



AXIOME BAR

Anwendungsorientierte InfOrMationen für Moderne
hEizsysteme im neuBau für pLANung und betRieb

Untersuchung der Kosten verschiedener Heizsysteme für moderne Einfamilienhäuser in der Region Ulm



Gefördert mit Mitteln der Solarstiftung Ulm/Neu-Ulm



Unterstützt mit Daten des Projekthaus Ulm

Autoren: Dr.-Ing. Holger Ruf
Ingenieurbüro Holger Ruf, Dornstadter Straße 15, 89081 Ulm
ruf@holger-ruf.de

Patrick Kober
Robert-Bosch-Schule Ulm, Egginger Weg 30, 89077 Ulm
patrick.kober@rbs-ulm.de

Version: 1.1

Datum: 03.04.2018

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	I
II	Versionshistorie	II
1	Einleitung	1
2	Datenquellen und Annahmen	3
2.1	Anlagenkosten	3
2.1.1	Photovoltaik Anlage	3
2.1.2	Heizungsanlagen	3
2.2	Energiepreise	5
2.3	CO ₂ -Emissionsfaktoren	6
3	Ergebnisse	7
3.1	Brennstoffkosten	7
3.2	Gestehungskosten	8
3.3	CO ₂ -Emissionen	10
3.4	Sensitivitätsanalyse für Luftwärmepumpen in Kombination mit PV	12
3.5	Einfluss des Stromtarifs auf Luftwärmepumpen	13
4	Zusammenfassung und Ausblick	15
5	Quellenverzeichnis	16

II Versionshistorie

12.08.2016 - 1.0 - Grundversion

03.04.2018 - 1.1 - Ergänzung Fernwärme, Anpassung Verbrauchswerte, Analyse des Einflusses von Stromtarifen

1 Einleitung

Die Energiewende in Deutschland findet auf regionaler Ebene statt. Eine Herausforderung ist dabei der Umgang mit den Überschüssen aus den über 90 MW installierter Photovoltaikleistung im Netzgebiet der Stadtwerke Ulm.

Im Forschungsbereich wird derzeit die verstärkte Nutzung der überschüssigen Energie aus Photovoltaik (PV)-Anlagen für Heizungszwecke und zur Erhöhung des Eigenverbrauchs untersucht [1, 2]. Darüber hinaus werden für die erfolgreiche Transformation, der bisherigen Verteilnetze in aktive intelligente Netze, Lösungsansätze wie die Laststeuerung von Anlagen durch die Verteilnetzbetreiber diskutiert. Dabei bietet die Nutzung von PV-Strom für die Wärme- und Kältegewinnung viele Vorteile für alle Beteiligten:

- Die Bewohner können die Energie der PV besser selbst nutzen und profitieren trotz steigenden Energiekosten und sinkender Einspeisevergütung.
- Die Netzbetreiber, wie die Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH (SWU), haben durch fernwirktechnisch gesteuerte Heizanlagen, eine effektive Option Netzausbaukosten zu vermeiden und die Verbrauchsprofile zu verstetigen, sowie die Chance, neue Dienstleistungsmodelle zu entwickeln.
- Die Städte Ulm und Neu-Ulm, als Betreiber öffentlicher Gebäude, profitieren von den neuen Erkenntnissen, haben die Möglichkeit den Verbrauch ihrer Liegenschaften zu reduzieren und können eine Vorbildrolle für die Bürger einnehmen.
- Die Hoch- und Berufsschulen können die gewonnen Erkenntnisse in der Ausbildung von Ingenieuren und Handwerkern frühzeitig einbinden.

Heutige Technologien bieten wirtschaftliche Möglichkeiten für private Gebäude, sich von den steigenden Energiekosten weitestgehend unabhängig zu machen und aktiv an der Transformation des Energiesystems in Deutschland teilzunehmen. Moderne und durchdachte Gebäude bieten viele Möglichkeiten zur Nutzung von erneuerbaren Energien und zur Optimierung ihres Verbrauchs.

Im Rahmen des *Plusenergie Projekthauses Ulm für nachhaltige Energienutzung* wurde in Zusammenarbeit der Hochschule Ulm, der Robert-Bosch-Schule Ulm und der Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH, in ein neu errichtetes Niedrigenergiehaus Messtechnik und eine Datenaufzeichnung installiert. Durch die Nutzung als Wohnhaus durch eine Familie lassen sich reale Daten hoher Qualität generieren und untersuchen. Die in der Begleitforschung durchgeführten Untersuchungen decken die Bereiche technischer Einfluss und Korrelation mit Umweltbedingungen, Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Wiederverwertbarkeit ab. Durch Publikationen und Tagungsbeiträgen werden diese Daten einer breiten

Öffentlichkeit zugänglich gemacht und können Anreize und Ideen für zukünftige Projekte und Entscheidungen bieten.

Im Rahmen des Projektes *NETCHEK-PV* (NETzverträgliChes HEizen und Kühlen mit PV-Strom) wurde die Nutzung des Stromüberschusses der Photovoltaikanlage zur Wärme- und Kältegewinnung an einem realen Gebäude untersucht. Aus Sicht der Hausbewohner muss dieser Ansatz wirtschaftliche Vorteile gegenüber anderen Heizungstechnologien bieten.

Diese Arbeiten werden im Folgeprojekt *AxIOME BAR* (Anwendungsorientierte InfOrmationen für Moderne hEizsysteme im neuBau für plAnung und betRieb) fortgesetzt. Neben der erweiterten Datengrundlage aufgrund von Messdaten aus drei Jahren vom Projekthaus Ulm, werden auch die Kosten von Fernwärmesystemen sowie der Einfluss unterschiedlicher Stromtarife berücksichtigt.

Dieser Bericht betrachtet die Kosten unterschiedlicher Heizungssysteme für moderne Einfamilienhäuser in der Ulmer Region. Dabei werden explizit lokale Daten für die Lufttemperatur und solaren Erträge und Messdaten des Projekthauses Ulm genutzt, um Aussagen für die Region zu treffen. Dies soll eine Quelle von Unsicherheiten reduzieren. Nichtsdestotrotz werden die ermittelten Ergebnisse ebenfalls mit anderen Publikationen verglichen und überprüft.

In Kapitel 2 werden die Daten und Annahmen für die Heizungssysteme und meteorologischen Parameter beschrieben. Enthalten sind neben den Investitionskosten auch die Brennstoffkosten und die angenommenen Preissteigerungsraten.

