



**AxIOME BAR**  
**Anwendungsorientierte InfOrMationen für Moderne**  
**hEizsysteme im neuBau für pLANung und betRieb**

# Abschlussbericht



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:** 1.01

**Datum:** 07.06.2019

# I Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>II</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Datengrundlage</b>	<b>5</b>
2.1	Projekthaus Ulm . . . . .	5
2.1.1	Energiebedarf . . . . .	6
2.1.2	Luftwärmepumpe . . . . .	7
2.1.3	Photovoltaik-Anlage . . . . .	8
2.2	Klimadaten . . . . .	8
2.2.1	Lufttemperatur Ulm . . . . .	8
2.2.2	Klimaprojektionen . . . . .	8
2.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung . . . . .	9
2.3.1	Datenquellen und Annahmen . . . . .	9
2.3.2	Photovoltaik-Anlage . . . . .	9
2.3.3	Heizungsanlagen . . . . .	10
2.3.4	Energiepreise . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Vergleich verschiedener Luftwärmepumpentechnologien</b>	<b>12</b>
3.1	Datenerfassung . . . . .	12
3.2	Ergebnisse . . . . .	13
3.3	Zusammenfassung . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Holzfeuerung im Wohnraum moderner Gebäude</b>	<b>20</b>
4.1	Datenerfassung . . . . .	20
4.2	Ergebnisse . . . . .	21
4.3	Zusammenfassung . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Analyse der Wohnraumlüftungen und Auswirkung auf die Behaglichkeit</b>	<b>27</b>
5.1	Datenerfassung . . . . .	27
5.2	Ergebnisse . . . . .	29
5.3	Zusammenfassung . . . . .	32
<b>6</b>	<b>Simulation von PV-Anlage und Luftwärmepumpe im Bestand</b>	<b>32</b>
6.1	Kommunales Gebäude . . . . .	33
6.1.1	Beschreibung des Gebäudes . . . . .	33
6.1.2	Datengrundlage . . . . .	33
6.1.3	Simulation . . . . .	34
6.1.4	Ergebnisse . . . . .	34
6.1.5	Zusammenfassung . . . . .	35
6.2	Doppelhaushälfte . . . . .	36
6.2.1	Beschreibung des Gebäudes . . . . .	36
6.2.2	Simulation . . . . .	36

6.2.3	Wirtschaftlichkeit . . . . .	37
6.2.4	Ergebnisse . . . . .	39
6.2.5	Zusammenfassung . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verschiedener Heizungssysteme</b>	<b>45</b>
7.1	Energiekosten . . . . .	45
7.2	Gestehungskosten . . . . .	46
7.3	Sensitivitätsanalyse für Luftwärmepumpen in Kombination mit Photovoltaik	47
7.4	Einfluss des Stromtarifs auf Luftwärmepumpen . . . . .	49
7.5	Umweltkosten . . . . .	50
7.6	Zusammenfassung . . . . .	52
<b>8</b>	<b>Auswirkungen des Klimawandels</b>	<b>53</b>
8.1	Lufttemperatur . . . . .	53
8.2	Wärmebedarf . . . . .	54
8.3	Wärmepumpen Strombedarf . . . . .	57
8.4	Zusammenfassung . . . . .	60
<b>9</b>	<b>Ergebnisveröffentlichungen</b>	<b>63</b>
9.1	Auszeichnung . . . . .	63
9.2	Homepage . . . . .	63
9.3	Veröffentlichungen für die Bürger . . . . .	65
9.4	Einbindung in die Lehre . . . . .	69
9.5	Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Fachpublikationen . . . . .	70
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>71</b>
<b>11</b>	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>77</b>
	<b>Anhang</b>	<b>I</b>
	<b>A Sankey-Diagramme Projekthaus Ulm</b>	<b>I</b>
	<b>B Ergebnisinfos</b>	<b>VII</b>

## II Abkürzungsverzeichnis

<b>AxIOME BAR</b>	Anwendungsorientierte InfOrmationen für Moderne hEizsysteme im neuBau für plAnung und betRieb
<b>AZ</b>	Arbeitszahl
<b>CDC</b>	Climate Data Center
<b>COP</b>	Coefficient of Performance, Leistungszahl
<b>DWD</b>	Deutsche Wetterdienst
<b>HSU</b>	Hochschule Ulm
<b>INES</b>	Institut für Energiesystemtechnik
<b>ISE</b>	Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme
<b>iMSys</b>	Intelligentes Messsystem, ugs. Smart Meter
<b>JAZ</b>	Jahresarbeitszahl
<b>NETCHEK-PV</b>	NETzverträgliChes HEizen und Kühlen mit PV-Strom
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>RBS</b>	Robert-Bosch-Schule Ulm
<b>RCP</b>	Representative Concentration Pathways
<b>SRES</b>	Special Report on Emissions Scenarios
<b>SWU</b>	Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH
<b>TUM</b>	Technische Universität München
<b>WMO</b>	World Meteorological Organization

# 1 Einleitung

Die Transformation des deutschen Energiesystems ist im vollen Gange und die Beschlüsse von Paris zeigen auch den mehrheitlichen, internationalen Willen für eine Begrenzung des Klimawandels [1]. Die Energiewende in Deutschland findet vor allem auf regionaler Ebene sowie mit und für die Bürger statt. Die Städte Ulm und Neu-Ulm, sowie deren Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm, arbeiten aktiv an der Integration von Erneuerbaren Energien. Eine Herausforderung ist dabei der Umgang mit den Überschüssen aus über 100 MW installierter Photovoltaik (PV) im Netzgebiet der Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH (SWU) und der Deckung des Wärmebedarfs aus nichtfossilen Quellen. Insbesondere muss darauf geachtet werden, wie die PV-Anlagenbetreiber nach Ablauf der zwanzigjährigen EEG-Förderung mit ihren funktionierenden PV-Anlagen reagieren. Im Jahr 2021 wird für das erste Megawatt PV-Leistung in Ulm die Förderung auslaufen.

Die Autoren erwarten, dass die reinen Einspeiseanlagen zu Eigenverbrauchsanlagen umgebaut werden, da der Eigenverbrauch wirtschaftlicher als das Einspeisen und ein Verkauf an der Strombörse ist. Beim Eigenverbrauch kommt der Wärmepumpentechnologie eine besondere Rolle zu, da sie wirkungsvoll den selbsterzeugten Strom in Wärme wandeln kann und somit den Eigenverbrauch erhöht. Gleichzeitig wird weniger Strom aus dem öffentlichen Netz benötigt. Häufig kommen hierfür Luftwärmepumpen zum Einsatz, da sie günstig in der Anschaffung und im Flächenverbrauch sind. Bei den neu errichteten Wohngebäuden in Baden-Württemberg lag der Anteil von Wärmepumpen an den Heizungssystemen im Jahr 2017 bei über 54%, wobei nur etwa 7% geothermische Wärmepumpen waren [2]. Der Rest entfiel auf Luftwärmepumpen. Im Jahr 2018 lag der Anteil von Wärmepumpen bei 47,2% an den Heizungssystemen bei neu errichteten Wohngebäude in Deutschland [3].

Eine intelligente Kombination der Photovoltaik-Anlage mit der Wärmepumpe kann sowohl für den Hausbewohner wie auch für die Stadtwerke als Netzbetreiber Vorteile bieten und sollte aufeinander abgestimmt sein. Der Bivalenzbetrieb, d.h. die Nutzung eines weiteren Heizungssystems, z.B. Pelletheizungen, für die sehr kalten Zeiten, in denen eine Luftwärmepumpe ineffizient arbeitet, kann zusätzliche Versorgungssicherheit und Komfort bieten. Aktuelle Neubauten besitzen andere thermische Verbrauchscharakteristika aufgrund des hohen Dämmstandards. Dies muss in der Planung und im optimierten Betrieb berücksichtigt werden.

Um eine solche optimierte Betriebsweise zu nutzen, müssen die einzelnen Systeme miteinander kommunizieren. Moderne Gebäude vereinen neue Kommunikations- und Steuerungsmethoden mit klassischen Systemen wie Photovoltaik-Anlagen, Wärmepumpen, kontrollierte Wohnraumlüftung und aber auch Holzöfen. Die Ausprägungen und Kombinationen dieser Systeme sind nur durch die Komfortwünsche und wirtschaftlichen Möglichkei-

ten der Bauherren limitiert. Um übertriebene Erwartungen zu vermeiden sowie offen die Vor- und Nachteile einschätzen zu können, bedarf es jedoch unabhängiger Informationen.

Ziel des Projektes Anwendungsorientierte InfOrMationen für Moderne hEizsysteme im neuBau für pLAnung und betRieb (AxIOME BAR) ist es, objektive und unabhängige Informationen über den Betrieb von Heizungssystemen in modernen Wohngebäuden (z.B. Kombination von Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen und Smart-Home-Technologien) für verschiedene Zielgruppen und deren Fragestellungen aufzubereiten und zur freien Verfügung zu stellen. Hierbei werden die aktuellsten technischen Entwicklungen und Forschungstendenzen ebenso berücksichtigt wie die alltäglichen Herausforderungen in Einbau und Betrieb sowie die möglichen, lokalen Änderungen als Folge des Klimawandels. Diese letztgenannte Analyse kann nur auf lokaler Ebene realisiert werden, da sich der Klimawandel unterschiedlich auf die Regionen in Deutschland auswirkt [4, 5]. Das erarbeitete Fachwissen versorgt nicht nur die Bürger in Ulm/Neu-Ulm mit Informationen, sondern bietet auch der Industrie sowie dem Forschungs- und Entwicklungsstandort Ulm/Neu-Ulm, Chancen für wirtschaftliche Weiterentwicklungen in den Themenbereichen der Heizungsindustrie und Digitalisierung. Die berücksichtigten Zielgruppen sind:

- Bauherren,
- breite Öffentlichkeit,
- Energieberater,
- Handwerker,
- Schüler und Studenten.

Als Grundlage der Datenerhebung dient das „Plusenergie Projekthaus Ulm für nachhaltige Energienutzung“, ein seit Anfang 2014 bewohnter Einfamilienhausneubau, dessen thermische und elektrische Verbräuche hochaufgelöst gemessen werden. Die Messdaten dieses Gebäudes waren die Eingangsgröße für das vorangegangene Förderprojekt NETzverträgliChes HEizen und Kühlen mit PV-Strom (NETCHEK-PV), gefördert aus Mitteln der Solarstiftung Ulm/Neu-Ulm. Hierbei wurden das Heizungssystem und die Verbräuche detailliert analysiert. Die Ergebnisse waren u.a.

- der wirtschaftliche Vorteil vom elektrischen Heizsystem mit anteiligem PV-Strom,
- die Untersuchung und der Vergleich von Maßnahmen und Technologien für die Eigenverbrauchsoptimierung,
- die Analyse der Möglichkeiten zur Gebäudekühlung, insbesondere für Bestandsgebäude,

- die Veröffentlichung der Ergebnisse in Fachkreisen und breiter Öffentlichkeit.

Während der Projektlaufzeit von AxIOME BAR vom 01.07.2017 bis 31.03.2018 wurde, ausgehend von den Vorarbeiten und bisherigen Ergebnissen, die Aufgabenstellung in mehreren Arbeitspaketen bearbeitet. Das zentrale Element des Projektes sind die Experimente an einem realen Gebäude im Vergleich zu benachbarten Anlagen und Simulationen in der und für die Region Ulm/Neu-Ulm. Hieraus lassen sich die notwendigen Daten und Ergebnisse für die verschiedenen, zielgruppenorientierten Informationen ermitteln.

Im Rahmen von Arbeitspaket 1 wurden schon vorliegende Messdaten ausgewertet und spezielle Experimente zur Beantwortung der unterschiedlichen Fragestellungen durchgeführt. Die Experimente umfassten:

- Erfahrungsvergleich verschiedener Luftwärmepumpentechnologien an einem realen Standort. Analyse der Kennzahlen und Ursachenbestimmung bei signifikanten Unterschieden (Kapitel 3).
- Holzfeuerung im Wohnraum und dessen Wärmeverteilung in modernen Gebäuden. Bei Holzfeuerung im Wohnraum ohne Heizungsanschluss kann es schnell zu sehr hohen Raumtemperaturen und schlechter Verteilung im Gebäude kommen. Ein experimenteller Vergleich von Systemen mit und ohne Heizkreisanschluss im realen Gebäude liefert wichtige Hinweise für die Beratung von Bauherren und Architekten (Kapitel 4).
- Wirksamkeit von kontrollierter Wohnraumlüftung und Auswirkung auf die Behaglichkeit. Es werden neben der Raumlüftung noch verschiedene Lüftungsstrategien für Nutzer und Methoden zur Raumbehaglichkeit experimentell untersucht sowie messtechnisch und mit Bewohnerinterviews ermittelt (Kapitel 5).
- Simulation und weiterführende Analysen aus der Heizungskombination mit Luftwärmepumpe und PV-Anlage in Bestandsgebäuden (Kapitel 6 und 7).
- Analyse des Projekthauses unter Berücksichtigung der Klimaentwicklung. Hieraus lassen sich mögliche Änderungen von Verbrauchsmengen und Mustern für die Bewohner, Bauherren und Stadtwerke für die Planung und den Betrieb von Anlagen und Infrastruktur ermitteln (Kapitel 8).

Die Ergebnisse der Experimente wurden in Arbeitspaket 2 durch die Projektteilnehmer analysiert, aufbereitet und für die Informationsunterlagen visualisiert. Diese Ergebnisse wurden zielgruppenspezifisch in Arbeitspaket 3 zu Informations- und Schulungsunterlagen zusammengefasst. Fokus lag hierbei auf Informationsunterlagen für Bauherren und Bürger zum Herunterladen und Ausdrucken sowie Schulungsunterlagen für Facharbei-

terlehrlinge, Technikerschüler, Studenten und Fachkräftefortbildung. Im Arbeitspaket 4 wurden die Ergebnisse und Erkenntnisse in unterschiedlichen Workshops, Informations- und Bildungsveranstaltungen veröffentlicht. Eine Auflistung der Veröffentlichungen ist in Kapitel 9 aufgeführt.

## 2 Datengrundlage

### 2.1 Projekthaus Ulm

Das *Projekthaus Ulm*, ein seit Anfang 2014 bewohnter Einfamilienhausneubau, bietet die Chance, hochaufgelöste Verbrauchsdaten im Strom- und Wärmebereich für die verschiedenen Zwecke zu erheben. Die Technische Universität München (TUM) und SWU unterstützten die Ausstattung dieses Niedrigenergiehaus mit Messtechnik und Datenaufzeichnungsequipment. Der Einbau und die Inbetriebnahme erfolgten im Jahr 2014 ehrenamtlich durch Mitarbeiter der Hochschule Ulm (HSU) und Robert-Bosch-Schule Ulm (RBS).

Die Gebäudetechnik umfasst eine 9 kW PV-Anlage, einen 4 kWh Batteriespeicher, eine Luftwärmepumpe mit Direktkondensation, eine Pellet-Heizung und eine kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärme- und Feuchterückgewinnung. Aufgrund der Nutzung des Wohnhauses durch eine vierköpfige Familie lassen sich reale Daten hoher Qualität generieren und untersuchen. Für das Projekt AxIOME BAR wird diese Infrastruktur zur Verfügung gestellt (Abbildung 1).

Die PV-Anlage als lokaler Erzeuger und das Heizungssystem (Luftwärmepumpe, Pelletofen und elektrischer Heizstab) als steuerbarer Verbraucher sind an ein übergeordnetes Energiemanagementsystem angeschlossen. Dieses Energiemanagementsystem sorgt für eine zentrale Steuerung und Optimierung der Betriebsweise nach den Wünschen der Bewohner.

Ein Hauptfokus des *Projekthaus Ulm* liegt in der Kombination aus PV-Anlage und Luftwärmepumpe zur Deckung des jährlichen Wärmebedarfs. Im vorangegangenen Projekt NETCHEK-PV zeigt sich, dass sich das Optimierungsziel eines möglichst hohen Eigenverbrauchs des Solarstroms für die Luftwärmepumpe nachteilig auf deren Arbeitszahl (AZ) auswirkt. Die Gründe hierfür liegen einerseits in den hier einfließenden Energiebedarf der Steuerung und Pumpen bei gleichzeitig geringem Wärmebedarf im Sommer und andererseits in der ineffizienteren Betriebsweise bei der Einmal-Ladung des Wärmespeichers [6]. Das Ziel der Einmal-Ladung ist, eine möglichst hohe Energiemenge als Wärme zu speichern, solange ausreichend Energie von der PV-Anlage bereitgestellt wird. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es einer Steuerung der Luftwärmepumpe durch die PV-Anlage. Das notwendige Energiemanagementsystem wurde mittels Hausautomation realisiert. Diese Lösung stellt die größte Flexibilität für die Ansteuerung bereit und kann ebenfalls Prämissen durch andere Systeme (z.B. Batteriespeicher) berücksichtigen.

Im *Projekthaus Ulm* steht der Pelletofen als weiterer Wärmeerzeuger zur Verfügung. Die Steuerung des Pelletofens und der Luftwärmepumpe erfolgt als sog. bivalenter, alternativer Betrieb. Bivalent bedeutet, dass mit dem Pelletofen ein zweiter Wärmeerzeuger

mit anderer Wärmequelle (hier: Pellets) zur Verfügung steht. Oberhalb einer festgelegten Abschalttemperatur erfolgt die Wärmebereitstellung ausschließlich über die Luftwärmepumpe. Unterhalb der Abschalttemperatur wird der Pelletofen betrieben, der die gesamte Heizwärme bereitstellt. Das bedeutet, an kalten Tagen wird die Luftwärmepumpe nicht betrieben.

