geringeren Kapitalwert auf. Der solare Deckungsgrad ist für diese Kombination höher als für eine Pelletsheizung ausgestattet mit beiden solaren Technologien. Bei heutiger Förderung beider Technologien entsteht jedoch ein kleines Fenster in welchem eine Solarthermieanlage bei nur geringer verfügbarer Dachfläche wirtschaftlicher ist als eine PV Anlage. Ab einer Dachfläche von 7m² wird diese Solarthermieanlage jedoch zur Gänze durch die Photovoltaikanlage substituiert.

Wird ein Mehrfamilienhaus mit einer Wärmepumpe versorgt, weist die Photovoltaikanlage unter allen untersuchten Szenarien das höchste Einsparungspotential pro verbauter Dachfläche auf. Unter den konkurrierenden Heizkonzepten haben jedoch Pelletsheizungen für Mehrfamilienhäuser den geringeren Kapitalwert. Die Kombination einer PV-Anlage mit einer Wärmepumpe fällt bei den verschiedenen Gewerbeprofilen grundlegend unterschiedlich aus. Während eine Bäckerei ein geringeres Einsparungspotenzial durch die Installation einer Photovoltaikanlage aufweist, ist diese im Vergleich mit dem Pelletsheizsystem die billigere Alternative. Das Lebensmittelgeschäft zeigt andererseits ein konträres Bild. So kann durch die Photovoltaikanlage eine signifikante Einsparung erzielt werden, jedoch ist der resultierende Kapitalwert höher als beim Pelletsheizsystem. Die Schule weist eine interessante Dachflächenallokation auf. So wird zwar in den meisten Preisszenarien ausschließlich eine Photovoltaikanlage installiert, allerdings ist eine Solarthermieanlage bei stagnierenden und

5. Synthese der Ergebnisse

leicht sinkenden Strompreisen wirtschaftlicher. Dies ist dem großen Wärmeverbrauch bei einem moderaten Stromverbrauch geschuldet.

Zusammenfassend wird gezeigt, dass Pelletsheizsysteme von einer Kombination aus Solarthermie- als auch Photovoltaikanlagen profitieren. Im Gegensatz dazu ist in fast allen Szenarien dieser Arbeit eine Photovoltaikanlage die logische Ergänzung für ein Wärmepumpenheizsystem. Die Berechnungen haben aber auch gezeigt, dass diese Aussagen in Spezialfällen weiter differenziert werden müssen.

7. Literatur

- Viessmann (2008): Planungshandbuch Solarthermie,
http://www.viessmann.at/content/dam/internet-global/pdf_documents/sonstige/planungshandbuch-solarthermie.pdf
(Stand: 8.2.2015)
- Biermayr et al. (2014): Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2013,
http://www.nachhaltigwirtschaften.at/e2050/e2050_pdf/201426_marktentwicklung_2013.pdf (Stand : 28.2.2015)
- Faninger G(2012): Die Bedeutung von kombinierten Solar-Wärmepumpe-Heizungssystemen in der Österreichischen Energiestrategie,2012, <http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien878.pdf> (Stand : 28.2.2015)
- Bazaraa et al.(1990): Linear Programming and Network Flows, Wiley,
ISBN: 978-0-470-46272-0 , 1990
- Nakicenovic N, Haas R(2011): Skript zur Vorlesung Energiemodelle und Analysen,2011
- Wesselak V, Schabbach T(2009):, Regenerative Energietechnik,
Springer Verlag, ISBN 978-3-540-95881-9,2009
- Lettner G, Auer H (2013): PV COMPETITIVENESS AND PV SUPPORT SCHEMES –ECONOMIC EFFECTS OF RENT SEEKING,IEEE, 2013
- Persson T(2006): Combined solar and pellet heating systems for single-family houses,
Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology Stockholm, 2006