Die einzelnen Aspekte der Simulation sind in Kapitel 3 beschrieben. Die Simulation umfasst die Prognose der Entwicklung der Brennstoffkosten für die nächsten 20 Jahre sowie auch die Gesteungskosten unter Berücksichtigung der Investitionen und Betriebskosten verschiedener Heizungsanlagen. Zusätzlich werden die CO₂ Emissionen der einzelnen Anlagen untersucht und bewertet. Für die Lösung, die im *Projekthaus Ulm* installiert ist, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Berücksichtigung des Stromtarifs auf die Gesteungskosten einer Luftwärmepumpe, sind eine weitere Untersuchung.

Kapitel 4 fasst den Bericht zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Schritte und zukünftige Untersuchungen.

2 Datenquellen und Annahmen

Als jährlicher Wärmebedarf werden die Messwerte des *Projekthauses Ulm*¹ herangezogen. Dieser lag in den Jahren 2015 bis 2017 im Mittel bei 14.509 kWh, inklusive der Warmwasseraufbereitung. Der klimabereinigte Mittelwert beträgt 15430 kWh. Dieser Bedarf wird in erster Näherung als konstant über die 20 Jahre angenommen.

Die jährliche Einstrahlung für Ulm ist aus der HelioClim-3v4 Datenbank² ermittelt. Auf einer um 30° nach Süden geneigten Fläche lag sie im Jahr 2014 bei 1.235 kWh/m²a. Aus den Daten von 2005 bis 2014 ergibt sich eine Bandbreite von 1.163 bis 1.339 kWh/m²a. Diese Einstrahlung dient als Grundlage für die PV-Anlage und solarthermische Heizungsunterstützung.

Die Degradationsrate der PV-Anlage wird linear mit 0,5%/a der Nennleistung angenommen [3, 4]. Das bedeutet, dass die Nennleistung nach 20 Jahren auf 90% gesunken ist.

2.1 Anlagenkosten

Alle Preise und Kosten sind ohne die gesetzliche Mehrwertsteuer angegeben.

2.1.1 Photovoltaik Anlage

Die Investitionskosten für die PV-Anlage werden mit 1.684 €/kW [5] und 420 € für das PV-Anlagen Monitoring angenommen. Damit ergibt sich für die 9 kWp PV-Anlage des *Projekthauses Ulm* eine Investitionssumme von 15.576 €. Zu den Betriebskosten werden 60 € für die Anlagenversicherung und 250 € für die Wiederholungsuntersuchung alle vier Jahre angenommen. Weiterhin wird der Austausch der Wechselrichter nach 10 Jahren angenommen, was zu zusätzlichen Ausgaben von 3.544 € führt.

Der mittlere, spezifische Anlagenenertrag lag in den Jahren 2015 bis 2017 bei 1011 kWh/kW.

2.1.2 Heizungsanlagen

Für die Kosten der Heizungssysteme werden nur die reinen Investitionskosten der Heizungsanlage ohne Heizflächen und Leitungssysteme berücksichtigt. Dies führt zu geringeren Gestehungskosten im Vergleich zu [6]. Werden die Kosten für die Heizflächen und Rohre mit berücksichtigt, sind die Ergebnisse vergleichbar. Die Betriebskosten werden ebenfalls nur für die Heizungsanlage betrachtet. Die Kosten dienen als Eingangsparameter der Simulation. Kapitalgebundene Kosten und Kosten für Lüftungssysteme, um einen geforderten Gebäudestandard zu erreichen, werden nicht berücksichtigt.

¹www.projekthaus-ulm.de

²www.soda-pro.com

Luft-Wärmepumpe Die Investitionskosten für die Luft-Wärmepumpe sind anhand des Herstellerlistenpreises ermittelt und betragen 13.445 €. Die Jahresarbeitszahl der Luft-Wärmepumpe wurde ist den Messdaten des *Projekthauses Ulm* abgeleitet und lag 2015 bei 2,6. Dieser niedrige Wert ist dem Prototypenstatus der Wärmepumpe geschuldet und hat sich während der Projektlaufzeit verbessert. Dennoch wurde dieser niedrige Wert als konservative Annahme beibehalten. Im Jahr 2017 lag die Jahresarbeitszahl bei 2,95. Hieraus ergibt sich ein jährlicher Strombedarf von 5.934 kWh um die Wärme für Heizung und Warmwasserbereitung bereitstellen zu können. Hinzu kommen noch jährliche Kosten von 100 € für einen Wartungsvertrag für die Instandhaltung und Wartung der Heizung.

Pelletheizung Die Investitionskosten für die Pelletheizung werden mit 21.350 € angenommen [7]. Der aktuelle Heizkostenvergleich des BDEW geht für eine Pelletheizung in einem Einfamilienhaus mit typischem baulichem Wärmeschutz von 21.513 € (Netto-Investitionskosten ohne kapitalgebundene Kosten) aus [6]. Hinzu kommen noch jährliche Betriebskosten von 337 € für Schornsteinfeger, elektrische Hilfsenergie und einen Wartungsvertrag für die Instandhaltung und Wartung der Heizung.

Gasheizung Die Investitionskosten für die Gasheizung werden mit 16.030 € angenommen [7]. Um die Anforderungen der Energieeinsparverordnung [EnEV, 8] zu erfüllen, ist die Gasheizung mit einer 6 m² solarthermischen Anlage kombiniert. Der aktuelle Heizkostenvergleich des BDEW geht für ein Gasbrennwertgerät mit solarer Heizungsunterstützung von 17.185 € (Netto-Investitionskosten ohne kapitalgebundene Kosten) aus [6]. Hinzu kommen noch jährliche Betriebskosten von 392 € für Grundgebühr des Gasanschlusses, Abgasuntersuchung, Schornsteinfeger, elektrische Hilfsenergie und einen Wartungsvertrag für die Instandhaltung und Wartung der Heizung. Weiterhin werden noch Investitionskosten von 2.457 € für die Errichtung einer Hausanschlussleitung von 21 m angenommen. Die Kosten hierfür wurden den ergänzenden Bedingungen zur Niederdruckanschlussverordnung der SWU entnommen [9]. Einen Baukostenzuschuss³ erhebt die SWU derzeit nicht.

Fernwärme Die Investitionskosten für die Fernwärmeversorgung werden mit 6.856 € angenommen [10]. Der aktuelle Heizkostenvergleich des BDEW geht für eine Fernwärmeheizung in einem Einfamilienhaus mit typischem baulichem Wärmeschutz von 6.722 € (Netto-Investitionskosten ohne kapitalgebundene Kosten) aus [6]. Hinzu kommen noch

³Der Baukostenzuschuss ist ein einmaliges Kostenelement für die Errichtung des Hausanschlusses. Es berücksichtigt die vorzuhaltende Kapazität im Verteilnetz und wird in Abhängigkeit der vorzuhaltenden Leistung vom Kunden erhoben.