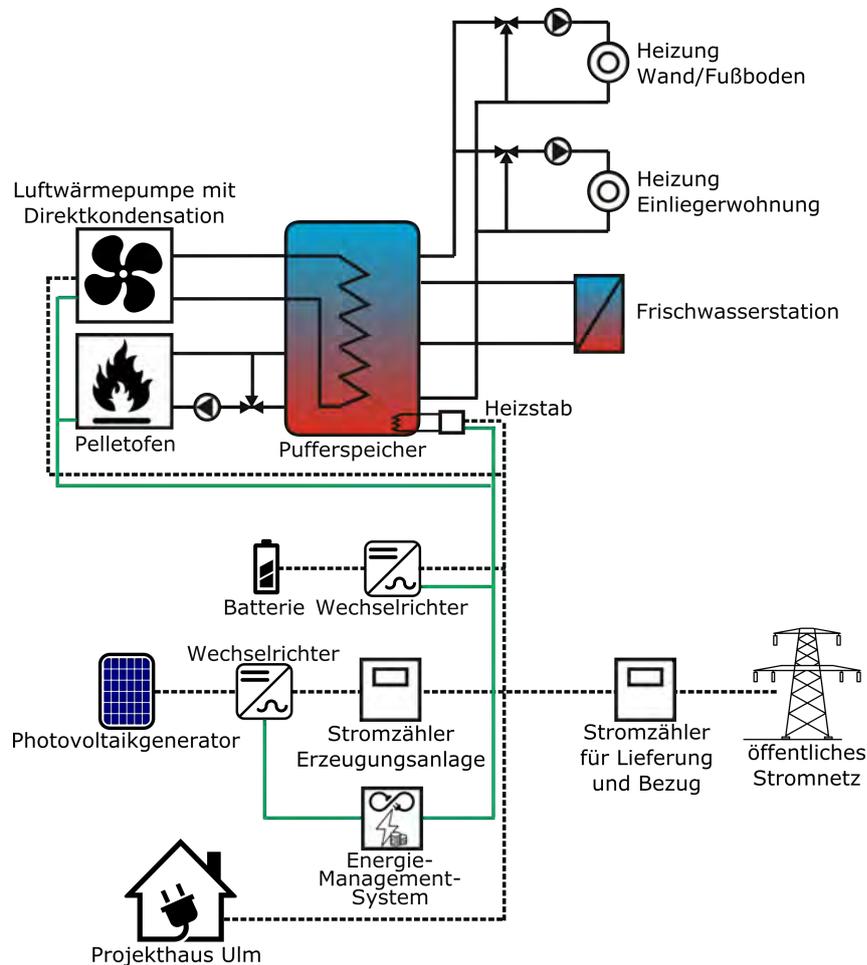


Abbildung 1: Schematische Darstellung der installierten Technologien im Projekthaus Ulm. Die schwarzen Linien stellen die Verbindungen der Energiesysteme dar (Wärme als durchgezogene Linie und elektrischer Strom als gestrichelte Linie). Die grüne Linie sind die Kommunikationsverbindungen der einzelnen Geräte zum Energiemanagementsystem.

### 2.1.1 Energiebedarf

Der gesamte Strombedarf des Projekthauses, inklusive der Energie für die Luftwärmepumpe, lag im Jahr 2016 bei etwa 9.300 kWh. Davon entfielen etwa 2.900 kWh auf die Luftwärmepumpe. Der Jahreswärmebedarf lag 2016 bei etwa 13.600 kWh.

Zur besseren Beschreibung und für Vergleiche des Gebäudes werden zusätzliche Kennzahlen genutzt. Die Eigenverbrauchsquote ist definiert als die Summe der direkt verbrauchten

elektrischen Arbeit und der elektrischen Arbeit, die in den Batteriespeicher gespeichert wird, bezogen auf die elektrische Arbeit, welche von der PV-Anlage bereitgestellt wird. Der Autarkiegrad ist definiert als die Summe der direkt verbrauchten elektrischen Arbeit und der elektrischen Arbeit aus der Entladung des Batteriespeichers, bezogen auf die gesamte, benötigte elektrische Arbeit.

Durch das Energiemanagementsystem und die installierten Speichertechnologien liegt die Eigenverbrauchsquote bei etwa 50,3% und das *Projekthaus Ulm* hat einen Autarkiegrad von etwa 48,4%. Dies sind mit der Literatur vergleichbare Werte [7].

### 2.1.2 Luftwärmepumpe

Der Haupterzeuger des Heizungssystems ist eine Luftwärmepumpe mit Direktkondensation im Wärmespeicher und Frischwassersystem. Hauptvorteil sind die energiesparende Direktkondensation, da kein weiterer Wärmetauscher und keine zusätzliche Pumpe zwischen Luftwärmepumpe und Speicher mehr benötigt werden, sowie der reduzierte Raumbedarf des Speichers. Ergänzt wird das Heizsystem noch durch einen Pelletofen, da der Wirkungsgrad der Luftwärmepumpe stark von der Außenlufttemperatur abhängt. Hierdurch kann die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems in Bezug auf die jährlichen Betriebskosten im Betrieb verbessert werden und bietet einen erhöhten Wohnkomfort durch die Feuerstelle im Wohnraum sowie eine erhöhte Versorgungssicherheit durch den redundanten Wärmeerzeuger. Das Heizsystem erzeugt die Raumwärme und eine direkt angeschlossene Frischwasserstation das benötigte Warmwasser.

Als Kennzahl für die Untersuchungen eignet sich die AZ der Luftwärmepumpe. Allgemein bezeichnet die AZ das Verhältnis der erzeugten Energie in Form von Heizarbeit und der eingesetzten elektrischen Arbeit (beides in kWh) über einen definierten Zeitraum wie z.B. ein Jahr. Diese Kennzahl wird als Jahresarbeitszahl (JAZ) bezeichnet.

Die AZ ist nicht zu verwechseln mit der Leistungszahl (Coefficient of Performance, Leistungszahl (COP)), welche nur einen Momentanwert darstellt. Beide Kennzahlen sind abhängig von dem Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Heizsystem. Eine hohe Temperatur der Wärmequelle und eine niedrige Vorlauftemperatur steigert die AZ. Daher sind z.B. Erdwärmepumpen effizienter, da die Erdtemperatur nicht so tief fällt. Weitere Einflussgrößen sind die Abstimmung der Heizsystemkomponenten aufeinander, der Anteil der Warmwasserbereitung sowie auch das Nutzerverhalten.

Die Messtechnik im Projekthaus Ulm, die für die Berechnung der AZ genutzt wird, berücksichtigt den Verdichter, die Steuerung der Luftwärmepumpe, den Ventilator, die elektrische Zusatzheizung (Heizstab) und die Ladepumpen. Die JAZ lag 2016 bei 2,7 und entspricht dadurch der mittleren JAZ für Luftwärmepumpen in der Literatur [8].

### 2.1.3 Photovoltaik-Anlage

Die Nennleistung der PV-Anlage im *Projekthaus Ulm* beträgt 9 kW und dient zur Deckung des eigentlichen Stromverbrauchs des Hauses sowie auch für Raumheizung und Warmwasserbereitung mit Hilfe der Luftwärmepumpe<sup>1</sup>. Darüber hinaus wird der Batteriespeicher ebenfalls durch die PV-Anlage geladen. Überschüsse, die nicht lokal gespeichert oder genutzt werden, werden über den Hausanschluss in das öffentliche Netz eingespeist.

Die PV-Anlage ist mit einer Ausrichtung von 195° um 15° nach Westen gedreht und hat eine Neigung von nur 15°. Trotz dieser nicht optimalen Ausrichtung lag der mittlere Jahresertrag aus den Jahren 2015 und 2016 bei 9.180 kWh. Das entspricht einem spezifischen Ertrag von 1.020 kWh/kW. Die optimale, d.h. jahresertragsmaximierte, Anlagenausrichtung liegt bei 180° und einer Neigung von 33°.

## 2.2 Klimadaten

In dieser Sektion werden die meteorologischen Daten aus den Messkampagnen und Klimaprojektionen kurz beschrieben. Weitere Informationen, insbesondere zu den Hintergründen und Entwicklungen im Bereich der Klimamodellierung, sind in [5] zu finden.

### 2.2.1 Lufttemperatur Ulm

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) betreibt seit Jahrzehnten eine hauptamtliche Wetterstation seines Messnetzes in Ulm-Mähringen. Diese Station ist nach den internationalen Richtlinien der World Meteorological Organization (WMO) errichtet und misst verschiedene meteorologische Daten (z.B. Lufttemperatur und -feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit) entsprechend den hohen Qualitätsstandards [9]. Seit dem Juli 2014 stehen eine Vielzahl der gemessenen historischen und aktuellen Daten im Climate Data Center (CDC) kostenfrei zur Verfügung [10]<sup>2</sup>.

Die historische Temperaturentwicklung für die Region Ulm/Neu-Ulm ist anhand der Messungen an der Wetterstation Ulm ermittelt. Für den Vergleich der klimatologischen Veränderung werden die Jahre 1961 bis 1990 als Referenzzeitraum definiert. Darüber hinaus werden die Trends aus dem Zeitraum 1961 bis 2015 als Vergleiche für die Klimaentwicklung herangezogen.

### 2.2.2 Klimaprojektionen

Die meisten Klimaprojektionen basieren auf Szenarien, wie die Entwicklung der Menge an Treibhausgasen in Zukunft aussehen könnte.

---

<sup>1</sup>auch als Power-to-Heat bezeichnet

<sup>2</sup>Stations ID 15444, 48.4418° N, 9.9216 ° O, 592.60 m üNN

Die aktuellsten [11] Szenarien sind die Repräsentativen Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways (RCP)), die verschiedene Entwicklungspfade der Treibhausgas-konzentrationen und zugehöriger Emissionen wiedergeben. Die Auswirkung der Klima-projektion, die den RCP folgen, werden im Detail z.B. in [5] diskutiert.

Im vorliegenden Bericht werden die etwas älteren Special Report on Emissions Scenari-os (SRES)-Szenarien genutzt [12, 13, 14, 15]. Der Grund für die Nutzung dieser älteren Szenarien ist, neben der freien Datenzugänglichkeit, insbesondere die hohe zeitliche Auf-lösung (z.T. 3 Stunden). Eine Betrachtung von Mittelwerten auf z.B. Monatsbasis kann zu Fehlinterpretationen führen und vernachlässigt auch die Herausforderungen, die sich aufgrund von Extremwerten ergeben.

Mittelwerte sind stets mit einem Informationsverlust verbunden. So kann z.B. die Infor-mation einer mittleren Geschwindigkeit von 100 km/h auf der Strecke von Stuttgart nach Ulm bedeuten, dass man den Weg in etwa einer Stunde gefahren ist, oder eben auch, dass man eine halbe Stunde im Stau stand und die restliche Zeit mit 200 km/h über die Autobahn gefahren ist.

## 2.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### 2.3.1 Datenquellen und Annahmen

Als jährlicher Wärmebedarf werden die Messwerte des *Projekthauses Ulm* herangezogen. Der klimabereinigte Mittelwert beträgt 15.430 kWh. Dieser Bedarf wird in erster Nähe-rung als konstant über die 20 Jahre angenommen.

Die jährliche Einstrahlung für Ulm ist aus der HelioClim-3v4 Datenbank<sup>3</sup> ermittelt. Auf einer um 30° nach Süden geneigten Fläche lag sie im Jahr 2014 bei 1.235 kWh/m<sup>2</sup>a. Aus den Daten von 2005 bis 2014 ergibt sich eine Bandbreite von 1.163 bis 1.339 kWh/m<sup>2</sup>a. Diese Einstrahlung dient als Grundlage für die PV-Anlage und solarthermische Heizungs-unterstützung.

### 2.3.2 Photovoltaik-Anlage

Die Investitionskosten für die PV-Anlage werden mit 1.684 €/kW [16] und einmalig 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 wer-den 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.

---

<sup>3</sup>[www.soda-pro.com](http://www.soda-pro.com)

Der mittlere, spezifische Anlagenenertrag lag in den Jahren 2015 bis 2017 bei 1.011 kWh/kW.

### 2.3.3 Heizungsanlagen

Für die Kosten der Heizungssysteme werden nur die reinen Investitionskosten der Wärmeerzeugungsanlage, ohne Heizflächen und Leitungssysteme, berücksichtigt. Die Betriebskosten werden ebenfalls nur für die Wärmeerzeugungsanlage betrachtet. Die Kosten dienen als Eingangsparameter der Simulation. Kapitalgebundene Kosten und Kosten für Lüftungssysteme, um einen geforderten Gebäudestandard zu erreichen, werden nicht berücksichtigt.

Die detaillierten Preise zum Stand der Untersuchung können dem separaten Bericht zu den Kosten verschiedener Heizsysteme für moderne Einfamilienhäuser in der Region Ulm [17] entnommen werden.

### 2.3.4 Energiepreise

Basierend auf der bisherigen Preisentwicklung werden für die Brennstoffe ähnliche jährliche Preissteigerungen angenommen [18, 19]. Der Arbeitspreis des elektrischen Stromes des Versorgungsunternehmens wird mit 0,198 €/kWh angenommen [20]. Die jährliche Preissteigerung wird mit 3,0 % p.a. berücksichtigt.

Zusätzlich werden verschiedenen Tarife der Stadtwerke Ulm<sup>4</sup> (Stand: Februar 2018) zur Bewertung des Einflusses des Strompreises auf die Kosten einer Luftwärmepumpe herangezogen [21, 20].

Die Gestehungskosten für die elektrische Arbeit der PV-Anlage ergeben sich aus den o.g. Annahmen zu 0,123 €/kWh, ausgehend von der Anlagenlebensdauer von 20 Jahren. Dieser Wert liegt im Rahmen der Literatur [22].

Die Kosten für die Fernwärme sind mit 0,064 €/kWh angenommen [23]. Die jährliche Preissteigerung wird mit 3,4 % p.a. berücksichtigt [18].

Als Kosten für die Wärmeenergie werden für Erdgas 0,06 €/kWh angenommen. Die jährliche Preissteigerung wird mit 3,1 % p.a. berücksichtigt [18].

Die Kosten für die Wärmeenergie aus Heizöl sind mit 0,065 €/kWh angenommen. Die jährliche Preissteigerung wird mit 4,8 % p.a. berücksichtigt [18]. Die aktuellen niedrigen Preise wurden nicht berücksichtigt, da diese als Folge der geopolitischen Situation zwischen den arabischen Staaten, USA und Russland betrachtet werden.

---

<sup>4</sup>SWU Schabenstrom online, SWU Naturstrom online, SWU Schabenstrom, SWU Naturstrom, SWU Grundversorger, SWU Grundversorger 2-Tarif, SWU Grundversorger Wärmepumpe

Als Kosten für die Wärmeenergie werden für Pellets 0,053 €/kWh angenommen. Die jährliche Preissteigerung wird mit 3,0% p.a. berücksichtigt [19].

### 3 Vergleich verschiedener Luftwärmepumpentechnologien

Im Rahmen des Wärmepumpenvergleichs wurden drei verschiedene Varianten von Luftwärmepumpen verglichen. Eine dieser Wärmepumpen ist die Luftwärmepumpe mit Direktkondensation im Projekthaus Ulm. Die anderen beiden befinden sich ebenfalls in Einfamilienhäusern in der unmittelbaren Nachbarschaft. Die Baujahre dieser Gebäude sind ähnlich zum Projekthaus Ulm.

Die Wärmepumpe im *Vergleichsgebäude A* ist eine in die Lüftungsanlage integrierte Luftwärmepumpe. Als Wärmequelle dienen die Abluft des Gebäudes und die Außenluft. Die bereitgestellte Wärmeenergie wird an das Heiz- und Warmwassersystem abgegeben. Bei sehr niedrigen Temperaturen und/oder sehr großem Wärmebedarf deckt das Gerät den Restwärmebedarf mit einer eingebauten elektrischen Zusatzheizung ab. Gesteuert wird das Gerät mit einer Außentemperaturabhängigen Regelung. Weiterhin befindet sich in dem Gebäude noch ein Holzofen ohne Wassertasche, der für die Raumheizung im Erdgeschoss genutzt wird. Das Gebäude wird von zwei Personen bewohnt.

Im *Vergleichsgebäude B* wird eine Inverter-Luftwärmepumpe betrieben. Mit der Inverter-Technologie wird der Kompressor der Luftwärmepumpe variabel betrieben, d.h. die Leistung der Luftwärmepumpe wird ständig dem Bedarf angepasst. Hieraus ergeben sich Vorteile im Betrieb wie z.B. längere Laufzeiten und höhere Effizienz, da keine zu hohen oder niedrigen Vorlauftemperaturen erreicht werden, die ein Aus- oder Einschalten der Pumpe notwendig machen würden. Auch hier deckt das Gerät den Restwärmebedarf bei sehr niedrigen Luft-Temperaturen und/oder sehr großem Wärmebedarf mit einer eingebauten elektrischen Zusatzheizung ab. Ein weiterer Wärmeerzeuger ist nicht vorhanden. Das Gebäude wird von zwei Personen bewohnt.

#### 3.1 Datenerfassung

Der Zeitraum des Vergleichs ist August 2017 bis Juli 2018 (11 Monate). Innerhalb dieses Zeitraums wurden die monatlichen elektrischen und thermischen Energiemengen erfasst. An allen Luftwärmepumpen wurde die elektrische Arbeit mit Stromzählern, Typ Easy-Meter Q3D, erfasst. Diese Zähler entsprechen der Klasse B gemäß EN 50470 [24], d.h. die Messabweichung liegt bei maximal 3%. In den beiden Vergleichsgebäuden wurde die Wärmemenge mit der in den Luftwärmepumpen integrierten Messtechnik erfasst.