Anhang A

Investitionskosten

Die Investitionskosten für den Pelletofen und die Wärmepumpe wurden nur für Ein- und Mehrfamilienhäuser erhoben. Damit können diese Ergebnisse direkt über den Kapitalwert verglichen werden. Die Kosten sind dabei durch offizielle Anbieter und Kostenvergleiche ermittelt worden. Dabei werden für die Heizsysteme, die summierten Kosten für die Komponenten und die Installation zusammengefasst. Für das Wärmepumpenheizsystem wurde angenommen, dass nur ein Pufferspeicher notwendig ist. Wird jedoch eine solarthermische Anlage gebaut, wird diese auf einen Warmwasser Kompaktspeicher aufgewertet.

Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit behandelt die Flächenkonkurrenz zwischen Photovoltaik und Solarflächen bei verschiedenen Heizsystemen. Für die optimale Dimensionierung dieser, sind die Investitionskosten des Heizsystems irrelevant. So wurde bei den Gewerben und der Schule darauf verzichtet die Investitionskosten für das Heizsystem zu erfassen. Für Heizsysteme in dieser Größenordnung sind Kosten nur schwer zu eruieren und diese hätten die anderen Kostenfaktoren verzerrt. In diesem Fall sind nur die Investitionskosten für die Photovoltaik- und Solaranlage und die Energiekosten berücksichtigt worden. Dadurch ist jedoch ein direkter Vergleich zwischen beiden Heizoptionen nicht mehr möglich.

[€]	EFH	MFH	Handel	Bäckerei	Schule
Investitionskosten Pufferspeicher(WP)	650	1000	-	-	-
Investitionskosten Speicher	1340 ²⁷	3000	-	-	-
Speichergröße	20	80	80	300	600
Investitionskosten Pelletofen	21000 ²⁸	50000	-	-	-
Investitionskosten Wärmepumpe	18000 ²⁹	45000	-	-	-
Netztarif	19 ³⁰	19	15	15	15
Rüchspeisevergütung	4.28 ³¹	4.28	4.28	4.28	4.28
Pelletstarif	5 ³²	5	4.5	4.5	4.5
Kalkulationszins	3.5	3.5	5	5	5
Wartungskosten Wp	150	200	500	1000	1500
Wartungskosten Pellets	300	1000	2000	3000	5000

Tabelle A.1 Zusammenfassung der Investitionskosten und weitere Parameter

27 Siehe Preisliste (Abgerufen 20.2.2015) URL www.solarenergy.at/de/solar-strom/preisliste.pdf

28 Pelletpreis http://www.oegut.at/downloads/pdf/e_vollkostenvergleich_eb.pdf(Abgerufen am 2.2.2015)

29 Preis für Wärmepumpe <http://www.waermepumpen.info/ratgeber/preise>(Abgerufen am 2.2.2015)

30 Siehe Preisinformation <http://www.e-control.at/haushalts-tarifkalkulator/detailInformation.xhtml> (Abgerufen am 2.2.2015)

31 Siehe Rüchspeisevergütung <http://www.pvaustria.at/strom-verkaufen/>(Abgerufen am 2.2.2015)

32 Pelletpreise <http://www.propellets.at/de/pelletpreise/>(Abgerufen am 2.2.2015)

Subventionen

Bei der Auswahl an Subventionen wurden für Österreich typische Landes- und Bundesförderungen berücksichtigt. Bei diesen handelt es sich ausschließlich um Investitionszuschüsse. Nebenbei müssen die jeweils geförderten Systeme, Qualitätsstandard und Rahmenbedingungen erfüllen.

Die steirische Landesförderung für Wärmepumpen erwartet eine Jahresarbeitszahl von 3.8 und eine Gebäudehülle ausgeführt als Niedrigenergiegebäude. Diese Förderung kann sowohl mit Solarthermie als auch Photovoltaik kombiniert werden.