Leistungspreis von 303 € als die jährliche Grundgebühr. Weiterhin werden noch Investitionskosten von 9.450 € für die Errichtung einer Hausanschlussleitung von 21 m angenommen [10]. Zusätzlich wird ein Baukostenzuschuss von erhoben. Dieser wird mit 2.812 € angenommen.

Ölheizung Die Investitionskosten für die Ölheizung werden mit 16.900 € angenommen [7]. Um die Anforderungen der EnEV [8] zu erfüllen, ist die Ölheizung mit einer 6 m² solarthermischen Anlage kombiniert. Der aktuelle Heizkostenvergleich des BDEW geht für eine Ölheizung in einem Einfamilienhaus mit typischem baulichem Wärmeschutz von 20.077 € (Netto-Investitionskosten ohne kapitalgebundene Kosten) aus [6]. Hinzu kommen noch jährliche Betriebskosten von 407 € für Abgasuntersuchung, Schornsteinfeger, elektrische Hilfsenergie, annualisierte Kosten der Öltank-Revision, eine Umweltschutz-Haftpflichtversicherung für den Öltank und einen Wartungsvertrag für die Instandhaltung und Wartung der Heizung.

Luft-Wärmepumpe mit anteiligem PV-Strom Die Investitionskosten für die Luft-Wärmepumpe betragen 13.445 €. Die Jahresarbeitszahl der Luft-Wärmepumpe wurde aus den Messdaten des *Projekthauses Ulm* abgeleitet und lag 2015 bei 2,6. Hieraus ergibt sich ein jährlicher Strombedarf von 5.935 kWh um die Energie für Heizung und Warmwasserbereitung bereitstellen zu können. Von dieser Energie werden 40 % zu den Gestehungskosten des Solarstroms der hauseigenen PV-Anlage bezogen. Die Differenzenergiemenge wird aus dem Haushaltsstrom bezogen. Hinzu kommen noch jährliche Kosten von 100 € für einen Wartungsvertrag für die Instandhaltung und Wartung der Heizung.

Luft-Wärmepumpe mit anteiligem PV-Strom in Kombination mit Pelletofen Die vorgenannte Kombination wird nun noch mit einem zusätzlichen Pelletofen für Wohnräume ergänzt und bildet somit das Heizungssystem des *Projekthauses Ulm* ab. Dieser Ofen ist hydraulisch an das Heizungssystem angeschlossen und innerhalb des Wohnraums installiert. Die Investitionskosten betragen 26.029 € und die jährlichen Kosten für Abgasuntersuchung, Schornsteinfeger, elektrische Hilfsenergie, und einen Wartungsvertrag 226 €. Anhand der Messwerte des *Projekthauses Ulm* deckt die Wärmepumpe 76 % des Wärmebedarfs ab, der verbleibende Anteil wird durch den Pelletofen bereitgestellt.

2.2 Energiepreise

Basierend auf der bisherigen Preisentwicklung werden für die Brennstoffe ähnliche jährliche Preissteigerung angenommen [11, 12]. Der Arbeitspreis des elektrischen Stromes des

Tabelle 1: CO₂-Emissionsfaktoren für verschiedene Heizungssysteme [17, 18].

System	Emissionsfaktor
Öl-Brennwertgerät	326 g/kWh
Gas-Brennwertgerät	250 g/kWh
Pelletheizung	29 g/kWh
Vakuum-Solarkollektoren	36 g/kWh
Strom-Mix	623 g/kWh
PV (polykristallin)	63 g/kWh
Fernwärme	73 g/kWh

Versorgungsunternehmens wird mit 0,198 €/kWh angenommen [13]. Die jährliche Preissteigerung wird mit 3,0 % berücksichtigt.

Zusätzlich werden verschiedenen Tarife der SWU⁴ (Stand: Februar 2018) zur Bewertung des Einflusses des Strompreises auf die Kosten einer Luftwärmepumpe herangezogen [14, 13].

Die Gestehungskosten für die elektrische Arbeit der PV-Anlage ergibt sich aus den o.g. Annahmen zu 0,123 €/kWh ausgehend von der Anlagenlebensdauer von 20 Jahren. Dieser Wert liegt im Rahmen der Literatur [15].

Die Kosten für die Fernwärme sind mit 0,064 €/kWh angenommen [16]. Die jährliche Preissteigerung wird mit 3,4 % berücksichtigt [11].

Als Kosten für die Wärmeenergie werden für Erdgas 0,06 €/kWh angenommen. Die jährliche Preissteigerung wird mit 3,1% berücksichtigt [11].

Die Kosten für die Wärmeenergie aus Heizöl sind mit 0,065 €/kWh angenommen. Die jährliche Preissteigerung wird mit 4,8% berücksichtigt [11]. Die aktuellen niedrigen Preise wurden nicht berücksichtigt, da diese als Folge der geopolitischen Situation zwischen den arabischen Staaten, USA und Russland betrachtet werden.

Als Kosten für die Wärmeenergie werden für Pellets 0,053 €/kWh angenommen. Die jährliche Preissteigerung wird mit 3,0% berücksichtigt [12].

2.3 CO₂-Emissionsfaktoren

Zur Bestimmung der CO₂-Emissionen werden die in Tabelle 1 aufgeführten Emissionsfaktoren genutzt [17, 18].

⁴SWU Schabenstrom online, SWU Naturstrom online, SWU Schabenstrom, SWU Naturstrom, SWU Grundversorger, SWU Grundversorger 2-Tarif, SWU Grundversorger Wärmepumpe

3 Ergebnisse

Es werden sieben verschiedene Varianten untersucht. Dazu zählen die reinen Heizsysteme Luft-Wärmepumpe, Pelletheizung, Fernwärme, Gasheizung und Ölheizung sowie die Kombination einer Luft-Wärmepumpe mit PV-Anlage. Dabei werden 40 % des Strombedarfs der Wärmepumpe durch die PV-Anlage gedeckt. Die letzte Variante ist die Kombination der Luft-Wärmepumpe mit PV-Anlage und einem Pelletofen, der an das Heizsystem angeschlossen ist. Diese Kombination ist im *Projekthaus Ulm* installiert. In den Jahren 2015 bis 2017 lag die Wärmeenergie, die durch den Pelletofen bereitgestellt wurde, durchschnittlich bei 26 %. Die verbleibende, benötigte Wärmemenge wird durch die Luft-Wärmepumpe mit anteiligem PV-Strom bereitgestellt.

3.1 Brennstoffkosten

Diese Untersuchung analysiert die Brennstoffkosten der einzelnen Heizungssysteme über den Zeitraum von 20 Jahren. Hierbei werden nur Kosten für die benötigten Brennstoffe (Öl, Gas, elektrischer Strom, Pellets), nicht jedoch für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten, berücksichtigt.