In der Luftwärmepumpe im *Vergleichsgebäude A* wird die Wärmemenge im Inneren des Kältemittelkreises erfasst. Aufgrund der variablen Parameter des Kältemittels, wie z.B. Druck, Aggregatzustand und Temperatur, muss von einem höheren Messfehler ausgegangen werden. Ein separater Wärmemengenzähler konnte während der Projektlaufzeit nicht

installiert werden. Eine Erfassung der Holzmenge erfolgte nicht.

Im *Vergleichsgebäude B* ist das genaue Messprinzip der Wärmemenge unbekannt. Die gemessenen Werte wurden jedoch durch eine Expertenbegutachtung als plausibel beurteilt. Auffällig war, dass der Stand des Wärmemengenzählers im Frühjahr 2018 niedrigere Werte aufwies als in den Monaten zuvor. Ursache war das Überschreiten des maximal möglichen Zählerstands. Vermutlich ist der Zählerstand intern nur als vorzeichenbehafteter 16-Bit Integer-Wert gespeichert. Dieser erlaubt die Abbildung eines Zahlenbereichs von -32768 bis 32767. Als der Zähler den Zählerstand von 32767 kWh überschritt, begann er wieder von Null an zu zählen.

Im *Projekthaus Ulm* wird die thermische Energie in den Heizkreisen mittels Wärmemengenzählern von Landis & Gyr, Typ Ultraheat UH50, erfasst. Die Wärmemenge des Pelletofens wurde ebenso gemessen und bilanziell abgezogen. Daraus ergibt sich eine gewisse Unschärfe der Wärmemenge im Speicher. Diese kann bei monatlicher Betrachtungsweise jedoch vernachlässigt werden.

## 3.2 Ergebnisse

Zunächst werden die benötigten Strommengen der einzelnen Gebäude miteinander verglichen (Abbildung 2).

Im *Projekthaus Ulm* wurde zusätzlich noch der Strombedarf simuliert, wenn kein Pelletofen installiert wäre. Hierzu wurde die gesamte gemessene Wärmemenge, d.h. inklusive der des Pelletofens, durch die ermittelte monatliche AZ dividiert.

Der Strombedarf des *Vergleichsgebäude A* ist mit dem simulierten Bedarf des Projekthauses vergleichbar. Die mittlere Abweichung über den gesamten Zeitraum beträgt etwa 3%. Zu beachten ist jedoch, dass im *Vergleichsgebäude A* in der gemessenen elektrischen Arbeit auch die Anteile für den Betrieb der Lüftung enthalten sind.

Das *Vergleichsgebäude B* zeigt durchweg einen höheren Strombedarf. Dieser konnte durch die Optimierung der Heizkennlinie im Dezember 2017 etwas reduziert werden. Die Heizkennlinie wurde abgesenkt und die Raumtemperatur im Regler von 24 °C auf 23 °C reduziert. Die Warmwassertemperatur wurde ebenfalls von 60 °C auf 45 °C reduziert. Da es sich für die Warmwasserbereitung um einen Wellrohrwärmetauscher mit wenig Inhalt handelt, ist von einer negativen hygienischen Beeinflussung nicht auszugehen. Die mittlere Abweichung zu dem simulierten Bedarf des Projekthauses über den Zeitraum bis zur Optimierung (Dezember 2017) beträgt etwa 43% und sinkt danach auf etwa 23%.

Wie zu erwarten steigt der Strombedarf der Luftwärmepumpen über die Wintermonate an. Deutlich ist die Differenz zwischen den Messwerten des *Projekthauses Ulm* und den simulierten Daten ohne Pelletofen zu sehen (insbesondere November bis Februar). Im Mai

wurde im *Projekthaus Ulm* keine Heizung betrieben.

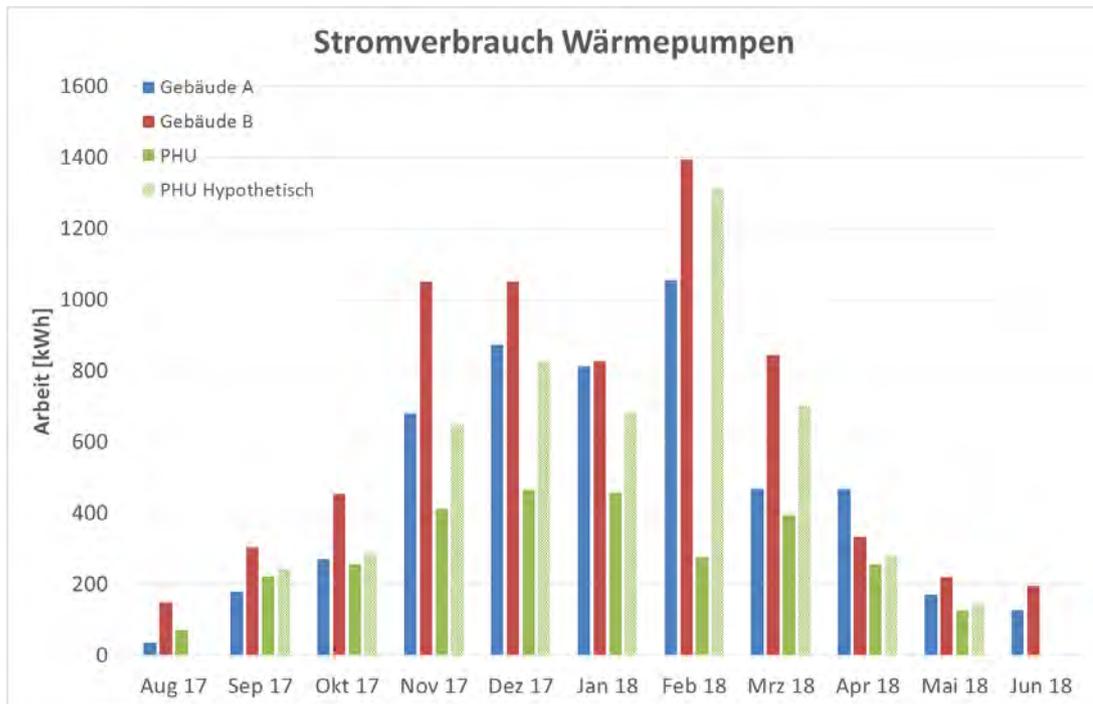


Abbildung 2: Übersicht des gemessenen bzw. berechneten Strombedarfs der verschiedenen Luftwärmepumpen in den untersuchten Gebäuden. Deutlich zeigt sich der Rückgang des Strombedarfs des Projekthauses während der Wintermonate aufgrund der Nutzung des Pelletofens. Die schraffierten Säulen stellen den simulierten Strombedarf des *Projekthauses Ulm* unter der Annahme eines nicht vorhandenen Pelletofens dar.

In Abbildung 3 sind die erfassten Wärmemengen für die Raumheizung dargestellt. Für das *Projekthaus Ulm* sind zwei Wärmemengen angegeben. Einerseits die durch die Luftwärmepumpe bereitgestellte Wärme (PHU), und andererseits die über Fußbodenheizung und Heizkörper abgegebene Wärme (PHU hyp), also der gesamte Wärmebedarf des Gebäudes. Die Differenz ist in der Wärmeerzeugung des Pelletofens begründet. Dieser Unterschied ist insbesondere im Februar 2018 deutlich zu sehen. Hier wurde nur etwa 15 % der Wärme durch die Luftwärmepumpe bereitgestellt.

Die Ergebnisse des *Vergleichsgebäudes A* sind aufgrund des Messprinzips, der nicht erfassten Holzmenge und des abweichenden Nutzerverhaltens nicht vergleichbar. Daher wurde anhand der Wohnfläche und des Baustandards ein jährlicher Heizwärmebedarf von etwa 10 MWh/a abgeschätzt. Mit dieser Schätzung wurde der monatliche Wärmebedarf anhand der Gradtagszahlen von Ulm [10] berechnet. Mit diesem Ansatz liegt der Wärmebedarf um etwa 20 % niedriger als die simulierten Werte des Projekthauses ohne Pelletofen. Dies sind plausible Zahlen, mit denen auch die AZ der Luftwärmepumpe berechnet werden (s.u.).

Der Wärmebedarf des *Vergleichsgebäudes B* deckt sich gut mit den simulierten Werten des Projekthauses ohne Pelletofen. Nur in den Monaten November und Februar zeigen sich größere Abweichungen, die jedoch im Nutzerverhalten begründet werden können. Die Abweichung des Wärmebedarfs liegt bei etwa 3 %.

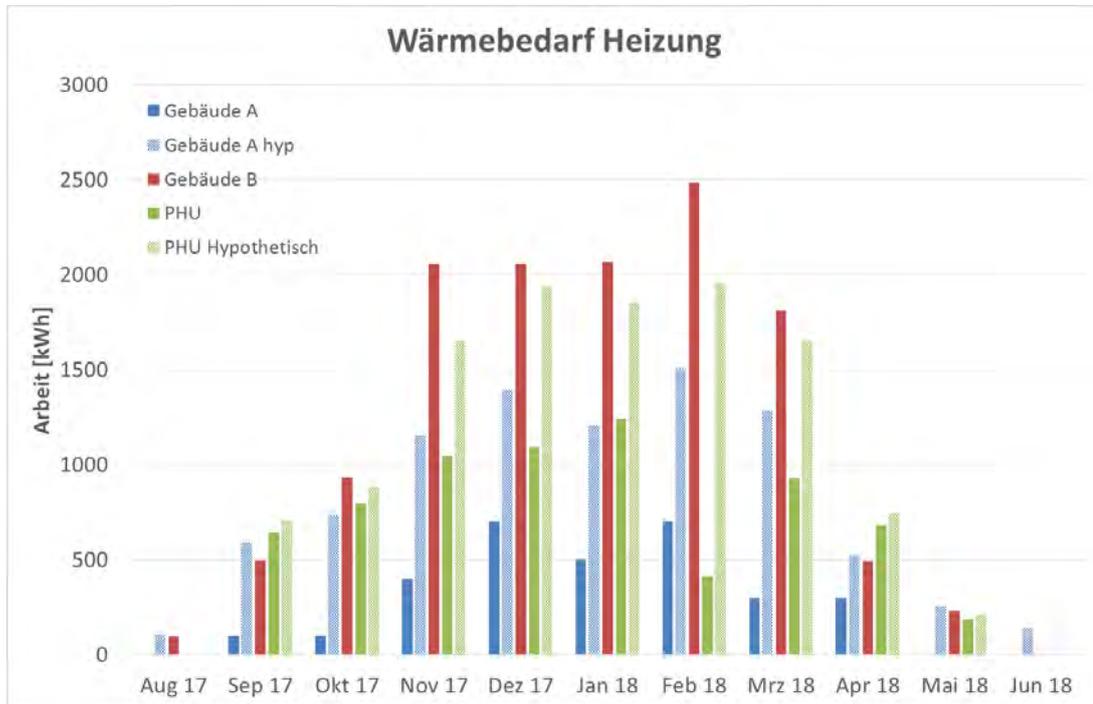


Abbildung 3: Übersicht der gemessenen bzw. berechneten Wärmebereitstellung der verschiedenen Luftwärmepumpen in den untersuchten Gebäuden. Die schraffierten Säulen zeigen den simulierten Wärmebedarf des *Projekthauses Ulm* ohne Pelletofen und des Vergleichsgebäudes A anhand des jährlicher Heizwärmebedarf und der gemessenen Gradtagszahlen von Ulm.

Ausgehend von der Position der Messtechnik werden jedoch unterschiedliche elektrische Verbraucher (z.B. die Steuerungselektronik, Pumpen oder Zusatzheizungen) mit bilanziert [8]. Bei der Betrachtung von kürzeren Zeiträumen kann dies die AZ beeinflussen und darf nicht vernachlässigt werden. Die Bestimmung der AZ mit anderen Systemgrenzen war während des Projekts nicht möglich.

Eine hohe AZ stellt sich ein, wenn aus wenig elektrischer Arbeit eine hohe Wärmemenge bereitgestellt werden kann (z.B. aufgrund hoher Außentemperaturen). Sinkt die abgegebene Wärmemenge bei konstanter elektrischer Arbeit, sinkt somit auch die AZ. Die AZ kann sogar kleiner Eins werden, wenn z.B. keine Wärme für die Raumheizung bereitgestellt wird, aber dennoch ein unverhältnismäßiger elektrischer Verbrauch gemessen wird. Dies kann z.B. während der Sommermonate beobachtet werden. Trotz der hohen Außentemperatur, was für eine hohe AZ spricht, sind die berechneten Werte deutlich niedriger.

Dies liegt z.B. an dem konstanten Strombedarf der elektrischen Steuerung. Im Extremfall, wenn nur die Heizenergie der Raumwärme auf den gemessenen Strombedarf bezogen wird, sinkt die AZ auf Null. Während eines Sommermonats wird keine Wärme für die Raumwärme benötigt (z.B. 0 kWh), jedoch benötigt die Luftwärmepumpe für die Steuerung dennoch Strom (z.B. 31 Tage x 24 h x 10 W = 7,44 kWh). Daraus würde sich eine AZ von Null (0 kWh / 7,44 kWh = 0) ergeben. Dies sollte bei Vergleichen von monatlichen oder kürzeren AZ immer berücksichtigt werden.

Wie oben erwähnt, wird die Wärmemenge im Kältemittelkreis der Luftwärmepumpe im *Vergleichsgebäude A* erfasst und in der gemessenen elektrischen Arbeit sind auch die Anteile für den Betrieb der Lüftung enthalten. Darüber hinaus wird ein unbekannter Anteil der Raumwärme durch den Holzofen bereitgestellt. Ein Interview mit den Bewohnern zeigte darüber hinaus, dass sie häufig nicht anwesend waren und daher nur ein minimaler Raumwärmebedarf bestand. Daher sind die aufgeführten AZ aus den Messwerten nicht repräsentativ und dürfen nicht mit den anderen beiden Gebäuden verglichen werden. Sie sind nur der Vollständigkeit halber aufgeführt (Abbildung 4). Die hypothetischen Werte aus dem Verhältnis des geschätzten Wärmebedarfs (s.o.) und des Strombedarfs zeigen plausible Zahlenwerte, die jedoch mit einem größeren Fehler aufgrund der Schätzung behaftet sind. Diese Monatsarbeitszahlen liegen im Bereich von 1,12 (Mai 2018) und 3,84 (September 2017). Das *Vergleichsgebäude B* hat eine minimale Monatsarbeitszahl von 1,06 (Mai 2018) während das Maximum einen Wert von 2,5 (Januar 2018) erreicht. Die Spanne der Monatsarbeitszahl des *Projekthauses Ulm* reicht von 1,46 (Mai 2018) bis 3,11 (Oktober 2017).

Während der Wintermonate (Oktober bis März) lag die Streuung zwischen den AZ aller Gebäude im Mittel bei 0,76 (Minimum 0,29, Maximum 1,11). Nennenswert ist auch der Monat Februar 2018, der mit einer mittleren Temperatur von  $-3,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  deutlich kälter war als die anderen Monate.

Die niedrigen Monatsarbeitszahlen liegen alle außerhalb der Heizperiode. Hier wirken sich die geringen Laufzeiten und der Strombedarf der Heizungssteuerung, Pumpen usw. negativ aus. Die Streuung der Werte wird durch die Messungenauigkeit, das Nutzerverhalten (z.B. Personenanzahl im Haushalt) sowie die Bauart und Qualität der Luftwärmepumpe beeinflusst.

Während des Analysezeitraums wurde im *Vergleichsgebäude A*, basierend auf den Messwerten, nur eine mittlere AZ von 1,07 ermittelt. Dies wäre nur unmerklich besser als ein elektrischer Heizstab und liegt an der zu geringen Auflösung der ermittelten Wärmemenge sowie an der nicht erfassten Holzmenge. Unter Berücksichtigung des geschätzten Wärmebedarfs liegt die AZ bei 2,46.

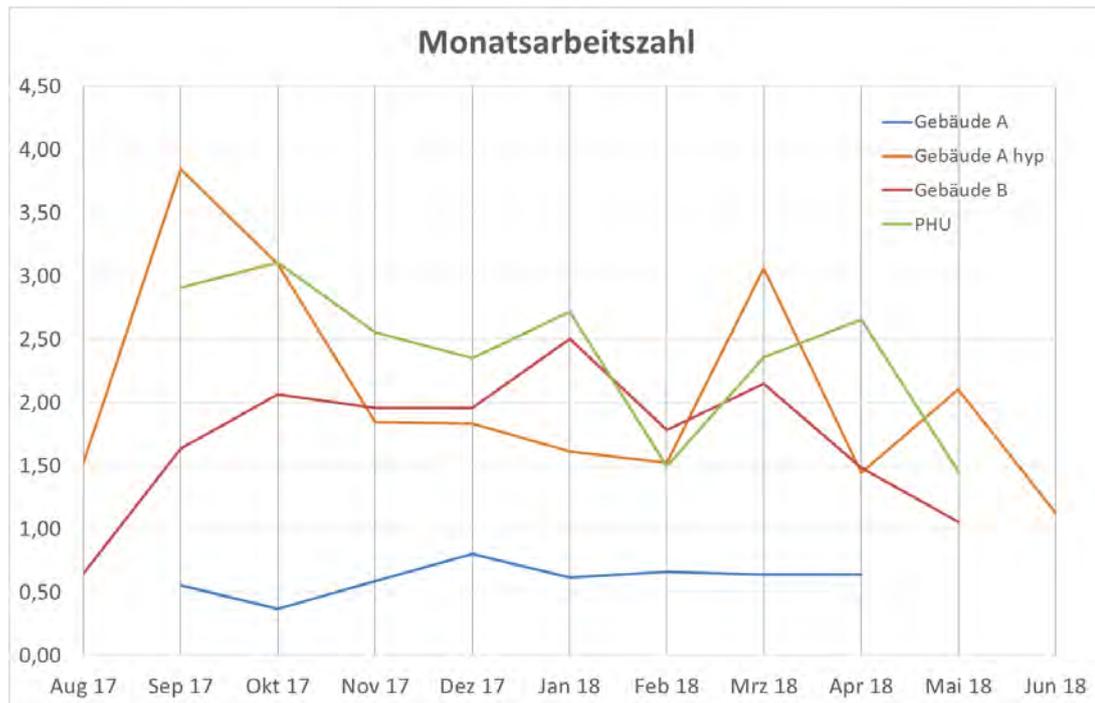


Abbildung 4: Berechnete monatliche AZ für die untersuchten Gebäude. Für das *Vergleichsgebäude A* ist die Berechnung für die fehlerhaften Messwerte und die Simulation dargestellt.