Eine häufige Einschränkung betrifft auch den möglichen Anschluss in ein Fern- oder Nahwärmenetz. Die oberösterreichische Landesförderung eines Pelletofen setzt so zum Beispiel voraus, dass innerhalb von 35 Metern kein Anschluss an ein bestehendes Fernwärmenetz möglich ist.

Für Photovoltaikanlagen gibt es bis Stand 15.Dezember, eine Bundesförderung für Gebäude integrierte Anlagen. Es wird jedoch keine gesonderte Einspeisevergütung gezahlt, womit der zurückgespeiste Strom eigenhändig verkauft werden muss.

	Förderung
Wärmepumpe	2500€
Pelletsheizung ³³	1700€
Photovoltaik	375€/kWp
Solaranlage	1000€+50€/m ²

Tabelle A.2 Zusammenfassung der Subventionen

Allgemeine Parameter

Investitionskosten Solaranlage	1274€+242€/m ²
Investitionskosten Photovoltaik Anlage	2000€+246€/m ²
η_{Pellets}	0.8
η_{Stunde}	0.99
η_{Laden}	0.99
η_{Entladen}	0.99
COP	3.8
$\eta_{\text{Fläche}}$	0.92
η_{Neigung}	1.1
η_{TT}	0.95

Tabelle A.3 Allgemeine Parameter

33 Pelletsubvention(Abgerufen 20.2.1015) http://www.oegut.at/downloads/pdf/e_vollkostenvergleich_eb.pdf

Anhang B

Wärme Parameter

	A	B	C	D	Werktagsabhängig
Efh4p					Nein
Efh2p					Nein
MFH					Nein
Geschäft	3,581	-37	7,23	0,0448	Ja
Bäckerei	0,62619	-33	5,72	0,7856	Ja
Schule	2,717	-35,1	7,13	0,1418	Ja

Tabelle A.4 Wärme Parameter für die Signum Funktion

Werktagsparameter

	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag
Bäckerei	1,0848	1,1211	1,0769	1,1353	1,1402	0,4852	0,9565
Geschäft	1,0458	1,0232	1,0252	1,0295	1,0253	0,9675	0,8935
Schule	1,0354	1,0523	1,0449	1,0494	0,9885	0,8860	0,9435