Alle Brennstoffkosten unterliegen den o.a. jährlichen Preissteigerungen. Die Ausnahme hiervon sind die Gestehungskosten der PV-Anlage. Die zur Verfügung stehende Energiemenge unterliegt jedoch jährlichen Schwankungen aufgrund der solaren Einstrahlung und der wetterbedingten Variabilität.

Die Entwicklung der verschiedenen Brennstoffkosten ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Brennstoffkosten der Luft-Wärmepumpe sind zu Beginn des Untersuchungszeitraums die höchsten. Erst gegen Ende des betrachteten Zeitraums werden diese von den Brennstoffkosten der Ölheizung überstiegen. Aufgrund des angenommenen stärkeren Preisanstiegs für Heizöl hat die Ölheizung am Ende der betrachteten 20 Jahre die höchsten Brennstoffkosten. Die Schwankungen im Anstieg entfallen auf die solarthermische Heizungsunterstützung, die wie die PV-Anlage den Schwankungen der solaren Einstrahlung unterliegen. Die Kosten für Fernwärme sind ebenfalls im mittleren Preissegment, steigen jedoch analog wie die Stromkosten an. Am Ende des Betrachtungszeitraums liegen die Kosten an fünfter Position.

Die Variante der Luft-Wärmepumpe mit PV-Unterstützung liegt im Mittelfeld der Brennstoffkosten. In den ersten 6 Jahren sind die Brennstoffkosten noch höher als die für Öl. Dies ändert sich jedoch aufgrund der unterschiedlichen Preisanstiege und der konstanten Kosten des PV-Stroms.

Die Brennstoffkosten der Kombination aus PV-Anlage, Luft-Wärmepumpe und Pelletofen sind aufgrund der höheren Anteile günstigen Pellets niedriger.

Im Sinne der jährlichen Brennstoffkosten sind die Gasheizung und Pelletheizung am günstigsten. Beide verlaufen über mehrere Jahre parallel. Erst in der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums sind die Brennstoffkosten der Gasheizung etwas höher als für die Pelletheizung.

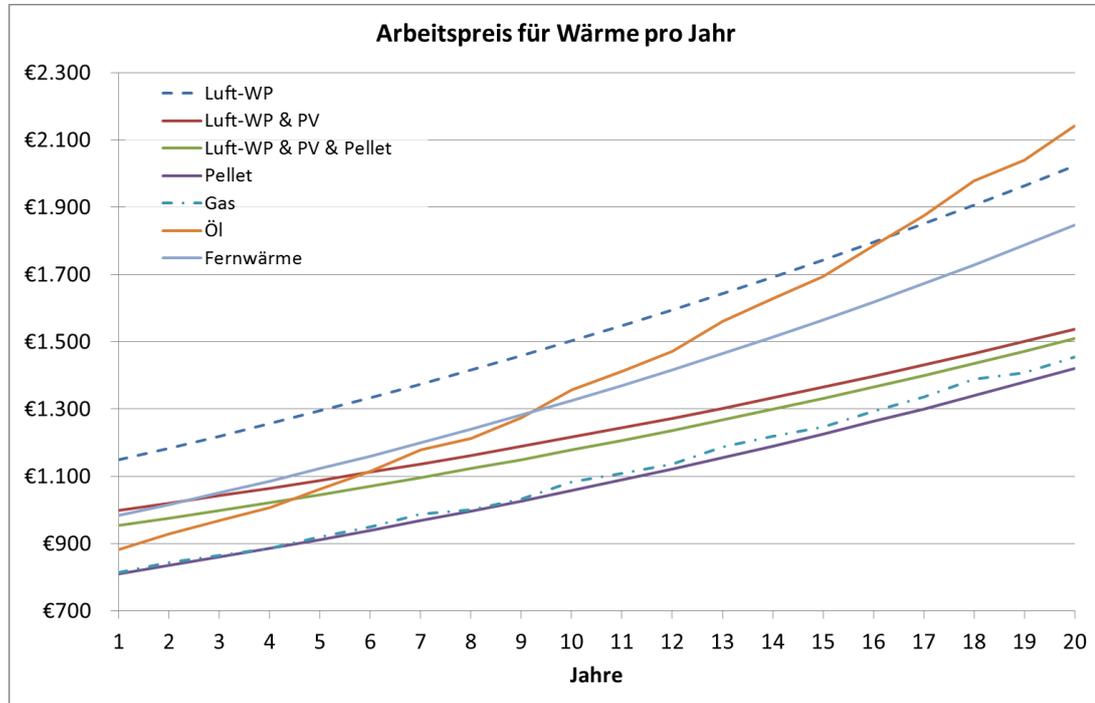


Abbildung 1: Entwicklung der Brennstoffkosten über einen Zeitraum von 20 Jahren für verschiedene Heizungssysteme.

3.2 Gestehungskosten

Die Gestehungskosten beschreiben die durchschnittlichen Kosten für die lokale Bereitstellung einer kWh Wärmeenergie. Sie setzen sich aus dem Verhältnis der durchschnittlichen jährlichen Kosten und der durchschnittlichen jährlichen Wärmeenergie zusammen. Hierbei fließen neben den jährlichen Brennstoffkosten auch die Kosten für die Investition und Wartungs- sowie Instandhaltungsarbeiten in die Berechnung ein.

Die Gestehungskosten mit den o.g. Simulationsparametern und Anteilen (PV-Stromanteil 40%) sind in Abbildung 2 dargestellt. Dabei ist eine Ölheizung mit 0,196 €/kWh die teuerste Heizungsvariante. Diese wird gefolgt von der Kombination aus PV-Anlage, Luft-Wärmepumpe und Pelletofen (0,177 €/kWh) und einer Gas-Heizung (0,177 €/kWh), einer Fernwärmeversorgung (0,171 €/kWh) und einer Pelletheizung (0,162 €/kWh). Die Gestehungskosten einer Luft-Wärmepumpe in reinem Netzstrombetrieb sind 0,151 €/kWh. Die günstigste Erzeugungsart (0,131 €/kWh) ist die Kombination aus Luft-Wärmepumpe mit anteiligem Strom einer PV-Anlage.

Bei einer Versorgung durch Fernwärme ist jedoch zu beachten, dass die Kundenanlagen eine sehr hohe Lebenserwartung besitzen. Die Lebensdauer liegt erfahrungsgemäß im Bereich von 30 bis 40 Jahren oder auch noch darüber. Andere Heizungssysteme müssen nach etwa 15 bis 20 Jahren erneuert werden, was zusätzliche Investitionskosten bedeutet. Diese große Zeitspanne hängt von der Technologie und dem Aufwand für Wartung und Instandhaltung ab. Die Reinvestitionskosten sind in der Simulation über 20 Jahre nicht berücksichtigt.