Dieser Wert liegt nahe der AZ vom *Vergleichsgebäude B* mit 2,43. Das *Projekthaus Ulm* erreichte eine AZ von 2,99. Alle Werte berücksichtigen auch die Wärmemenge für die Warmwasserbereitstellung und Zusatzheizung, sofern diese in Betrieb war. Die Speicherverluste der Batterie sind beinahe ein Drittel und werden als Verlustenergie separat aufgeführt. Auch die Speicherverluste des Pufferspeichers und die Messabweichungen der einzelnen Messgeräte sind dieser Kategorie zugeordnet.

Basierend auf den Daten der verschiedenen Messsystemen konnten die elektrischen und thermischen Energieflüsse im *Projekthaus Ulm* für das Jahr 2017 ermittelt werden und sind in Abbildung 5 dargestellt. Auf der linken Seite sind die Quellen PV, Pellets und *Umwelt* aufgeführt. Die rechte Seite stellt den Bedarf dar, untergliedert in den elektrischen Bedarf des Hauses, die Wärmenutzung in der Fußbodenheizung, Warmwasserbereitung und Heizkörper sowie Verluste. Unter *Umwelt* wird der Anteil der Wärme verstanden, den die Luftwärmepumpe der Außenluft entzogen und für die Raumheizung bzw. Warmwasserbereitung innerhalb des Hauses zur Verfügung gestellt hat. Die elektrische Arbeit der PV-Anlage wird zum Teil direkt im Haus verbraucht (etwa ein Viertel des Bedarfs), in die Luftwärmepumpe und Batterie geführt oder als Überschuss in das öffentliche Netz gespeist. Die Pellets decken etwa zwei Drittel des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs. Aus dem elektrischen Netz wird der Bedarf des Hauses und der Luftwärmepumpe gedeckt,

wenn weder aus der PV-Anlage noch aus der Batterie genügend elektrische Arbeit bereitsteht.

Der Strombedarf der Luftwärmepumpe wird in etwa zu gleichen Teilen aus Netzstrom und PV-Strom gedeckt. Sie stellt, zusammen mit der *Umwelt*-Energie, einen Großteil der benötigten Raumwärme und Warmwasserbereitung zur Verfügung. Die Raumwärme geht fast ausschließlich in die Fußbodenheizung, nur ein geringer Anteil wird zur schnellen Aufheizung des Badezimmers, in dem dort installierten Heizkörper, genutzt.

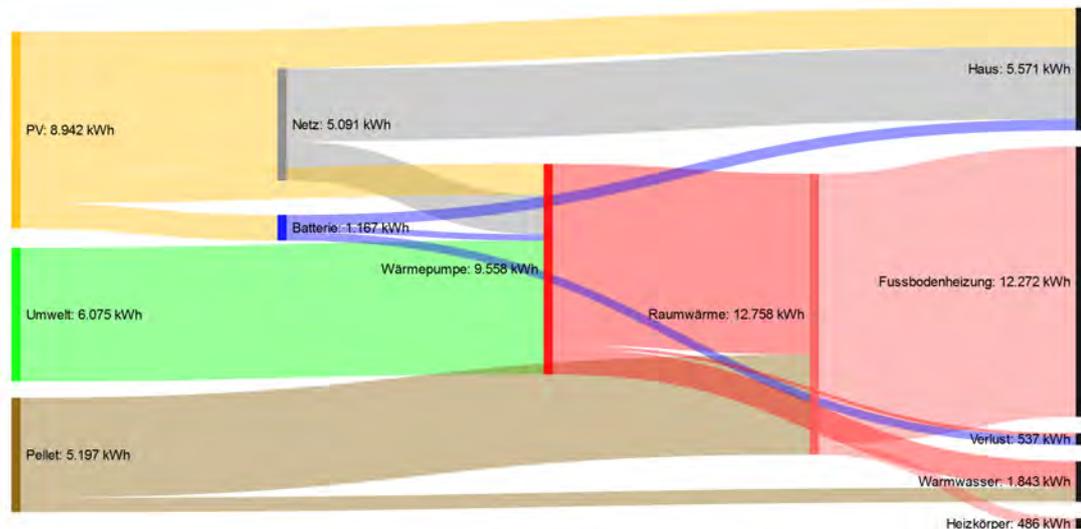


Abbildung 5: Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* für das Jahr 2017.

Die monatlichen Energieflussdiagramme des *Projekthaus Ulm* für das Jahr 2017 sind in Anhang A abgebildet.

### 3.3 Zusammenfassung

Im Rahmen des Luftwärmepumpenvergleichs wurden die Verbrauchsdaten von drei verschiedenen Luftwärmepumpen in drei Gebäuden verglichen. Durch das einheitliche Messsystem sind die Stromwerte gut vergleichbar. Der Strombezug aller Luftwärmepumpen, für das *Projekthaus Ulm* ohne Pelletanteil, liegen in ähnlichen Größenordnungen. Unterschiede konnten durch die Personenanzahl und das verschiedene Nutzerverhalten der Gebäudebewohner begründet werden. Ein signifikanter Unterschied aufgrund der Technologie ließ sich nicht nachweisen und wäre wegen der geringen Größe der Stichprobe auch fragwürdig.

Es zeigen sich jedoch große Unterschiede in den ermittelten Wärmemengen. Im *Projekthaus Ulm* sind Wärmemengenzähler installiert, während in den beiden Vergleichsgebäuden auf die monatlichen Werte der geräteinternen Messung zurückgegriffen wurde. In einem

Gebäude wurden Unzulänglichkeiten gefunden, die die Messergebnisse als unplausibel erscheinen lassen. Hier wurden anhand der Außentemperatur Ersatzwerte ermittelt.

Hieraus ergeben sich natürlich auch unterschiedliche AZ, bei denen eine erhöhte Messabweichung berücksichtigt werden muss. Die ermittelten Unterschiede lassen sich sowohl in den beschriebenen Messverfahren sowie im Nutzerverhalten begründen. Zusammenfassend müssen AZ, die mit geräteinternen Messsystemen ermittelt wurden, mit großer Vorsicht interpretiert werden. Für die Berücksichtigung in der Wirtschaftlichkeit (AZ beeinflussen die Gestehungskosten für Wärme am größten, siehe Kapitel 7.3) sollten daher Messwerte von kalibrierten Messgeräten genutzt werden. Trotz dieser Erschwernisse sind die z.T. rechnerisch ermittelten AZ in einem mit der Literatur vergleichbaren Bereich [8, 25].

Das Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* fasst deutlich die Anteile der einzelnen Quellen bei der Deckung des elektrischen und thermischen Bedarfs zusammen. Weitere Informationen und Hinweise für die Optimierung von Heizungssystemen (z.B. Auslegungstemperatur der Heizflächen, hydraulischer Abgleich) sind in [26] enthalten.

## 4 Holzfeuerung im Wohnraum moderner Gebäude

In Neubauten kann, häufig unter dem Aspekt des Wohnkomforts, ein zusätzlicher Holzofen im Wohnraum installiert werden. Pelletheizungen sind in Bezug auf die Emission von Luftschadstoffen zwar etwas ungünstiger als andere Energieträger, aber im Normalbetrieb weitaus emissionsärmer als Kamin- und Kachelöfen [26]. Pelletheizungen und Kachelöfen gibt es ohne und mit Wassertasche, welche einen hydraulischen Anschluss an das Heizungssystem erlaubt. Über diese Verbindung kann ein Großteil der Wärme in einem Wärmespeicher gepuffert werden und auch anderen Räumen und der Brauchwasserbereitung zur Verfügung gestellt werden. Die Betriebskosten sind deutlich geringer im Vergleich als der Betrieb eines elektrischen Heizstabs, jedoch bei erhöhtem Bedarf für Reinigung und Wartung. Die Wassertasche und die hydraulische Anbindung führen jedoch zu höheren Investitionskosten, die wiederum zu einer Entscheidung gegen eine Wassertasche führen können. Im durchgeführten Experiment soll der Frage nachgegangen werden, wie sich solch ein Holzofen ohne Wassertasche auf die Temperatur und Behaglichkeit im Wohnraum des Projekthauses auswirken würde. Hierzu wird der installierte Pelletofen genutzt.

### 4.1 Datenerfassung

Das Experiment zur Auswirkung von Holzfeuerung ohne Wärmetasche im *Projekthaus Ulm* wurde im Zeitraum vom 05.02.2018 bis 11.02.2018 durchgeführt. Die Auslegungs-Heizleistung für diesen Raum ist 2029 W bei einer normgerechten Auslegungstemperatur von  $-14^{\circ}\text{C}$  [27]. Die Lufttemperatur im Raum wird an sechs Stellen in einer Höhe von 1 bis 1,8 m gemessen (Abbildung 6). Dabei sind zwei verschiedene Sensortypen eingesetzt worden. Einerseits wurden mobile USB-Sensoren vom Typ HT160 für die Erfassung der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit verwendet. Andererseits wurden zwei Raumsensoren, die am KNX-Bus angeschlossen und in den Lichtschaltern des Raumes integriert sind, genutzt. Die zeitliche Auflösung aller Sensoren beträgt 5 Minuten.

Der Sensor in der Küche ist aufgrund seiner Lage stark von der solaren Einstrahlung durch das Küchenfenster beeinflusst und wird nicht in der Auswertung berücksichtigt. Die Referenzraumtemperatur aus dem Zeitraum Dezember 2017 bis Januar 2018 ist  $21,0^{\circ}\text{C}$ . Während des Versuchs wurde das Konvektionsgitter am Pelletofen entfernt. Dadurch wurde eine höhere Wärmeleistung von ca. 1,5 kW in den Raum abgegeben. Die übrige Wärme wird durch die Wassertasche weiterhin in den Pufferspeicher geladen. Hierdurch entstehen im Betrieb Heizpausen, wenn der Pufferspeicher seine Solltemperatur erreicht hat. Durch die abgesunkene Raumtemperatur kann wieder Wärme in den Räumen gepuffert werden, ohne dass eine Überheizung der Räume stattfindet.

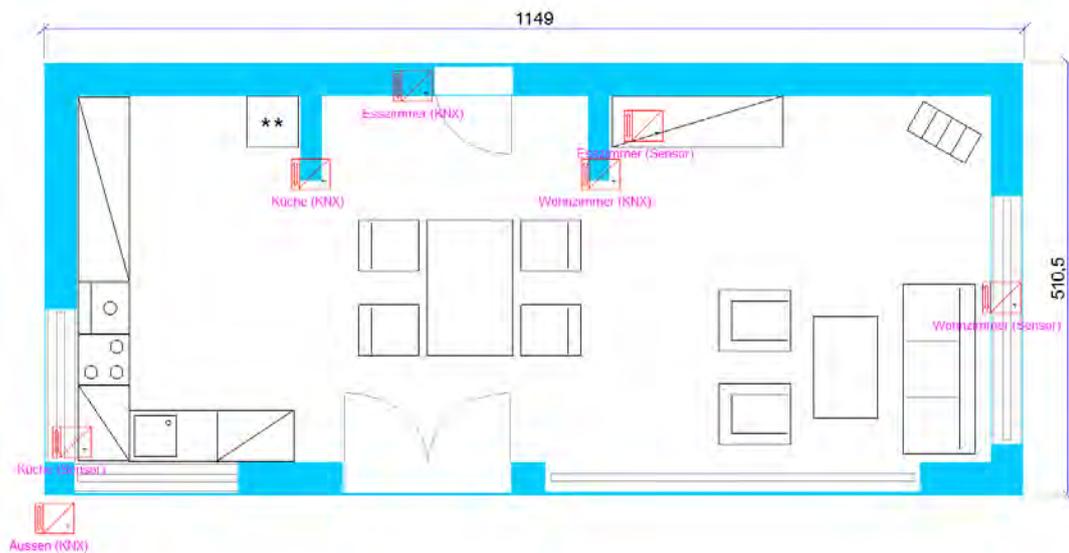


Abbildung 6: Schemazeichnung des Wohnbereichs im Projekthaus Ulm. Die Positionen der verschiedenen Sensoren sind vermerkt.

## 4.2 Ergebnisse

Für den normalen Versuch ist in Abbildung 7 exemplarisch der Tagesgang der Temperaturen für den 11.02.2018 dargestellt. Die x-Achse zeigt die Tageszeit, während die y-Achsen die Temperaturen (links Raumtemperatur, rechts Außentemperatur) zeigen. Der Tagesgang der Außentemperatur ist als gestrichelte Linie dargestellt. Bei einer Außentemperatur von  $1,5^{\circ}\text{C}$  steigt die Raumtemperatur am Nachmittag durch den Betrieb des Pelletofens auf ca.  $22^{\circ}\text{C}$  an.

Zur Bestimmung der Behaglichkeit werden die Messdaten in einem Behaglichkeitsdiagramm dargestellt. Die x-Achse zeigt die Lufttemperatur innerhalb des Wohnraums und die y-Achse die absolute Luftfeuchtigkeit an. Als weitere Parameter ist die relative Luftfeuchtigkeit dargestellt. Die Häufigkeit der Messwerte der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit sind farbcodiert (von blau für niedrige Häufigkeit bis rot für hohe Häufigkeit) abgebildet. Zur Einordnung sind die normativ empfohlenen Grenzbereiche (kombiniert für Sommer und Winter) der Norm DIN EN 15251 [28] für die Kategorien I (rot) und II (orange) als Vierecke abgebildet. Die Kategorie I repräsentiert die höchste Anforderung, die empfohlen ist für Räume, in denen besonders empfindliche Personen arbeiten und leben. Kategorie II bildet die normale Anforderung ab. Diese ist empfohlen für neue Gebäude und im Rekonstruktionsbereich. Von einem behaglichen Raumklima kann ausgegangen werden, wenn sich die Messwerte innerhalb dieser Vierecke befinden.

Abbildung 8 zeigt das Behaglichkeitsdiagramm für den 11.02.2018. Die meisten Messwerte liegen innerhalb des Bereichs der Kategorie I. Auch die mittlere Lufttemperatur von

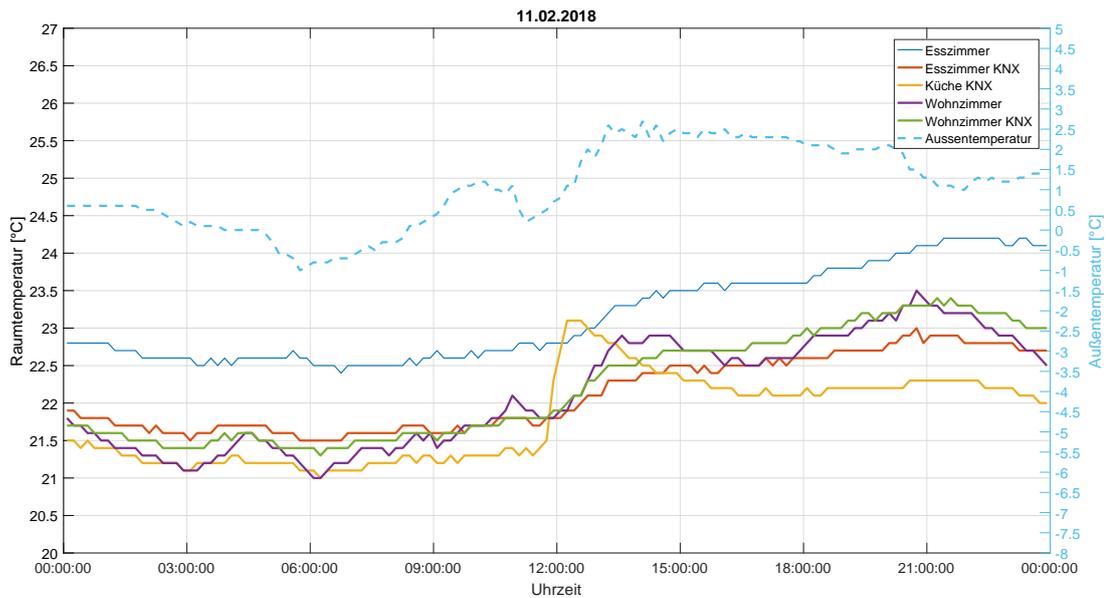


Abbildung 7: Tagesverlauf der Temperaturen vom 11.02.2018.

21,8 °C befindet sich innerhalb des Behaglichkeitsfensters. Bei der Befragung haben Bewohner die höhere Raumtemperatur bemerkt und befanden sie z.T. an der Grenze der Behaglichkeit. Durch die Lüftungsanlage wurde die Wärme auch in die anderen Räume des *Projekthauses Ulm* transportiert.

Die Datenaufzeichnung der Temperaturen im Pufferspeicher ist in Abbildung 9 dargestellt. Die x-Achse zeigt die Uhrzeit des Tages und die y-Achse die Höhe der Temperatursensoren. Die Temperatur ist farblich wiedergegeben, von blau für niedrige Temperaturen hin zu Rot für hohe Temperaturen. Die Abbildung zeigt für den Nachmittag des 12.2.2018, dass der Betrieb des Pelletofens den Speicher innerhalb von etwa 1 Stunde auf eine Temperatur von etwa 40 °C auflädt. Die obere Temperaturschicht (Höhe 160 mm), mit ihrer Temperatur von 60 bis 65 °C, ist für die Warmwasserbereitung vorgesehen.