Tabelle A.5 Wochentagsparameter für die Wärmebedarfsbestimmung von Gewerben

Anhang B

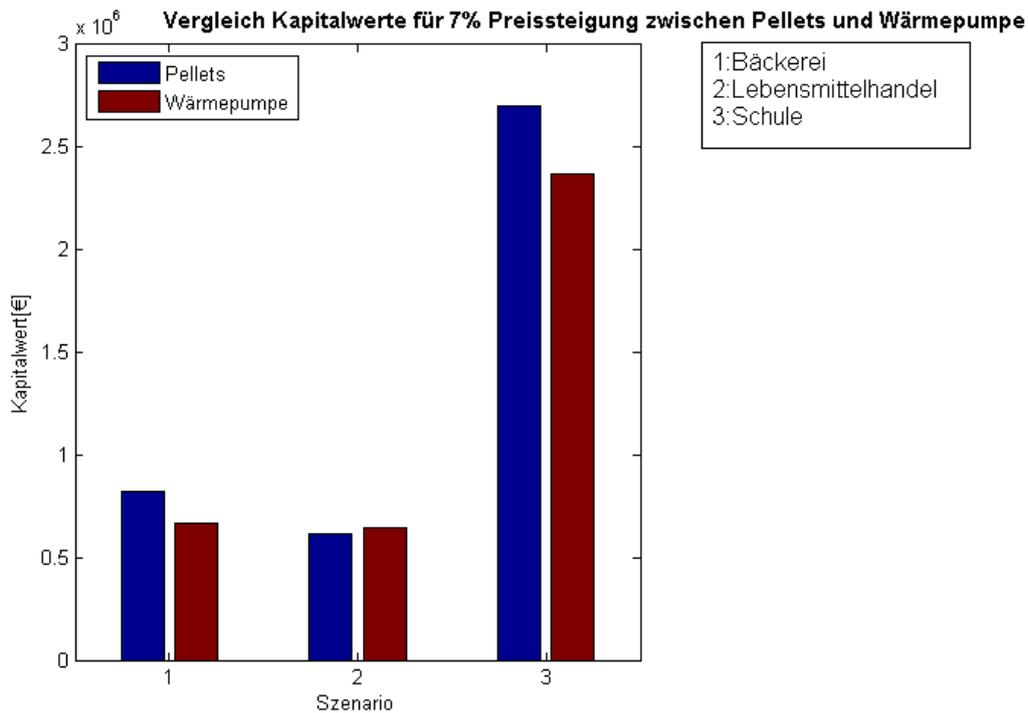


Abbildung B.1 Vergleich zwischen den Heizsystemen über die Kapitalwerte für alle Großverbraucher, für 7 % Preissteigerungsrate

Anhang B

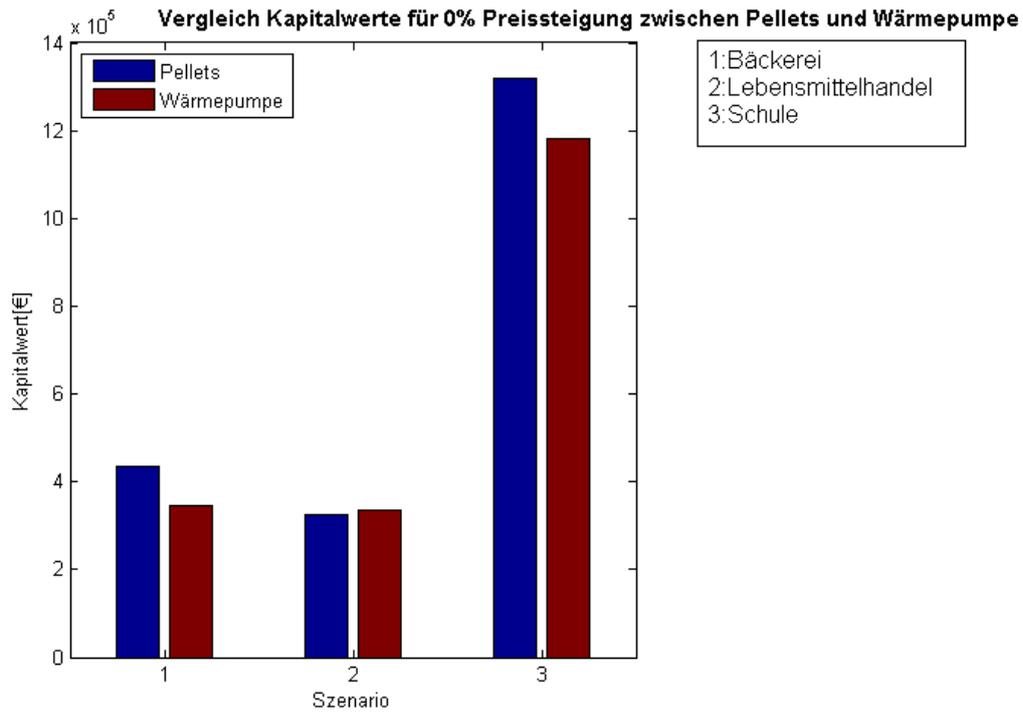


Abbildung B.2 Vergleich zwischen den Heizsystemen über die Kapitalwerte für alle Großverbraucher, für 7 % Preissteigerungsrate