Bei einer Bewertung über einen längeren Zeitraum sinken daher die spezifischen Gesteungskosten der Fernwärme aufgrund der geringeren Investitionskosten im gesamten Betrachtungszeitraum. Gegen einen längeren Betrachtungszeitraum spricht jedoch die steigende Unsicherheit in der Entwicklung der Energiepreise und Technologien.

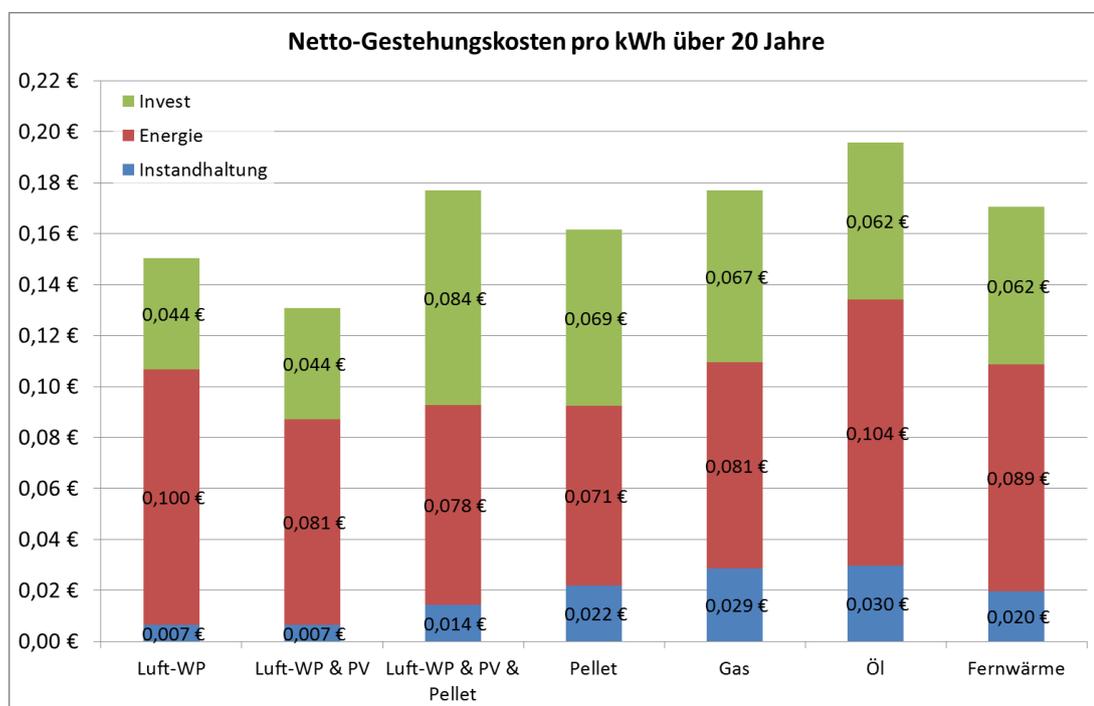


Abbildung 2: Gesteungskosten pro kWh Wärmeenergie für verschiedene Heizungssysteme für einen Zeitraum von 20 Jahren. Es werden die jährlichen Brennstoffkosten sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten berücksichtigt. Es werden 30% des PV-Stroms genutzt.

In Tabelle 2 sind die verschiedenen Gesamtkosten für die zwanzigjährige Simulationszeit berechnet. Der gesamte Wärmeenergiebedarf beträgt 308.613 kWh, ausgehend von einem mittlerem, jährlichen Wärmeenergiebedarf von 15.431 kWh. Es zeigt sich, dass die Kombination aus Luft-Wärmepumpe und PV-Anlage über 20.000 € im Vergleich zu einer Ölheizung einspart. Die Ersparnisse gegenüber den anderen untersuchten Heizungsanlagen liegen im Bereich von 5.772 € bis 13.768 €.

Tabelle 2: Gesamtkosten für Heizungsenergie basierend auf den Gestehungskosten über 20 Jahre kalkuliert. Die gesamte Heizenergiemenge beträgt 303.660 kWh.

Heizungsanlage	Gesamtkosten	Einsparung gegenüber Ölheizung
Ölheizung	60.413 €	– €
Gasheizung	54.640 €	5.772 €
Pelletheizung	49.882 €	10.530 €
Fernwärme	52.631 €	7.781 €
Luft-Wärmepumpe	46.644 €	13.768 €
Luft-Wärmepumpe und PV-Anlage	40.339 €	20.074 €
Luft-Wärmepumpe, PV-Anlage, Pelletofen	54.606 €	5.806 €

In den Gestehungskosten der kombinierten Anlage mit PV-Anlage, Luft-Wärmepumpe und Pelletofen schlagen sich die hohen Investitionskosten und Betriebskosten für zwei vollwertige Heizungssysteme nieder. Nicht kalkulierbar sind jedoch die erhöhte Versorgungssicherheit aufgrund der Redundanz der Heizungsanlage sowie die Auswirkungen auf die persönliche Lebensqualität eines Pelletofens innerhalb des Wohnraums.

3.3 CO₂-Emissionen

Die ökologische Bewertung ist neben den ökonomischen Vergleichen ein weiteres wichtiges Kriterium. Der Schadstoffausstoß von Heizungsanlagen ist in Deutschland durch die 1. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) [19] auf Grundlage des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) [20] geregelt. Die BImSchV regelt, welche Brennstoffe für Heizungen zugelassen sind und bestimmt Grenzwerte für verschiedene Schadstoffe.

Heutzutage wird Kohlenstoffdioxid (CO₂) bzw. das CO₂-Äquivalent als wichtige Vergleichsgröße für unerwünschte Emissionen verwendet. CO₂ entsteht bei unvollständigen Verbrennungsprozessen und gilt als ein signifikantes Element des menschlichen Einflusses auf das Klima (verstärkter "Treibhauseffekt") (weitere Infos unter [21, 22]). Davon abgesehen ist CO₂ in hohen Raumkonzentrationen für den Menschen aufgrund der Sauerstoffverdrängung gesundheitsschädlich.

Die prognostizierten CO₂-Emissionen der verschiedenen Heizungssysteme für 20 Jahre sind in Tabelle 3 und Abbildung 3 wiedergegeben. Zusätzlich sind in Tabelle 3 die CO₂-Emissionen noch mit den Preisen für CO₂-Zertifikate in Kosten umgerechnet. Für die CO₂-Zertifikatspreise werden einerseits der mittlere Preis sowie der maximale Preis aus

dem Zeitraum November 2009 bis Dezember 2017 genutzt [23].