Zur Erweiterung des Experiments wurde am 13.02.2018 noch ein elektrischer Radiator mit 2 kW Leistung zusätzlich betrieben. Die gesamte Heizleistung im Raum, als simulierter Holzofen, lag somit bei 3,5 kW. Der Versuch wurde um 8:30 Uhr gestartet. Die Raumtemperatur lag dort noch vom Vortag und durch morgendliches Aufheizen mit dem Pelletofen bereits bei ca. 22 °C. Die Außentemperaturen erreichten in der Nacht ein Minimum von -8 °C und stiegen im Tagesverlauf auf ca. 3 °C.

Raumtemperatur ist um 10:30 Uhr bereits auf über 24 °C gestiegen. Nach Aussagen der Bewohner war die Behaglichkeit im Raum nicht mehr gegeben und der Versuch ist vorzeitig abgebrochen worden. Die relative Luftfeuchtigkeit ist von 43 % auf 35 % gefallen. Dies ist auch im Behaglichkeitsdiagramm (Abbildung 10) zu sehen. Die Messwerte wandern aus

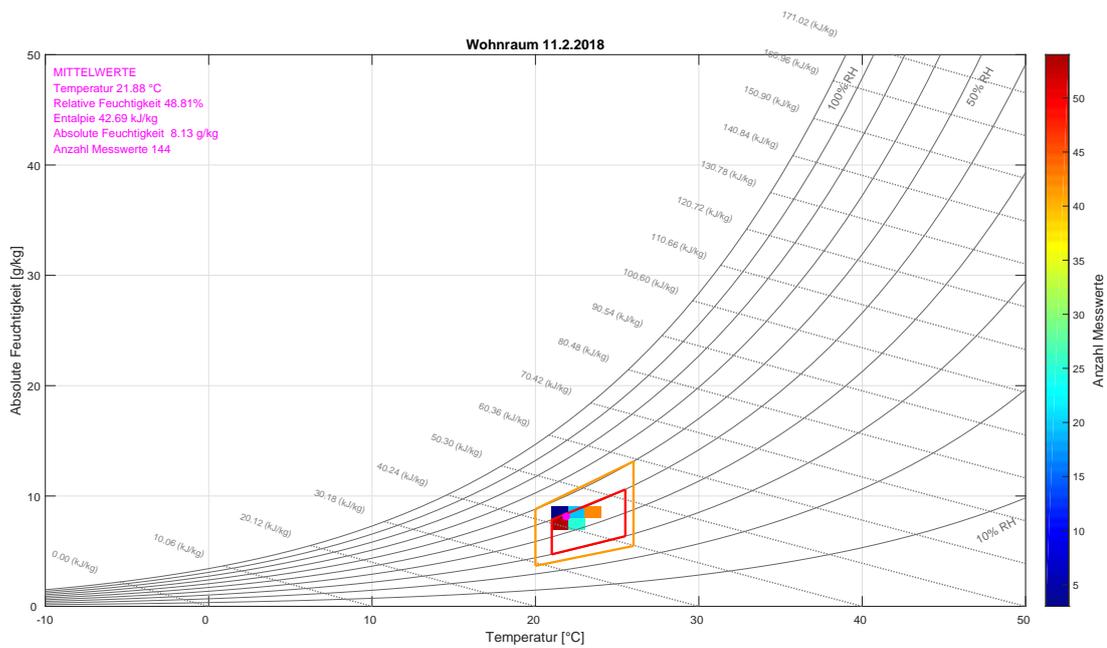


Abbildung 8: Behaglichkeitsdiagramm für den 11.02.2018 mit einer zusätzlichen Heizleistung von 1,5 kW. Das rote (orange) Viereck markiert den behaglichen Bereich für die Kategorie I (Kategorie II) nach [28].

dem Behaglichkeitsfenster heraus. Gegen Mittag gab es noch zusätzliche solare Erträge der Sonne durch die großen Fensterflächen. Eine weitere Überhitzung des Raumes wurde durch das Schließen der Jalousien verhindert. Die Wärme hielt sich bis spät in den Abend im Raum. Abbildung 11 zeigt die deutliche vergrößerte Spreizung der Temperaturen an den verschiedenen Messstellen. Die Wärme war somit nicht mehr gleichmäßig im Raum verteilt.

Abbildung 12 zeigt die Zeitreihen der Raumtemperaturen der beiden betrachteten Tage des Versuchs im Vergleich. Die roten Linien sind die Perzentile der Messdaten (5%-Schritte) und die schwarze Linie bildet den Mittelwert ab. Deutlich lässt sich der steile Temperaturanstieg am 13.02.2018 bei der Durchführung des Versuchs mit erhöhter Heizleistung erkennen. Die hohe Spreizung zeigt die inhomogene Temperaturverteilung innerhalb des Raums.

### 4.3 Zusammenfassung

Kamin- und Kachelöfen werden meist nur zur Erhöhung des Wohnkomforts installiert und dienen nicht zur grundlegenden Deckung des Wärmebedarfs [26]. Ein Holzofen ohne Wassertasche erzeugt oft mehr Wärme, als zum Beheizen des Aufstellraums nötig ist. Dies kann zur Überhitzung des Raumes führen und sich negativ auf die Behaglichkeit auswirken. Dies ist ein Problem bei Kamin- und Kachelöfen. Das Scheitholz erzeugt in relativ

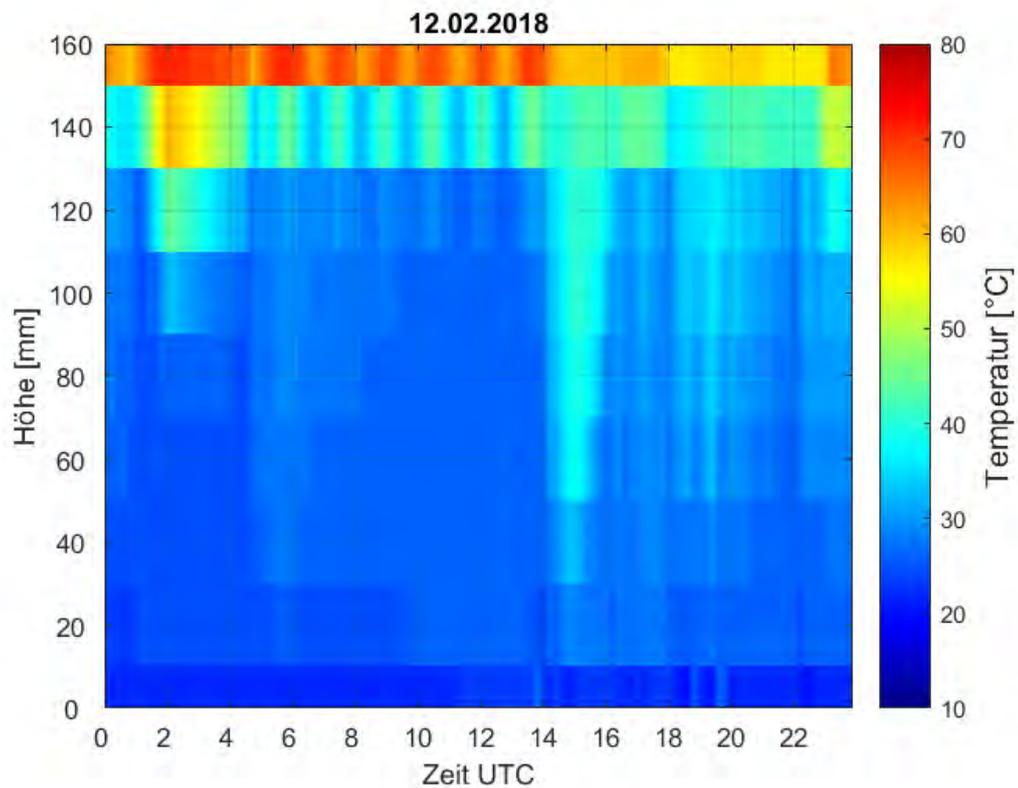


Abbildung 9: Temperaturschichtung des Wärmepuffers im Tagesverlauf des 12.02.2018. Die Temperaturen werden in verschiedenen Höhen des Speichers erfasst. Die Temperaturen sind farb-codiert, von blau für niedrige Temperaturen hin zu Rot für hohe Temperaturen.

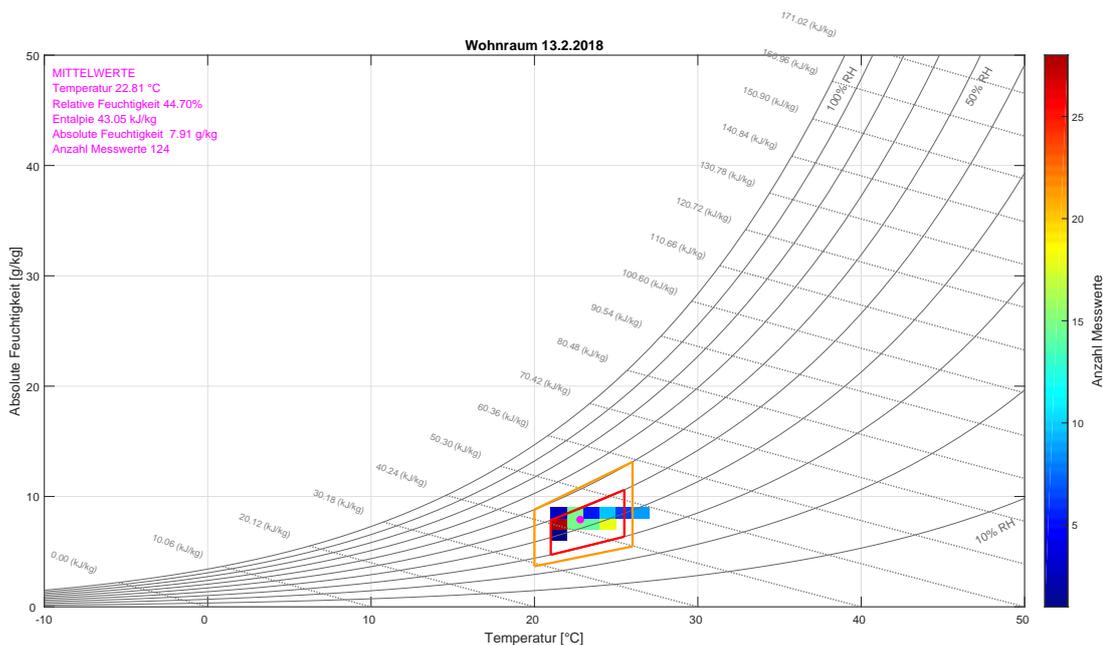


Abbildung 10: Behaglichkeitsdiagramm für den 13.02.2018 mit einer zusätzlichen Heizleistung von 3,5 kW. Das rote (orange) Viereck markiert den behaglichen Bereich für die Kategorie I (Kategorie II) nach [28].

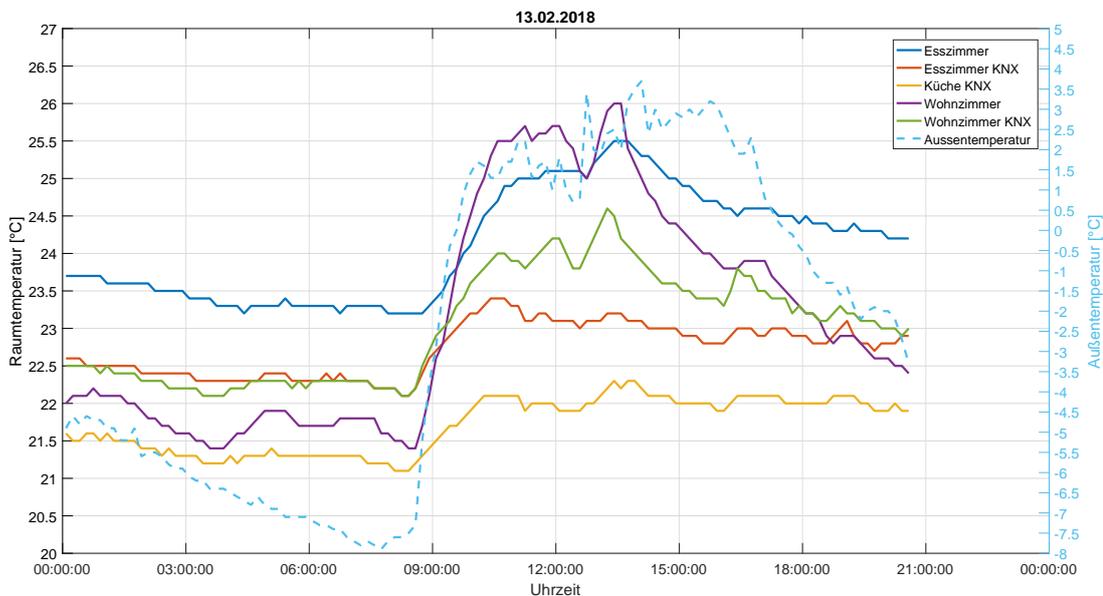


Abbildung 11: Tagesverlauf der Temperaturen vom 13.02.2018.

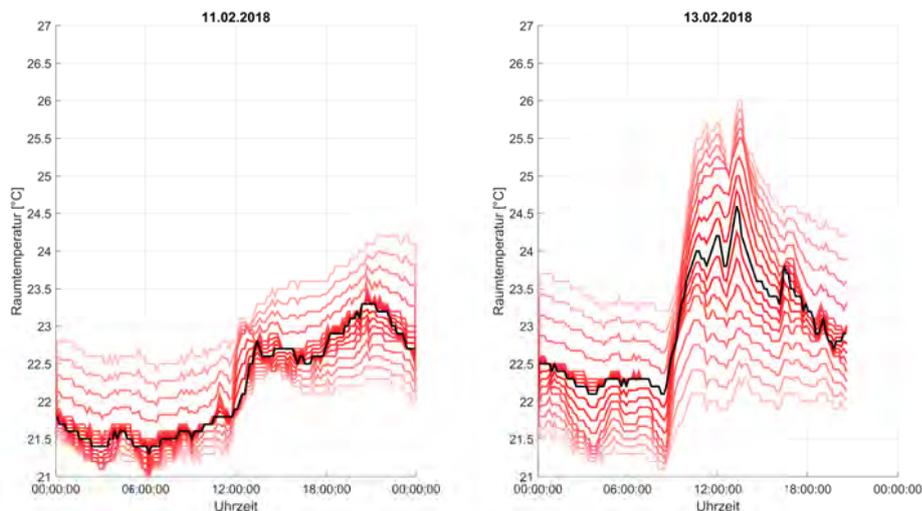


Abbildung 12: 5%-Perzentile der Tagesverläufe der Temperaturen vom 11.02.2018 und 13.02.2018. Die 5 %- bis 95 %-Perzentile sind als rote Linien, der Median ist als schwarze Linie dargestellt.

kurzer Zeit eine hohe Wärmeleistung, die zur Überhitzung der Raumtemperatur führt. Die Temperatur "überschießt", weil die Verbrennung nicht schlagartig gestoppt und geregelt werden kann. Die Nutzer regulieren die Raumwärme dann häufig durch das Öffnen der Fenster. Mit einer Anbindung des Kaminofens an den Heizwasserkreislauf der Heizung kann die Wärme kontrolliert aus dem Raum abgeführt und, mit einem geeigneten Wärmespeicher, für einen zeitversetzten Gebrauch gespeichert werden.

Die Versuche des Experiments im *Projekthaus Ulm* bestätigen dies. Bei einer Heizleistung von 3,5 kW stieg die Temperatur innerhalb des etwa 45 m<sup>2</sup> großen Wohnbereichs innerhalb weniger Stunden um über 2 K. Dabei zeigte sich auch eine sehr inhomogene Wärmeverteilung, trotz des offenen Raumes. Mit steigender Temperatur nahm die relative Luftfeuchtigkeit ab und das Raumklima wurde als unbehaglich empfunden, was schließlich zum Abbruch des Experiments durch die Bewohner führte.

Es wird daher die Anbindung des Holzofens an das Heizungssystem mittels Wassertasche dringend empfohlen.

## 5 Analyse der Wohnraumlüftungen und Auswirkung auf die Behaglichkeit

Durch die steigenden Dämmstandards sind die Gebäudehüllen heutiger Neubauten annähernd luftdicht. Eine Lüftung durch undichte Türspalten und Fensterfugen, wie man es aus Bestandsgebäuden her kennt, findet in Neubauten nicht mehr statt und ist auch durch die gesetzlichen Vorgaben [§6 EnEV 29] nicht mehr zulässig. Die im Gebäude entstehende Feuchtigkeit (z.B. durch Ausatmen, Kochen, Duschen, usw.) kann nicht mehr nach außen gelangen und umgekehrt ist die Menge an frischer Außenluft ebenfalls reduziert. In Feuchträumen steigt die Gefahr der Schimmelbildung.

Um dies zu verhindern und vom Nutzereingriff (z.B. durch Fensterlüftung) unabhängig zu machen, werden automatisierte Lüftungssysteme, die sogenannte kontrollierte Wohnraumlüftung, installiert und betrieben. Die Wärme der aus dem Haus geführten Luft wird mittels Wärmetauscher an die zugeführte Außenluft übertragen und als Wärmerückgewinnung bezeichnet. Im Gegensatz zur Fensterlüftung wird das Lüften der kontrollierten Wohnraumlüftung weitgehend unabhängig von der Temperaturdifferenz innerhalb und außerhalb des Gebäudes sowie von der Windgeschwindigkeit und -richtung.

Bei Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung sind nach Norm vier verschiedene Luftarten definiert [30]. Die Außenluft ist die angesaugte Luft aus der Umgebung, die Zuluft die aufgewärmte Außenluft, die innerhalb des Gebäudes in die Räume geleitet wird. Als Abluft wird die aus den Räumen abgesaugte Luft bezeichnet, während die Fortluft die Luft ist, die das Gebäude verlässt. Diese Begriffe sind nochmals schematisch in Abbildung 13 dargestellt.