Verzeichnis der Abbildungen

2.1	Darstellung der durchschnittlichen Sonnenscheindauer für Österreich für die Jahre 1971-2000, Quelle: ZAMG.....	4
2.2	Entwicklung der Durchschnittlichen Sonnenscheindauer für Österreich.....	4
2.3	Jährlich installierte thermische Kollektorfläche (m ² und MWth/Jahr) in Österreich in den Jahren 1975 bis 2013 nach Kollektortyp. Quellen: bis 2006: Faninger(2007), ab 2007: AEE.....	5
2.4	Jährlich in Österreich installierte PV-Leistung in kWpeak der Jahre 1992 bis 2013. Quellen: bis 2006: Faninger (2007); ab 2007: Erhebung Technikum Wien.....	6
2.5	Mittelwert und Bandbreite der Moduleinkaufpreise der errichteten Anlagen der Jahre 2010 bis 2013, Werte exkl. MWSt.; Anzahl der Nennungen: 2010: n=28, 2011: n=26, 2012: n=28, 2013: n=32; Quelle: Erhebung Technikum Wien.....	7
3.1	Darstellung des Energiesystems bei Verwendung eines Pelletofen als primäre Heizquelle.....	10
3.2	Darstellung des Energiesystems bei Verwendung einer Wärmepumpe.....	11
3.3	Der Wirkungsgrad des Solarkollektors RKEQ 2005 bei unterschiedlicher Strahlungsintensität	22
3.4	Die Kostenfunktion für eine Solaranlage mit Vergleichspunkten von verfügbaren Angeboten.....	24
3.5	Vergleich der täglichen Strahlungserträge pro m ² zwischen der Solar und der Photovoltaik Anlage bei der Einstrahlung von Fürstenzell in 2005.....	25
3.6	Die Kostenfunktion für eine Photovoltaikanlage mit Vergleichspunkten von verfügbaren Angeboten.....	26
3.7	Das synthetische Wärmeverbrauchsprofil eines Einfamilienhaus über das Jahr 2005 in Fürstenzell.....	28
3.8	Darstellung des Stromverbrauchs über einer Woche für das Standardlastprofil und zwei synthetischen Lastprofilen	29
3.9	Darstellung des Stromverbrauchs über einer Woche für die Standardlastprofil einer Bäckerei, eines Lebensmittelhandel und einer Schule	30
4.1	Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen.....	33
4.2	Bau Opportunität zwischen Photovoltaik und Solaranlage für ein Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen.....	35
4.3	Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen.....	36
4.4	Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Einfamilienhaus 2 Personen mit Pelletofen.....	36
4.5	Bau Opportunität zwischen Photovoltaik und Solaranlage für ein Einfamilienhaus 2 Personen mit Pelletofen.....	37
4.6	Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Einfamilienhaus 2 Personen mit Pelletofen.....	38
4.7	Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen inklusive Subventionen.....	39
4.8	Bau Opportunität zwischen Photovoltaik und Solaranlage für ein Einfamilienhaus mit 4 Personen mit Pelletofen inklusive Subventionen.....	40
4.9	Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen inklusive Subventionen.....	41
4.10	Sensitivitätsanalyse über Strom- und Pelletpreise, Einfamilienhaus 2 Personen mit Pelletofen inklusive Subventionen.....	42
4.11	Bau Opportunität zwischen Photovoltaik und Solaranlage für ein Einfamilienhaus 2 Personen mit Pelletofen inklusive Subventionen.....	42
4.12	Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Einfamilienhaus 2 Personen mit Pelletofen inklusive Subventionen.....	43
4.13	Sensitivitätsanalyse von Zins und Investitionskosten für ein Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen.....	44
4.14	Sensitivitätsanalyse der Bausubstanz eines Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen.....	45
4.15	Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen für H0.....	45
4.16	Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen für H0 Strom Lastprofil.....	46
4.17	Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen für 15 Minuten Auflösung.....	47
4.18	Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Einfamilienhaus 4 Personen mit Pelletofen für 15 Minuten Auflösung.....	48
4.19	Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Mehrfamilienhaus mit Pelletofen.....	49
4.20	Bau Opportunität zwischen Photovoltaik und Solaranlage für ein Mehrfamilienhaus mit Pelletofen.....	50
4.21	Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Mehrfamilienhaus.....	51