Es zeigt sich, dass die Pellet-Heizung die geringste Menge an CO₂-Emissionen verursacht, gefolgt von der Fernwärme und der Kombination aus Luft-Wärmepumpe in Kombination mit PV-Strom und Pelletofen. Die höchsten CO₂-Emissionen haben die Öl-Heizung und die Wärmepumpe mit nationalem Strommix.

Ein Anrechnen der Kosten für die CO₂-Zertifikate, basierend auf den derzeitigen Preisen, auf die Gestehungskosten würde diese um 0,03 ct/kWh bis 0,5 ct/kWh erhöhen.

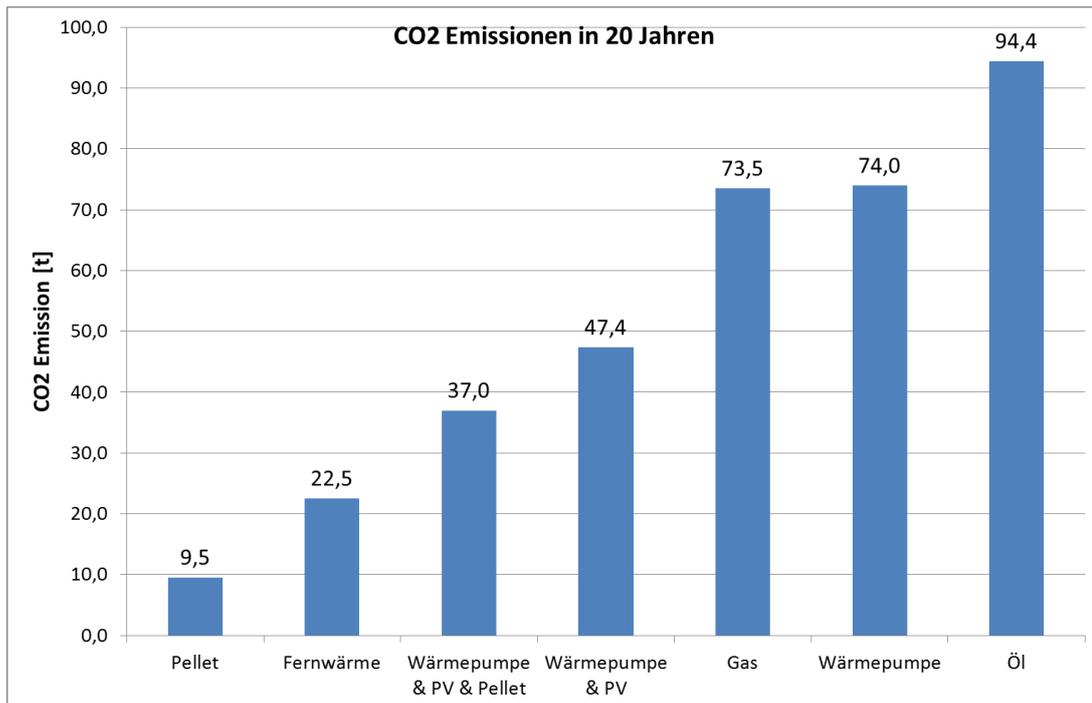


Abbildung 3: Berechnete CO₂ Emissionen für die verschiedenen Heizungssysteme über 20 Jahre.

Tabelle 3: Berechnete CO₂ Emissionen für die verschiedenen Heizungssysteme über 20 Jahre. Kosten der Emissionen basieren auf dem mittleren CO₂-Zertifikatspreis und dem maximalen CO₂-Zertifikatspreis aus dem Zeitraum November 2009 bis April 2016.

	CO ₂ Emis- sionen	Durchschnittliche Kosten	Maximale Kosten
Pellet-Heizung	9,5 t	83 €	166 €
Fernwärme	22,5 t	197 €	392 €
Wärmepumpe-PV-Pellet	37,0 t	323 €	644 €
Wärmepumpe mit anteili- gem PV-Strom	47,4 t	413 €	824 €
Gas-Heizung	73,5 t	642 €	1279 €
Wärmepumpe	74,0 t	646 €	1287 €
Öl-Heizung	94,4 t	824 €	1643 €

3.4 Sensitivitätsanalyse für Luftwärmepumpen in Kombination mit PV

Die Sensitivitätsanalyse untersucht die Empfindlichkeit der Gestehungskosten auf kleine Änderungen der Eingangsparameter. Diese Untersuchung ist für die Kombination aus Luft-Wärmepumpe und PV-Anlage durchgeführt.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Abbildung 4 dargestellt.

Als Eingangsparameter der Simulation zählen der Strompreis des Versorgungsunternehmens, die Gestehungskosten der PV-Anlage, der Anteil des genutzten PV-Stroms am gesamten Strombedarf der Wärmepumpe, die jährliche Teuerungsrate des Stroms, die Jahresarbeitszahl, die Investitionskosten und die jährlichen Instandhaltungskosten. Ausgehend von der o.g. Simulation (100%) wurde jeder einzelne Eingangsparameter um 25% erhöht und gesenkt, während die anderen Eingangsparameter konstant gehalten wurden.

Es zeigt sich, dass der Eingangsparameter mit dem größten Einfluss die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe ist. Eine um 25% höhere Jahresarbeitszahl senkt die Gestehungskosten um 12% während sich eine um 25% niedrigere Jahresarbeitszahl mit einer Erhöhung der Gestehungskosten um 21% auswirkt. Dies zeigt auch den überproportionalen Einfluss der Jahresarbeitszahl auf die Gestehungskosten. Der Eingangsparameter mit dem zweitgrößten Einfluss ist der Arbeitspreis für elektrische Energie. Eine Änderung um 25% wirkt sich proportional mit 13% auf die Gestehungskosten aus. Der drittwichtigste Eingangsparameter sind die Investitionskosten mit einer Änderung der Gestehungskosten von 8% für ein Parameteränderung um 25%. Die jährliche Teuerungsrate des Arbeitspreises verändert