Im Rahmen des Projekts werden die Daten der Messgeräte in der Lüftungsanlage analysiert, um den Wirkungsgrad der kontrollierten Wohnraumlüftung im *Projekthaus Ulm* zu bestimmen. Durch eine Bewohnerbefragung, wird die subjektive Wahrnehmung auf die Behaglichkeit geprüft und mithilfe verschiedener, in der Praxis erprobte Nutzungs- und Lüftungsstrategien, ausgewertet.

### 5.1 Datenerfassung

Im Rahmen von NETCHEK-PV wurden in die Lüftungsrohre Temperatursensoren vom Typ EE160-HT installiert, die alle 30 Sekunden abgefragt werden. In der nachgelagerten Datenanalyse werden die Werte auf Tages- und Monatssummen aggregiert und ausgewertet. Die Zeitreihen wurden durch das Projektteam optisch auf Datenlücken und Messfehler hin geprüft.

Als Kennzahl für die Beschreibung der Wärmerückgewinnung kann die Rückwärmezahl

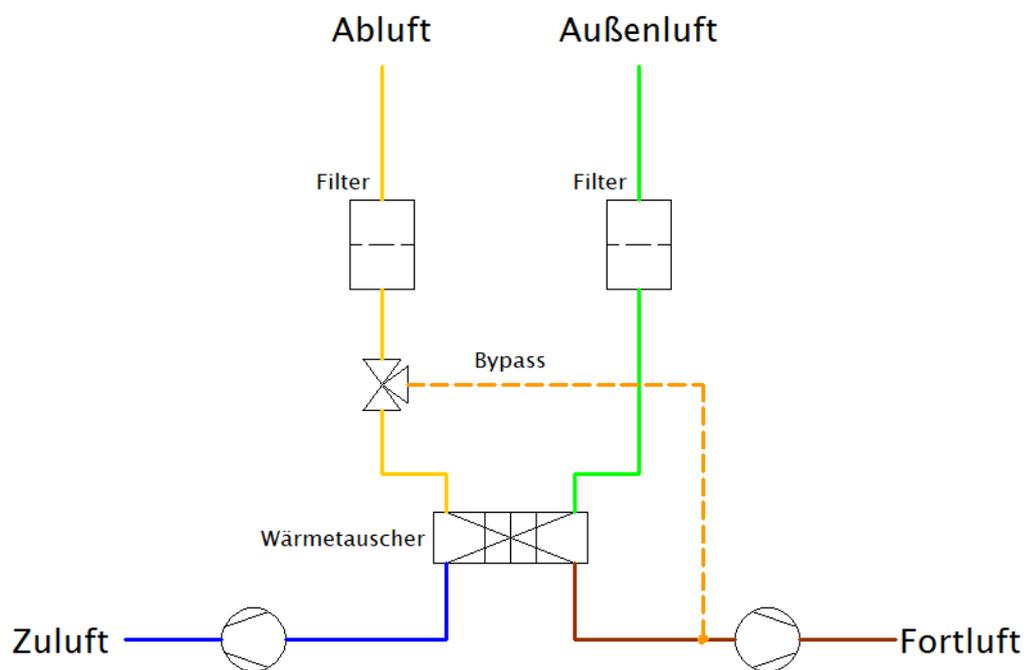


Abbildung 13: Schematische Darstellung der kontrollierten Wohnraumlüftung im *Projekt- haus Ulm*

(auch als Temperaturänderungsgrad, Temperatúraustauschgrad oder Temperaturwirkungsgrad bezeichnet) berechnet werden. Die Rückwärmezahl beschreibt die thermische Effizienz der Wärmerückgewinnung und wird aus dem Verhältnis von Temperaturdifferenzen gebildet. Die Rückwärmezahl kann dabei auf die Fortluft oder die Abluft bezogen werden. Bezogen auf die Fortluft beschreibt sie das Verhältnis von der Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Fortluft zur Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Außenluft, und gibt den Wärmeanteil an, der der Abluft entzogen wurde. Da die Abwärme der Lüftungsventilatoren kaum die Rückwärmezahl der Fortluft beeinflusst, beschreibt sie somit die Energieeffizienz des Wärmeübertragers. Die auf die Außenluft bezogene Rückwärmezahl beschreibt den Wärmeanteil, der von der Abluft auf die Zuluft übertragen wird. Dabei ist die Abwärme der Ventilatoren weitgehend beinhaltet und kann zu Rückwärmezahlen der Außenluft von mehr als 100 % führen. Dies tritt auf, wenn die Verluste im Wärmeübertrager geringer sind als die Abwärme der Ventilatoren.

Analog hierzu können Rückfeuchtezahlen definiert werden. Die Rückfeuchtezahl bezogen auf die Fortluft gibt an, welcher Anteil an absoluter Luftfeuchtigkeit der Differenz zwischen Abluft und Außenluft der Abluft entzogen wird. Die auf die Außenluft bezogene Rückfeuchtezahl dagegen gibt an, welcher Anteil an absoluter Luftfeuchtigkeit der Differenz zwischen Abluft und Außenluft auf die zugeführte Frischluft übertragen wird. Diese Werte können sich unterscheiden, wenn im Wärmeübertrager Kondenswasser abgeführt wird [31].

## 5.2 Ergebnisse

Die Analyse der Temperatur-Zeitreihen zeigt die Wirksamkeit der Wärmerückgewinnung. Abbildung 14 zeigt den Tagesgang der Temperaturen der Außenluft, Fortluft, Zuluft und Abluft der kontrollierten Wohnraumlüftung im *Projekthaus Ulm* für den 30.01.2018. Es ist deutlich zu sehen, dass die Abluft, also die Luft, die den Raum verlässt, nahezu konstant bei 22 °C liegt. Die Außenluft, die von außen in die Anlage einströmt, liegt im Tagesgang bei etwa 6 bis 9 °C. Durch die Wärmerückgewinnung in der kontrollierten Wohnraumlüftung wird der Abluft Wärme entzogen und als Fortluft nun ins Freie geleitet. Die Temperatur der Fortluft liegt bei 9 bis 12 °C. Die entzogene Wärme wird im Wärmetauscher der Außenluft zugeführt und der Luftstrom, nun als Zuluft bezeichnet, wieder in die Räume eingeleitet. Dieser Zuluft-Luftstrom hat eine Temperatur von etwa 18 bis 19 °C. Bei kontrollierten Wohnraumlüftungen ist in der Regel ein elektrischer Nachheizer verbaut, um die dem Raum zugeführte Luft nicht zu kalt hineinzublasen und damit die Heizlast an kalten Tagen zu erhöhen. Im *Projekthaus Ulm* ist hingegen ein Enthalpiewärmetauscher verbaut. Durch die Nutzung der latenten Wärme in der Abluft kann auf ein Heizregister verzichtet werden.

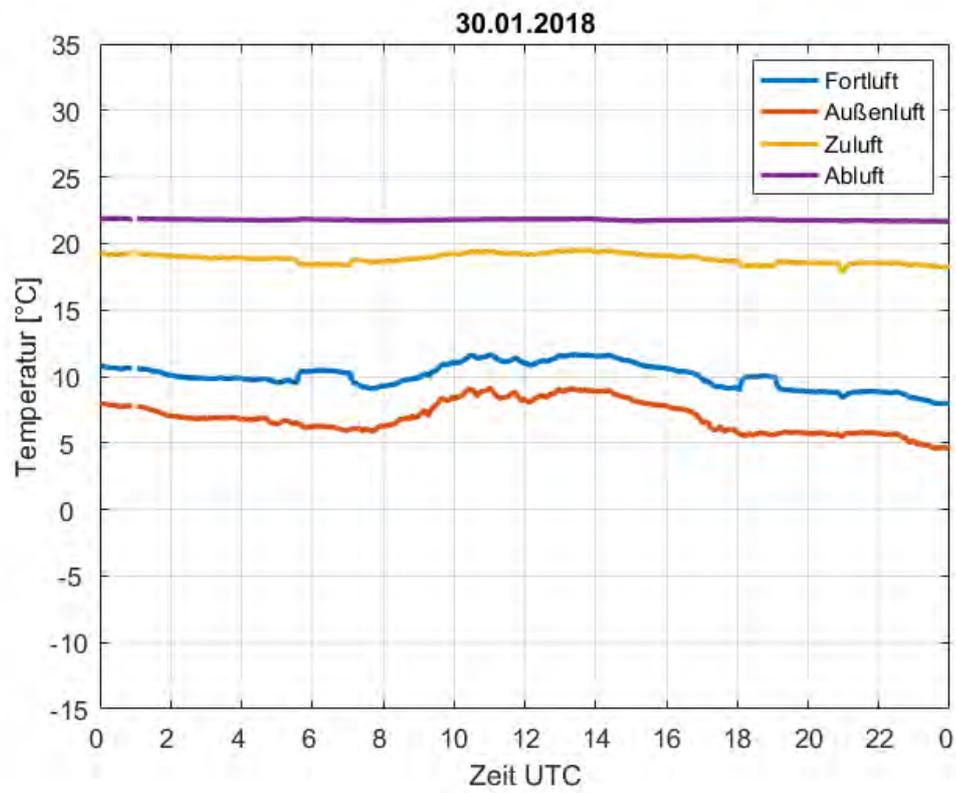


Abbildung 14: Temperatur-Zeitreihe der kontrollierten Wohnraumlüftung im *Projekthaus Ulm* am 30.01.2018.

Die mittlere Rückwärmzahl bezogen auf die Außenluft liegt für diesen Tag bei 0,8, d.h. dass 80 % der Wärme der aus den Räumen abgesaugten Abluft der eingeblasenen Zuluft wieder zugeführt werden konnte. Während der Wintermonate Oktober 2017 bis März 2018 lag die auf die Außenluft bezogene Rückwärmzahl im Mittel bei 79,5 % (Minimum 78 %, Maximum 83 %). Die mittleren Monatstemperaturen lagen in einem Bereich von 9,8 °C im Oktober bis zu -3,15 °C im Februar [10].

Die Ermittlung der Rückfeuchtezahlen wurde nicht durchgeführt, da während der Wintermonate durch einen Luftwäscher eine zusätzliche Feuchtequelle innerhalb des Gebäudes betrieben wurde und dies die Ergebnisse verfälscht. Der Luftwäscher wurde auf Wunsch der Bewohner betrieben, um die Luftfeuchtigkeit in den Bereich innerhalb des Behaglichkeitsbereichs zu erhöhen. Während der Wintermonate stellte sich ansonsten eine sehr trockene und unbehagliche Luft ein.

Während des Betriebs der kontrollierten Wohnraumlüftung im *Projekthaus Ulm* konnten noch verschiedene Nutzungs- und Lüftungsstrategien getestet werden, die im Folgenden aufgeführt sind. Diese können, aufgrund der Befragung und Untersuchung, von nur einer Familie in einem Gebäude, nicht repräsentativ sein, bieten jedoch eine erste Grundlage für Empfehlungen an andere Bewohner von Gebäuden mit kontrollierten Wohnraumlüftungen.

**Lüften nach dem Duschen/Baden** Die gesamte Familie, die das *Projekthaus Ulm* bewohnt, nutzt das Badezimmer meist in einem kurzen Zeitraum zum Duschen/Baden. Daraus ergibt sich eine sehr warme und feuchte Luft in diesem Raum. Durch vorübergehendes Einstellen der kontrollierten Wohnraumlüftungen auf maximale Stufe (im Falle des *Projekthaus Ulm* bedeutet dies einen Volumenstrom von etwa 500 m<sup>3</sup>/h) wird innerhalb kurzer Zeit wieder ein angenehmes Raumklima erreicht. Die dem Raum entzogene Wärme verbleibt durch die Wärmerückgewinnung im Gebäude.

**Lüften nach dem Kochen** Während des Kochens können trotz installierter und betriebener Ablufthaube Gerüche im Wohnbereich entstehen. Durch gezieltes Einstellen der kontrollierten Wohnraumlüftungen auf maximale Stufe wird die Ablufthaube unterstützt und die Gerüche innerhalb kürzester Zeit ins Freie geleitet.

**Kühlfunktion** Bei Feiern im Innenraum wirken durch die hohe Anzahl an Personen im Wohnbereich zusätzliche Wärmequellen und die Raumtemperatur steigt an. Ein ruhig sitzender Mensch gibt bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C einen Wärmestrom von

etwa 100 W ab, d.h. eine Party mit 10 Gästen führt zu einer zusätzlichen Wärmequelle von 1 kW. Bei Betätigung steigt der Wärmestrom und kann bei mittelschwerer Arbeit (abhängig von der Party) auch das Doppelte betragen. Mittels der Bypassfunktion wird der Zuluft kühlere Außenluft zugeführt und der Raum gekühlt. Im gleichen Prinzip wird im Sommer mit der Bypassfunktion nachts durch die kühlere Außenluft die Temperatur im Gebäude gesenkt. Diese Wirkung ist natürlich umso größer, desto kühler die Nacht ist. Ein weiterer Vorteil gegenüber der Fensterlüftung ist in diesem Fall, dass Insekten (z.B. Stechmücken) wegen der Filter nicht durch die kontrollierte Wohnraumlüftung ins Gebäude gelangen können.

**Reduzierte Lüftung** Haben alle Personen das Haus verlassen, wird die Lüftungsanlage auf den Mindestvolumenstrom (im Falle des *Projekthaus Ulm* bedeutet dies einen Volumenstrom von 50 m<sup>3</sup>/h) gedrosselt, um Energie zu sparen.

### 5.3 Zusammenfassung

In heutigen Neubauten sind kontrollierte Wohnraumlüftungen nur schwer zu vermeiden. Die dichte Gebäudehülle und innere Feuchtequellen sind ohne ausreichende Lüftung ein Risiko für Schimmelbildung. Um die Energieeffizienz nicht zu verschlechtern, sind kontrollierte Wohnraumlüftungen mit Wärmerückgewinnungssystemen ausgestattet. Dieses System vermeidet im Winter zu hohe Wärmeverluste durch das Lüften, indem es die angesaugte Außenluft mit der Wärme der Abluft vorwärmt.

Die Wärmerückgewinnung wurde anhand der installierten Messtechnik im *Projekthaus Ulm* untersucht. Die Rückwärmezahl lag während der Monate Oktober 2017 bis März 2018 im Mittel bei 79,5% und damit deutlich über den Empfehlungen in der Literatur [32].

Während der Projektlaufzeit wurden verschiedene Benutzungs- und Lüftungsstrategien getestet, die zwar nicht repräsentativ sein können, jedoch eine erste Grundlage für Empfehlungen an andere Bewohner von Gebäuden mit kontrollierten Wohnraumlüftungen bieten.

## 6 Simulation von PV-Anlage und Luftwärmepumpe im Bestand

Im Rahmen des Projektes wurde die Nutzung der PV-Luftwärmepumpen-Kombination auch für zwei Bestandsgebäude anhand von Simulationen geprüft. Die Gebäude, Simulationen und Ergebnisse sind im Folgenden beschrieben.

## 6.1 Kommunales Gebäude

In Zusammenarbeit mit der Stadt Ulm wurde ein kommunales Gebäude untersucht, ob anstelle der verwendeten Gas-Brennwert-Technologie eine Luftwärmepumpe mit PV-Anlage hätte zur Anwendung kommen können.

### 6.1.1 Beschreibung des Gebäudes

Bei dem Gebäude handelt es sich um ein kommunales Nichtwohngebäude, Baujahr 2016, mit einer Netto-Raumfläche von 1430 m<sup>2</sup>, die auf zwei Stockwerken verteilt ist. Es wird als Kindergarten und Schulgebäude genutzt. Die normative Auslegungs-Heizlast nach DIN EN 12831 [27] beträgt 31,6 kW bei einer Außentemperatur von -14 °C. Auf dem Gebäude befindet sich eine PV-Anlage mit einer Nennleistung von 23,4 kW.

### 6.1.2 Datengrundlage

Die erzeugte elektrische Arbeit der PV-Anlage und der Stromverbrauch des Gebäudes am Hauseingang sind über das PV-Monitoringsystem erfasst. Abbildung 15 zeigt den gemessenen, täglichen Strombedarf des Gebäudes für das Jahr 2017. Deutlich sind die höheren Verbräuche unter der Woche zu erkennen, während der Verbrauch an den Wochenenden deutlich niedriger ist.

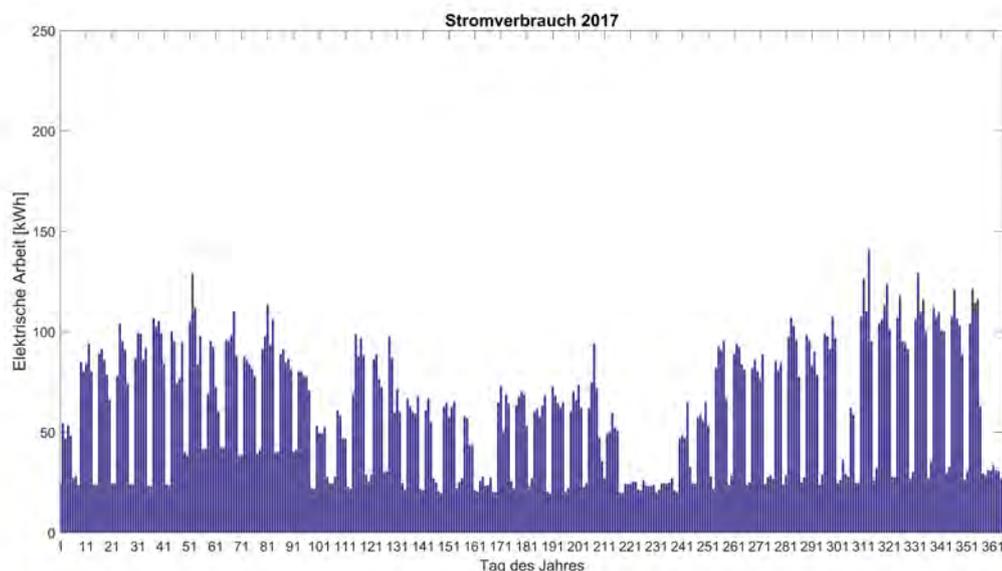


Abbildung 15: Täglicher Strombedarf des kommunalen Gebäudes für das Jahr 2017.