Verzeichnis der Abbildungen

4.22	Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Handel mit Pelletofen.....	52
4.23	Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Handel mit Pelletofen.....	53
4.24	Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Bäckerei mit Pelletofen.....	54
4.25	Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Bäckerei mit Pelletofen.....	55
4.26	Sensitivitätsanalyse über Strom und Pelletpreise, Schule mit Pelletofen.....	56
4.27	Einsparung pro Quadratmeter verbauter Fläche, Schule mit Pelletofen.....	57
4.28	Sensitivitätsanalyse über Strom, Einfamilienhaus 4 Personen mit Wärmepumpe.....	58
4.29	Bauopportunität zwischen Photovoltaik- und Solaranlage für ein 4 Personen Einfamilienhaus mit Wärmepumpe.....	59
4.30	Sensitivitätsanalyse über Strom, Einfamilienhaus 2 Personen mit Wärmepumpe.....	60
4.31	Bauopportunität zwischen Photovoltaik- und Solaranlage für ein 2 Personen Einfamilienhaus mit Wärmepumpe.....	60
4.32	Sensitivitätsanalyse über Strom, Einfamilienhaus 4 Personen mit Wärmepumpe inklusive Subventionen.....	61
4.33	Bauopportunität zwischen Photovoltaik- und Solaranlage für ein Einfamilienhaus 4 Personen mit Wärmepumpe inklusive Subventionen.....	62
4.34	Sensitivitätsanalyse über Strom, Einfamilienhaus 2 Personen mit Wärmepumpe inklusive Subventionen.....	63
4.35	Bauopportunität zwischen Photovoltaik- und Solaranlage für ein Einfamilienhaus 2 Personen mit Wärmepumpe inklusive Subventionen.....	63
4.36	Sensitivitätsanalyse von Zins und Investitionskosten für ein Einfamilienhaus 4 Personen mit Wärmepumpe.....	64
4.37	Sensitivitätsanalyse der Bausubstanz eines Einfamilienhaus 4 Personen mit Wärmepumpe.....	65
4.38	Sensitivitätsanalyse über Strom, Mehrfamilienhaus mit Wärmepumpe.....	66
4.39	Bauopportunität zwischen Photovoltaik- und Solaranlage für ein Mehrfamilienhaus mit Wärmepumpe inklusive Subventionen.....	67
4.40	Sensitivitätsanalyse über Strom, Handel mit Wärmepumpe.....	67
4.41	Sensitivitätsanalyse über Strom, Bäckerei mit Wärmepumpe.....	68
4.42	Sensitivitätsanalyse über Strom, Schule mit Wärmepumpe.....	69
5.1	Vergleich der Deckungsgrade bei dem Heizsystem Pelletofen für alle Szenarien, 4% Preissteigerungsrate.....	71
5.2	Vergleich des Deckungsgrades durch PV für das Heizsystem Wärmepumpe für alle Szenarien, 4 % Preissteigerungsrate.....	72
5.3	Vergleich zwischen den Heizsystemen über die Kapitalwerte für alle Klein und Mittelverbraucher, für 0 % Preissteigerungsrate von Strom und Pellets.....	73
5.4	Vergleich zwischen den Heizsystemen über die Kapitalwerte für alle Klein und Mittelverbraucher, für 4 % Preissteigerungsrate von Strom und Pellets.....	74
5.5	Vergleich zwischen den Heizsystemen über die Kapitalwerte für alle Klein und Mittelverbraucher, für 7 % Preissteigerungsrate von Strom und Pellets.....	75
5.6	Vergleich zwischen den Heizsystemen über die Kapitalwerte für alle Großverbraucher, für 2 % Preissteigerungsrate von Strom und Pellets.....	76