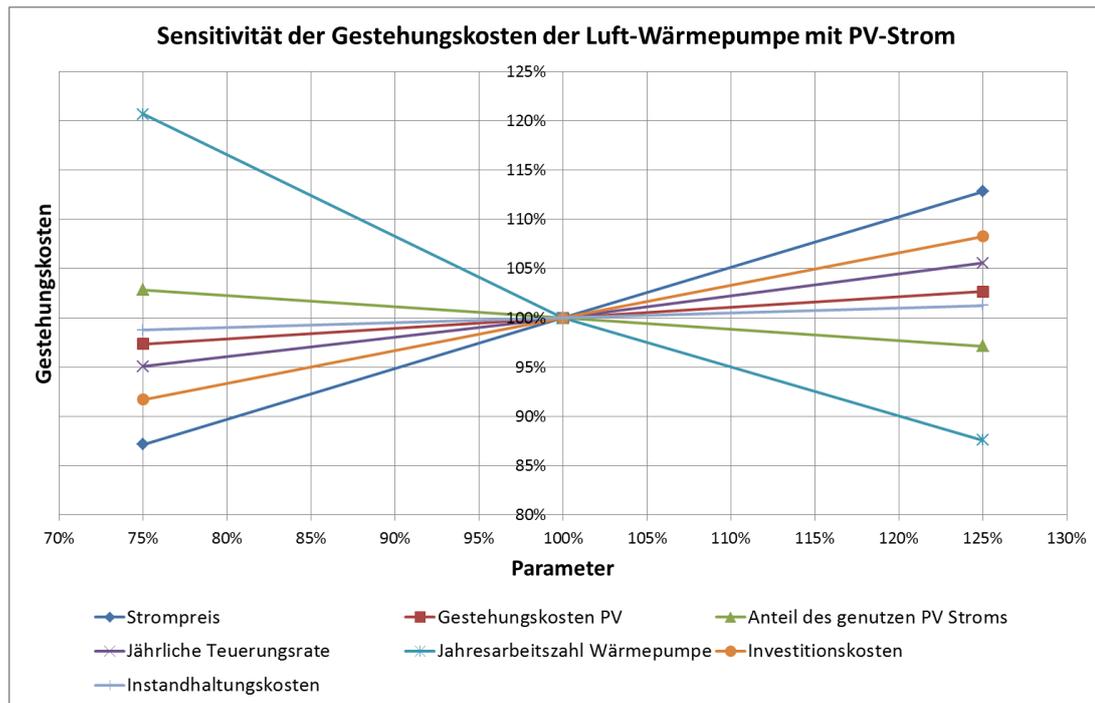


Abbildung 4: Sensitivität der Gesteungskosten pro kWh Wärmeenergie für die Kombination aus Luft-Wärmepumpe und PV-Anlage bei Änderungen der Eingangsparameter um 25%.

die Gesteungskosten um etwa 5% für eine Änderung von 25% des Eingangsparameters. Der Anteil des genutzten PV-Stroms und die Gesteungskosten der PV-Anlage wirken sich nur mit Änderungen von 3% auf die Gesteungskosten der Wärmeenergie aus. Die Instandhaltungskosten wirken sich mit etwa 1% nur minimal auf die Gesteungskosten aus.

3.5 Einfluss des Stromtarifs auf Luftwärmepumpen

Die Sensitivitätsanalyse zeigt einen großen Einfluss der Strompreise auf die Gesteungskosten einer Luftwärmepumpe. Um diese Unterschiede noch mehr zu verdeutlichen, wurden für eine Luftwärmepumpe ohne PV-Unterstützung verschiedene Stromkosten angenommen. Dabei werden die derzeit gültigen (Stand: Februar 2018), verschiedenen Tarife der SWU als Grundlage genutzt. Im Einzelnen handelt es sich um den Schwabenstrom und Naturstrom-Tarife, den Grundversorgertarif sowie den Grundversorgerwärmepumpentarif. Bei Doppeltarifen (d.h. mit Hochtarif (HT) und Niedertarif (NT)) werden die zusätzlichen Kosten für die Bereitstellung der Tarifumschaltung bei moderner Messeinrichtung berücksichtigt.

Abbildung 5 zeigt die Gesteungskosten für die verschiedenen Stromtarife. Bei den Doppeltarifen wurde zusätzlich untersucht, wie sich ein Betrieb der Wärmepumpe ausschließ-

lich im HT-Fenster, NT-Fenster und mittlerer Betrieb auswirkt. Die Veränderung der Arbeitszahl bei ausschließlichem Betrieb im NT-Fenster ist mit etwa 1 % gering und kann daher vernachlässigt werden. Die Gestehungskosten der Luftwärmepumpe mit 40 %-PV-Stromanteil dienen dabei als Referenz.

Es zeigt sich, dass nur die ausschließlichen Betriebsfälle während dem NT-Fenster der Doppeltarife günstiger zum Referenzfall sind. Es ist jedoch zu bedenken das ein ausschließlicher Betrieb im NT-Fenster (Nachts) vorraussichtlich zu höheren Kosten für Wärmespeicher führen wird. Ein Mischbetrieb im Wärmepumpentarif ist in etwa vergleichbar mit der Referenz. Alle anderen betrachteten Fälle sind teurer als die der Referenzfall mit anteiligem PV-Strom. Wie zu erwarten sind die Gestehungskosten im Grundversorgertarif am höchsten.

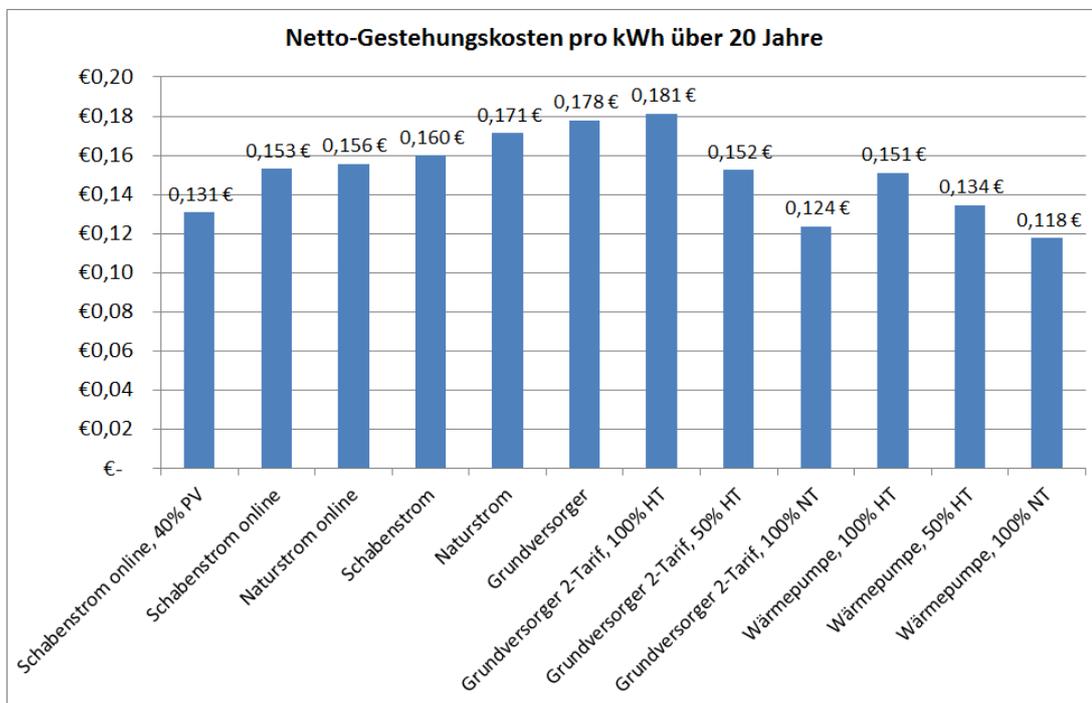


Abbildung 5: Sensitivität der Gestehungskosten pro kWh Wärmeenergie für ein Luft-Wärmepumpe bei Änderungen der Stromtarife.