Die für die Heizungssimulation notwendige Außentemperatur wurde von der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes in Ulm entnommen [10].

### 6.1.3 Simulation

Um den notwendigen Stromverbrauch einer Luftwärmepumpe für das Gebäude zu ermitteln, wurde eine einfache Simulation erstellt. Das Schema des Simulationsmodells ist in Abbildung 16 dargestellt. Aus den Außentemperaturwerten wird die mittlere Tagestemperatur gebildet. Basierend auf den Werten der Heizlastberechnung und dem skalierten Verhalten des *Projekthauses Ulm* wird der tägliche Wärmebedarf des Gebäudes ermittelt und durch die ermittelte AZ der Luftwärmepumpe dividiert. Es ergibt sich somit die benötigte elektrische Arbeit pro Tag. Die Messwerte des PV-Anlagen-Monitorings liefert die tägliche Strommenge der PV-Anlage. Die Differenz daraus ist die Bilanz der Kombination der PV-Anlage mit der Luftwärmepumpe. Positive Zahlenwerte entsprechen einer Unterdeckung des benötigten Stroms für die Heizung durch die PV-Anlage, es wird zusätzlich Strom aus dem Netz benötigt. Negative Zahlen bedeuten eine Überdeckung, d.h. eine Überschusseinspeisung. Der Stromverbrauch des Gebäudes wird anschließend addiert. Die Gleichzeitigkeit der PV-Anlage und der Luftwärmepumpe wird in erster Näherung vernachlässigt.

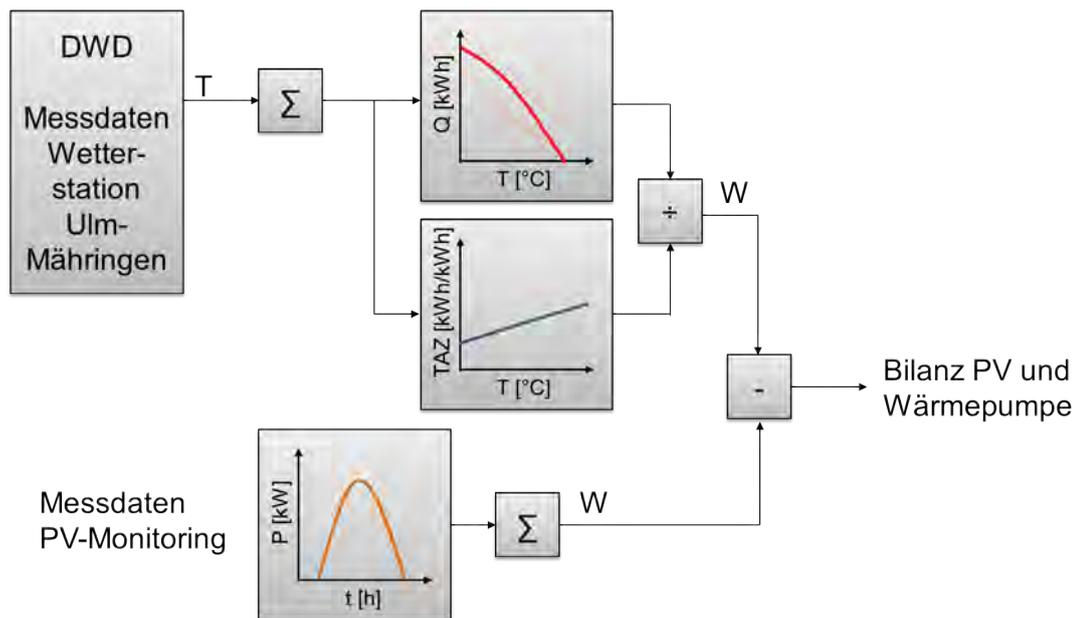


Abbildung 16: Simulationsmodell zur Abschätzung des Strombedarfs der Luftwärmepumpe und der PV-Bilanz.

### 6.1.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation für das Jahr 2017 sind in Abbildung 17 gezeigt. Die blauen Säulen zeigen den täglichen Strombedarf der Luftwärmepumpe. Die gelben Säulen zeigen die gemessenen, erzeugten Strommengen der PV-Anlage. Deutlich sind die Tage mit hohem Strombedarf (und somit Wärmebedarf) am Anfang des Jahres zu erkennen. Wie

zu erwarten, nehmen diese zum Sommer hin ab und steigen erst im Herbst wieder an. Die PV-Erträge entwickeln sich dazu genau gegenläufig. Auch ist zu erkennen, dass die höchsten Erträge nicht ausreichen, um den Strombedarf an den kältesten Tagen bilanziell zu decken.

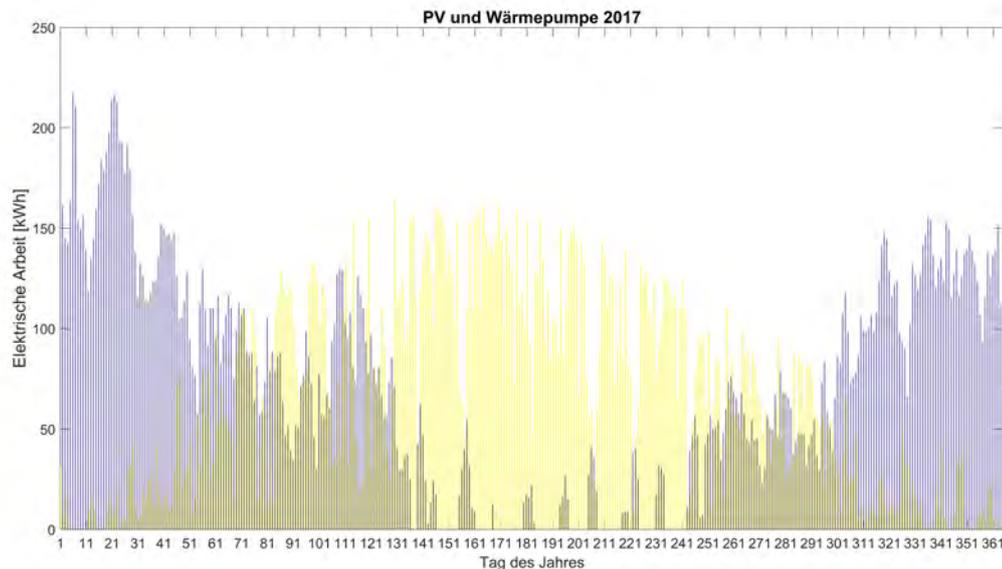


Abbildung 17: Jahresverlauf des Strombedarfs der Luftwärmepumpe (blau) und des PV-Ertrags (gelb) für das Jahr 2017.

Der Einsatz der Luftwärmepumpe würde für das untersuchte Jahr eine elektrische Arbeit von etwa 26 MWh benötigen, während der Bedarf des Gebäudes bei 22 MWh liegt. Die JAZ liegt nur bei 2,25. Der Strombedarf würde sich somit mehr als verdoppeln. Die installierte PV-Anlage hat 2017 einen Jahresertrag von 24 MWh geliefert. Bilanziell erzeugt das Gebäude also genauso viel Strom wie es über ein Jahr benötigt, die Gleichzeitigkeit zwischen Erzeugung und Bedarf ist dabei nicht berücksichtigt. Für eine Luftwärmepumpe ist die erzeugte, elektrische Arbeit zu gering.

Der spezifische PV-Ertrag liegt bei 1.032 kWh/kW und somit im Bereich des regionalen Durchschnitts von 1.035 kWh/kW [33]. Die Eigenverbrauchsquote liegt bei 43 % während der Autarkiegrad 23 % beträgt.

### 6.1.5 Zusammenfassung

Im Rahmen der Datenanalyse und Simulation wurde auf Wunsch der Stadt Ulm die PV-Anlage beurteilt. Basierend auf den Messwerten des Jahres 2017 ist die Performance der PV-Anlage vergleichbar mit anderen Anlagen in der Region. Die Jahreserzeugung deckt bilanziell den Jahresverbrauch, jedoch bieten sich auf Grund der Gleichzeitigkeit und der

Grundlast voraussichtlich noch Optimierungspotenziale. Eine Analyse der Grundlast wird empfohlen.

Die Analyse des Heizungskonzepts zeigt, dass eine Luftwärmepumpe als Heizsystem den Strombedarf des Gebäudes voraussichtlich verdoppeln würde. Die bestehende PV-Anlage würde nur bedingt den Mehrverbrauch kompensieren. Eine Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur Gas-Brennwertheizung ist daher fraglich. Eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde nicht durchgeführt.

## 6.2 Doppelhaushälfte

### 6.2.1 Beschreibung des Gebäudes

Bei dem untersuchten Wohnhaus handelt es sich um eine Doppelhaushälfte. Die beheizte Gebäudefläche<sup>5</sup> beträgt 178 m<sup>2</sup>, das Baujahr ist 1989 und das Gebäude wird seither von einer Familie in Miete bewohnt. Dies sorgt für eine konsistente Datengrundlage, da angenommen werden kann, dass sich die Nutzergewohnheiten nicht grundlegend verändert haben. Die bisherige Heizungsanlage ist eine Ölheizung und es ist keine PV-Anlage installiert.

Von den Bewohnern wurden die Rechnungen für Heizöl und Strom der vergangenen Jahre zur Auswertung zur Verfügung gestellt. Der elektrische Verbrauch der letzten drei Jahre lag im Mittel bei ca. 5.000 kWh. Anhand des Heizölverbrauchs konnte der jährliche, spezifische Wärmebedarf auf 120 kWh/m<sup>2</sup>a geschätzt werden und entspricht dem damaligen Baustandard nach der zweiten Wärmeschutzverordnung von 1982. Anhand der Vollbenutzungsstunden nach der Norm VDI 2067-2 [35] von 2.243 h/a und des durchschnittlichen, klimabereinigten Wärmebedarfs kann eine Heizleistung von 10,4 kW angenommen werden.

### 6.2.2 Simulation

Die Simulation des PV-Systems erfolgte mit Hilfe der kommerziellen Software PV\*SOL premium 2019 (R5). Anhand der Luftbilder wurde ein georeferenziertes 3D-Modell des Gebäudes und der Garage erstellt (Abbildung 18). Auf die Modellierung benachbarter Gebäude für die Verschattungsanalyse konnte aufgrund der Topographie (abfallendes Gelände, große Abstände, zurückversetzte Nachbargebäude) verzichtet werden. Die Verschattung der Garage durch das Gebäude ist in der Simulation berücksichtigt. Die PV-Anlage mit einer Gesamtleistung von 7,92 kW wurde mit zwei Generatorfeldern (24 Module vom Typ GS240p, dachparallel auf der Wohnhaushälfte 39° Neigung, Ausrichtung 160° und 9 Module vom Typ GS240p auf der Garage aufgeständert, 15° Neigung, Ausrichtung 179°) modelliert.

---

<sup>5</sup>Definiert als Netto-Raumfläche nach DIN 277 [34], d.h. inklusive Nutzungs-, Technik- und Verkehrsflächen



Abbildung 18: 3D-Simulationsmodell des Gebäudes und der Garage. Auf die Modellierung benachbarter Gebäude für die Verschattungsanalyse konnte aufgrund der Topographie (abfallendes Gelände, große Abstände, zurückversetzte Nachbargebäude) verzichtet werden.

Durch Module mit höherer Leistung könnte die Gesamtleistung der PV-Anlage noch weiter erhöht werden. Die Eingangsdaten sind die gängigen Klimadaten aus der Region. Für die Wechselrichter wurden SolarEdge Wechselrichter (SE3000H bzw. SE2200) mit Leistungsoptimierern<sup>6</sup> angenommen.

Anhand der vorgegebenen klimatischen Bedingungen und den Erfahrungen des Betriebsregimes der Luftwärmepumpe aus dem *Projekthaus Ulm*, wurde ein stundenaufgelöstes Lastprofil der Luftwärmepumpe für PV\*SOL erzeugt. Der Jahresstromverbrauch der Luftwärmepumpe ist mit 10.813 kWh berechnet, welcher anhand der täglichen, außentemperatur abhängigen AZ den Jahreswärmebedarf von insgesamt 24.408 kWh/a deckt. Dies ergibt eine Systemarbeitszahl (inkl. Heizstab) von 2,3. Zusammen mit dem Stromverbrauch für den Haushalt von etwa 4.900 kWh beträgt der solare Deckungsanteil 23,1%. Die maximale Spitzenlast beträgt laut Simulation 18,5 kW.

### 6.2.3 Wirtschaftlichkeit

Aufgrund des Alters der Heizungsanlage und der Anforderungen auf Nachrüstung bei Anlagen nach §10 EnEV [29] wird in den nächsten Jahren eine neue Heizungsanlage notwen-

<sup>6</sup>Leistungsoptimierer werden an jedes PV-Modul angeschlossen und steigern den Energieertrag von PV-Anlagen, indem der Punkt der maximalen Leistungsabgabe (MPPT) für jedes Modul einzeln gesucht wird. Dies ist insbesondere kleinen Dachflächen mit verschiedenen Ausrichtungen oder komplexen Verschattungen (Bäume, Giebel, Schornstein, SAT-Schüssel etc.) vorteilhaft. Die Leistungsoptimierer führen jedoch zu höheren Investitionskosten gegenüber Stranganlagen.

dig. Im Rahmen dieser Untersuchung soll eine Luftwärmepumpe, die Kombination einer PV-Anlage mit Luftwärmepumpe sowie eine Gas-Brennwert-Heizung verglichen werden. Eine Versorgung von Fernwärme ist in diesem Gebiet nicht vorhanden und wird auch in absehbarer Zeit nicht errichtet. Eine neue Öl-Heizung wird aus ökologischen Gründen nicht betrachtet.

Als spezifische Installationskosten der PV-Anlage wurden 1.500 €/kW aufgrund eines vorliegenden Angebots vom *Projekthaus Ulm* angenommen. Dieser Wert wurde durch vergleichbare Installationen in der Region validiert. Die gesamten Investitionskosten für die PV-Anlage sind 11.880 €. Aus den Investitionskosten und dem durchschnittlichen Jahresertrag ergeben sich Stromgestehungskosten von 0,07 €/kWh und eine Amortisation der PV-Anlage in 8,9 Jahren.

Die Investitionskosten der Luftwärmepumpe werden anhand eines Richtpreisangebots eines Handwerkers mit 18.240 € angenommen. Darin sind die Kosten für die Demontage und Entsorgung der vorhandenen Ölheizung, der Luftwärmepumpe als neuer Wärmeerzeuger, der notwendige Austausch<sup>7</sup> der vorhandenen Gliederheizkörper durch Plattenheizkörper, das notwendige Installationsmaterial und der Arbeitsaufwand enthalten.

Für die jährlichen Betriebskosten wird ein Wartungsvertrag über 300 € brutto angenommen. Die Grundkosten für den Stromanschluss und den Messstellenbetrieb werden nicht der Luftwärmepumpe zugeordnet. Hinzu kommen noch die Kosten für die elektrische Arbeit, die mit 23,63 ct/kWh brutto angenommen sind. Die Grundgebühr für den Stromanschluss ist nicht berücksichtigt.

Die Investitionskosten für die Demontage der alten Ölheizung und Installation der neuen Gasheizung betragen insgesamt 16.253,18 € netto. Davon werden für das Errichten der Hausanschlussleitung 2.254 € angenommen, basierend auf eine Leitungslänge von 14 m und Kosten von 161 € pro m für eine Leitung bis DN 40 inklusive Wiederherstellung der Oberfläche [36]. Zusätzlich kommen noch Kosten für den Gasanschluss und die Inbetriebsetzung von 1.990 € dazu. Die jährlichen Betriebskosten von 257,79 €, setzen sich aus dem Grundpreis für Gas-Anschluss (153,00 €), den Messstellenbetrieb (29,16 €), den Schornsteinfeger, die Abgasuntersuchung und die Kondensat-Neutralisation zusammen. Zur Teilerfüllung der Anforderungen des EWärmeG wird Erdgas mit 10 % Biomethan bezogen. Der jährliche Grundpreis liegt bei 182,07 € brutto und der Arbeitspreis beläuft sich auf 6,76 ct/kWh brutto.

---

<sup>7</sup>Bei Verringerung der Vorlauftemperatur müssen die Flächen der Heizkörper vergrößert werden, um die notwendige Wärmeleistung weiterhin zu gewährleisten.

### 6.2.4 Ergebnisse

Der simulierte Jahresertrag sind 9.054 kWh (spezifischer Jahresertrag 1.143 kWh/kW<sub>p</sub>, Anlagennutzungsgrad (PR) 90,7 %), davon werden 5.268 kWh eingespeist und 3.654 kWh direkt im Gebäude verbraucht. Die Einspeiseleistung wird auf 70 % der DC-Leistung am Netzverknüpfungspunkt begrenzt. Die Abregelung am Einspeisepunkt beträgt 133 kWh. Dieser Energiefluss ist in Abbildung 19 dargestellt.