Die Einsparungen zum teuersten Fall (ausschließlicher Betrieb im HT-Fenster des Grundversorgertarifs) belaufen sich über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren auf maximal 19.600 €. Der Referenzfall ist um 15.600 € günstiger.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kosten von verschiedenen Heizungssystemen für moderne Einfamilienhäuser wurden für einen Zeitraum von 20 Jahren simuliert. Die Ergebnisse der Prognose zeigen die geringsten Gestehungskosten für Luft-Wärmepumpen mit anteiligem Strom aus Photovoltaik-Anlagen. Die höheren jährlichen externen Brennstoffkosten (Strom) werden durch geringere Investitions- und Instandhaltungskosten kompensiert. Bei den angenommenen Kosten und Preisentwicklungen lassen sich mit der Kombination von Luft-Wärmepumpen und Photovoltaik-Anlagen fast 20.000 € gegenüber einer Ölheizung einsparen.

Die Kombination aus Luft-Wärmepumpe, PV-Anlage und einem Pelletofen, wie sie im *Projekthaus Ulm* verbaut ist, verursacht zusätzliche Kosten bietet jedoch auch eine höhere Versorgungssicherheit.

Momentan sind einige Parameter wie z.B. Jahresheizenergiebedarf und Instandhaltungskosten in der Simulationen noch als konstant angenommen. Diese sollen zukünftig auch einer zeitlichen Veränderung und Entwicklung unterliegen. Einige angenommenen Parameter (z.B. Jahresarbeitszahl, Anteil der PV-Nutzung) sind durch Messdaten oder genauere Modelldaten ersetzt worden. Weiterhin wird die Simulation um weitere Heizsysteme wie z.B. Erd-Wärmepumpen ergänzt werden.

Durch die Erfassung der Energiebedarfszeitreihen der Luft-Wärmepumpe mittels Smart Meter im *Projekthaus Ulm*, lassen sich zukünftig auch noch Analysen hinsichtlich zeitvariabler Stromtarife durchführen.

5 Quellenverzeichnis

- [1] Tanja Kneiske, Heike Barth, Diego Hidalgo, and Martin Braun. Photovoltaik-Wärmepumpen-Hybridsysteme. In Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., editor, *VDE Kongress 2012 Smart Grid: Intelligente Energieversorgung der Zukunft, Kongressbeiträge 5. - 6. November 2012, Internationales Congresscenter Stuttgart (ICS)*. VDE VERLAG, 2012.
- [2] Tjarko Tjaden, Johannes Weniger, Joseph Bergner, Felix Schnorr, and Volker Quaschnig. Einfluss des Standorts und des Nutzerverhaltens auf die energetische Bewertung von PV-Speichersystemen. In OTTI, editor, *29. Symposium Photovoltaische Solarenergie. 12. bis 14. März 2014, Kloster Banz, Bad Staffelstein*, 2014.
- [3] Johannes Gutnik, Gerd Heilscher, and Holger Ruf. Langzeitdegradation kristalliner und amorpher Si-Module und Vergleich mit neueren Modulen. In OTTI, editor, *27. Symposium Photovoltaische Solarenergie*. OTTI, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Inst., 2012.
- [4] Ababacar Ndiaye, Abdérafî Charki, Abdessamad Kobi, Cheikh M.F. Kébé, Pape A. Ndiaye, and Vincent Sambou. Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. *Solar Energy*, 96:140–151, 2013.
- [5] Stefan Finke. Photovoltaik-Kosten, 2016. www.photovoltaiksolarstrom.de/photovoltaik-kosten.
- [6] Bettina Mailach and Bert Oschatz. BDEW-Heizkostenvergleich Neubau 2016: Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung im Neubau. Online, 2016.
- [7] Klima Innovativ e.V. Heizkostenvergleich und Investitionskostenvergleich Ölheizung, Gasheizung, Pelletheizung und Wärmepumpen Erdkollektor, Grundwasser sowie Erdkollektor mit Photovoltaikanlage, 2016. <http://www.klima-innovativ.de/pages/kosten.html>.
- [8] Deutscher Bundestag. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden: EnEV, 24.07.2007.
- [9] Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH. Ergänzende Bedingungen Preisblatt: der Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH (Ulm Netze) zur Niederdruckanschlussverordnung (NDAV): Stand 01.04.2017, 2017.
- [10] Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH. Ergänzende Bedingungen Preisblatt: der

- Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH (Ulm Netze) für die Versorgung von Tarifkunden mit Wärme aus dem Fernwärme-Heizwassernetz: Stand 01.04.2017, 2017.
- [11] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Energiepreise und Energiekosten, 2016. www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/energiepreise-energiekosten.html.
- [12] [energiesparen-im-haushalt.de](http://www.energiesparen-im-haushalt.de). Vergleich: Öl-, Gas-, Pelletsheizung, Wärmepumpe: Unsere Kostenanalyse über 21 Jahre, Januar 2016. <http://www.energiesparen-im-haushalt.de/energie/storage/sites/vergleich-oelheizung-gasheizung.html>.
- [13] SWU Energie GmbH. Preisübersicht Strom, 2017.
- [14] SWU Energie GmbH. Allgemeines zur Grund- und Ersatzversorgung Strom, 2017.
- [15] Harry Wirth. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg, 25.12.2015, Deutschland. www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf.
- [16] SWU Energie GmbH. Preisblatt für Fernwärmepreise: Stand: Oktober 2017, 2017.
- [17] Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien. GEMIS - Globales Emissions-Modell integrierter Systeme, 2017.
- [18] Gerd Fleischhammer. Bescheinigung über den spezifischen CO₂-Emissionsfaktor der Fernwärme nach FW309-6.
- [19] Deutscher Bundestag. Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes: 1. BImSchV, 26.01.2010.
- [20] Deutscher Bundestag. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge: BImSchG, 15.03.1974.
- [21] Guy Brasseur, Daniela Jacob, and Susanne Schuck-Zöller, editors. *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer Verlag, 1 edition, 2016.
- [22] Holger Ruf and Patrick Kober. Klimadatenanalyse: AxIOME BAR: Anwendungsorientierte Informationen für Moderne.
- [23] www.finanzen.net. CO₂ Emissionsrechte: CO₂ Emissionsrechte Chart in Euro, 2016. <http://www.finanzen.net/rohstoffe/co2-emissionsrechte>.