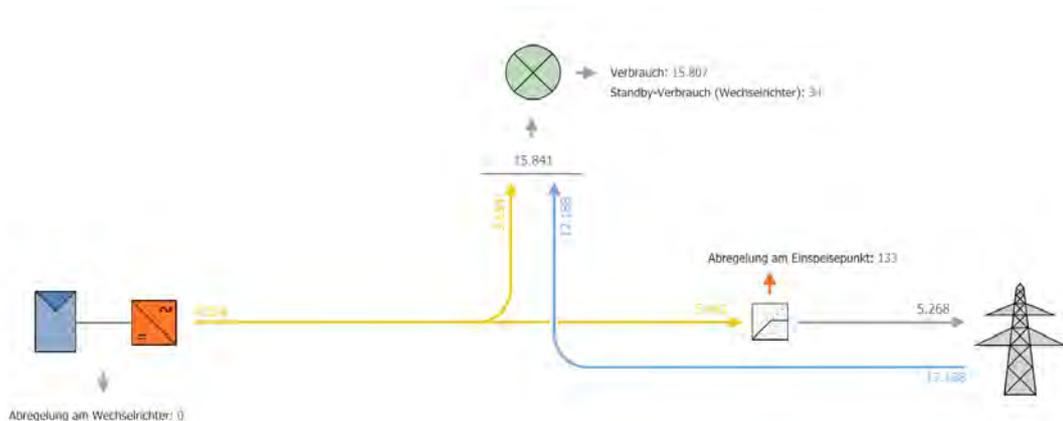


Abbildung 19: Energieflussdiagramm des untersuchten Wohnhauses unter der Annahme einer PV-Anlage und einer Luftwärmepumpe.

Der Eigenverbrauchsanteil beträgt daher 40,4 %. Neben der konservativen Moduldegradation von 20 % Ertragsverlust über 20 Jahre [37] wirkt sich die Abschattung als zusätzliche Ertragsminderung von 7,4 % p.a. aus.

Abbildung 20 zeigt die monatliche Prognose des Ertrags und des Verbrauchs aus der Simulation. Positive Werte entsprechen hierbei der Erzeugung der PV-Anlage (gelb) bzw. Netzbezug (hellblau), während negative Werte dem Verbrauch (grau) oder der Netzeinspeisung (dunkelblau) entsprechen. Deutlich zu sehen ist der höhere Bedarf in den Wintermonaten, vor allem aufgrund der Luftwärmepumpe. Die PV-Erzeugung hat ihr Maximum in den Sommermonaten. Dennoch trägt auch die PV-Anlage in den Wintermonaten während der Heizperiode zur Deckung des Bedarfs der Luftwärmepumpe bei und es werden die geringen verbleibenden Energiemengen in das öffentliche Netz eingespeist.

Eine deutlichere Gegenüberstellung der Deckung des Verbrauchs zeigt Abbildung 21. Darin wird der Anteil der PV-Anlage und des Netzbezugs aufgezeigt. Die Abregelungsverluste und Netzeinspeisungen sind nicht dargestellt. Aufgrund der niedrigeren Temperaturen bei guten Einstrahlungswerten sind die Erträge der PV-Anlage im Frühjahr höher als im Sommer.

Die Wirtschaftlichkeit wird über einen Zeitraum von 20 Jahren betrachtet (siehe Kapitel 7). Die angenommenen Preissteigerungsraten sind in Kapitel 2.3.4 aufgeführt.

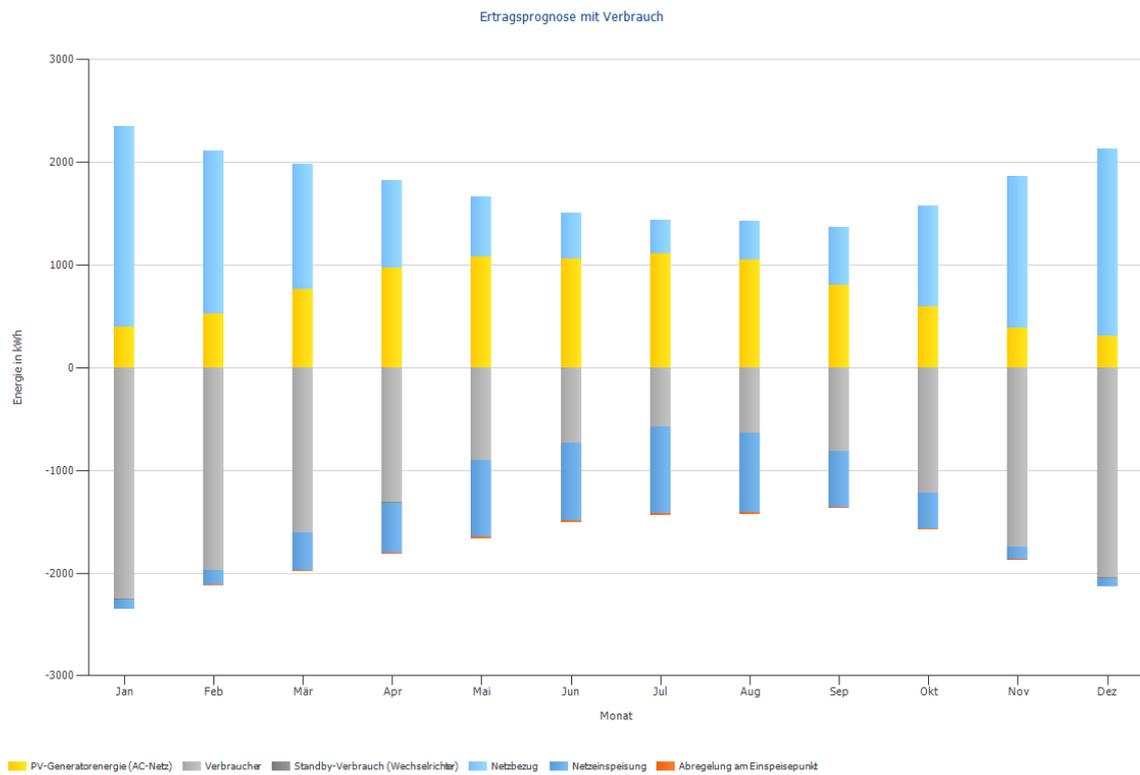


Abbildung 20: Ertragsprognose der PV-Anlage mit Verbrauch. Positive Werte entsprechen der Erzeugung durch die PV-Anlage (gelb) bzw. Netzbezug (hellblau), während negative Werte dem Verbrauch (grau) oder der Netzeinspeisung (dunkelblau) entsprechen.

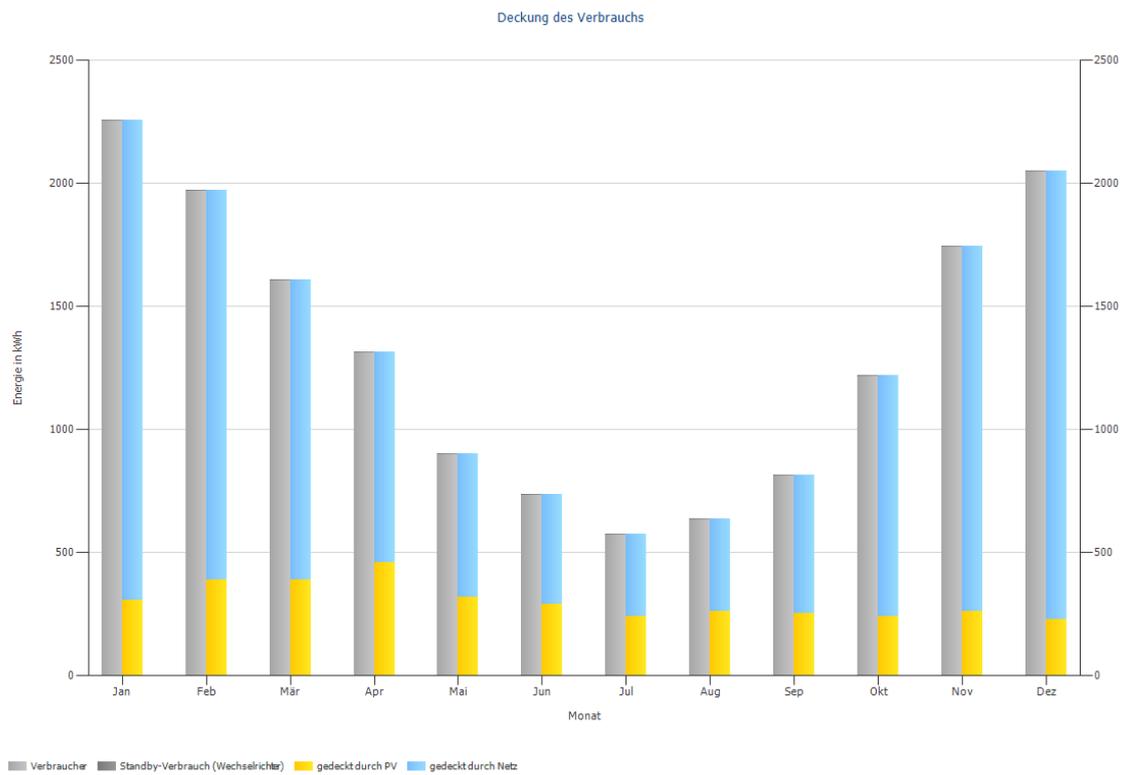


Abbildung 21: Deckung des Verbrauchs (grau) durch die PV-Anlage (gelb) bzw. Netzbezug (hellblau).

Abbildung 22 zeigt die Entwicklung der verschiedenen Energiekosten für die drei untersuchten Varianten. Die höchsten Energiekosten während des Untersuchungszeitraums entfallen auf die Luftwärmepumpe. Die Variante der Luftwärmepumpe mit PV-Unterstützung liegt im Mittelfeld der Energiekosten. Der Anteil des PV-Stroms mit seinen konstanten Gestehungskosten wirkt sich dämpfend auf den Preisanstieg aus und senkt die Kosten im Vergleich zu einer Luftwärmepumpe ohne PV-Anteil. Im Sinne der jährlichen Energiekosten ist die Gasheizung am günstigsten. Die angenommene Preissteigerung ist zwar höher als die der Luftwärmepumpe mit PV-Strom, jedoch sind auch am Ende der 20-jährigen Betrachtungsperiode die Energiekosten noch geringer als die der PV-Luftwärmepumpen-Kombination.

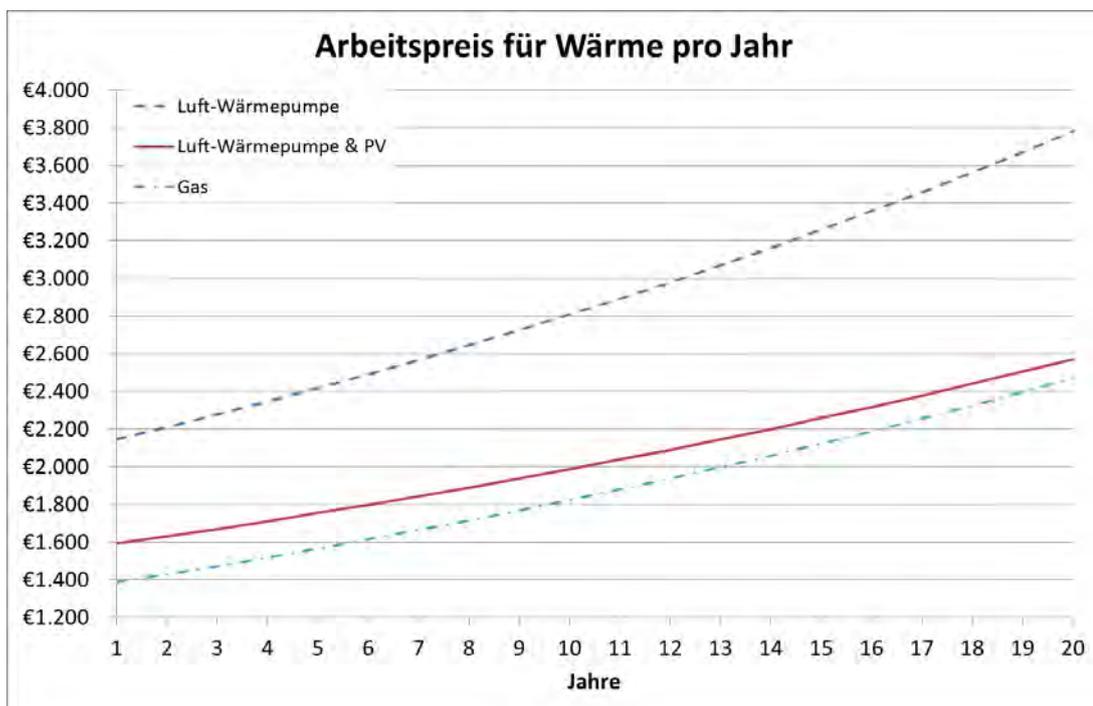


Abbildung 22: Entwicklung der Energiekosten über einen Zeitraum von 20 Jahren für die untersuchten Heizungssysteme.

Der Bezug der Jahresgesamtkosten auf die jährliche Nutzwärme ergibt die Gestehungskosten für Wärme je Anlage. Die Gestehungskosten beschreiben die durchschnittlichen Kosten für die lokale Bereitstellung einer kWh Wärmeenergie. Die Jahresgesamtkosten setzen sich aus den folgenden Kosten zusammen:

- kapitalgebundene Kosten (aus Kapital- und Instandhaltungskosten),
- verbrauchsgebundene Kosten (Kosten für Brennstoffe, Hilfsenergie, Ascheentsorgung und sonstige Betriebsstoffe),
- betriebsgebundene Kosten (Kosten für Personal, Emissionsmessungen, Wartungs-

verträge),

- sonstige Kosten (z.B. Kosten für Versicherung, Pacht, usw.).

Die Gestehungskosten mit den Simulationsparametern (PV-Stromanteil 40%) sind in Abbildung 23 dargestellt. Dabei ist eine Luftwärmepumpe ohne PV-Unterstützung mit 0,166 €/kWh die teuerste Heizungsvariante, gefolgt von der Kombination aus PV-Anlage und Luftwärmepumpe (0,131 €/kWh). Die geringsten Gestehungskosten hat die Gas-Heizung (0,121 €/kWh).

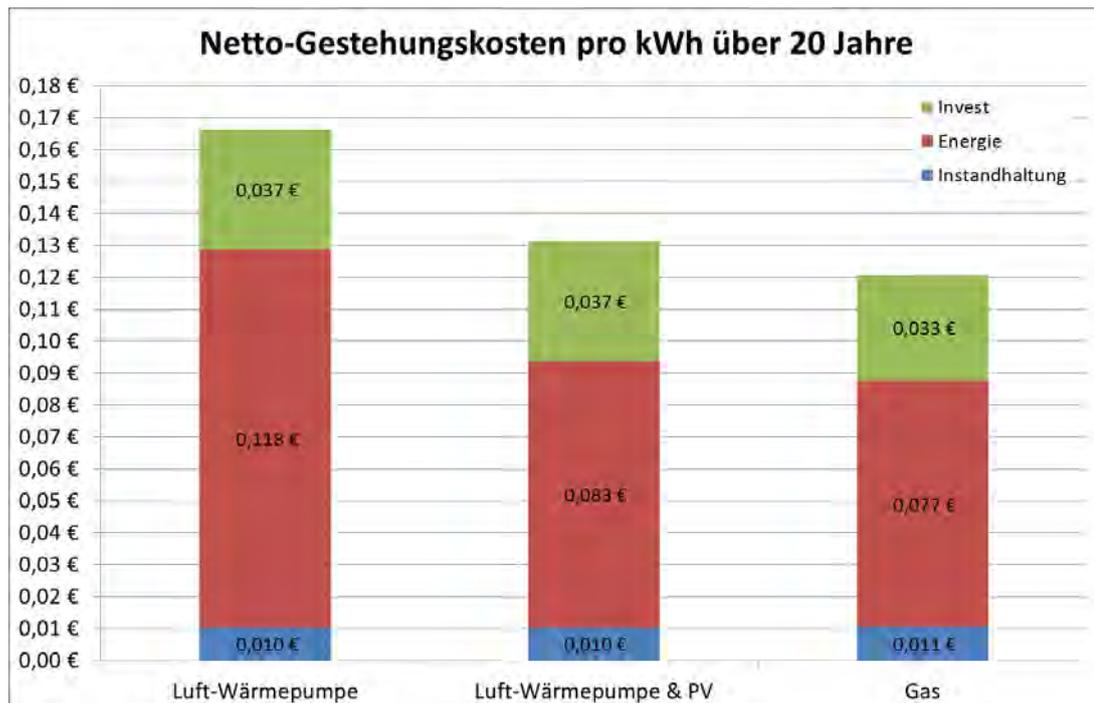


Abbildung 23: Gestehungskosten pro kWh Wärmeenergie für die untersuchten Heizungs-systeme für einen Zeitraum von 20 Jahren. Es werden die jährlichen Energiekosten sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten berücksichtigt. Es werden 40% des PV-Stroms genutzt.

Unter der Annahme, dass die Verbraucher direkt die Kosten für die  $\text{CO}_{2,\text{äq}}$ -Emissionen bezahlen müssten, würde dies bei einem mittleren Preis von 9,45 €/t zu einer Erhöhung der Gestehungskosten von etwa 0,002 €/kWh führen (Jährliche Mehrbelastung von ca. 40 bis 63 €/a). Bei einem zukünftig angestrebten Preis von 35 €/t würden die Gestehungskosten um 0,006 bis 0,01 €/kWh steigen (jährliche Mehrbelastung von ca. 150 bis 235 € p.a.).

### 6.2.5 Zusammenfassung

Eine Luftwärmepumpe ohne PV-Unterstützung ist im vorliegenden Beispiel nicht die wirtschaftlichste Lösung. Grund hierfür sind die hohen Energiekosten und die höheren

Investitionskosten, um die Heizungsinstallation im Gebäude zu ertüchtigen (Austausch Gliederheizkörper durch Plattenheizkörper). Durch die Ergänzung mit einer PV-Anlage und deren niedrigeren Gestehungskosten für den elektrischen Strom sinken die Energiekosten. Die Investitionskosten für die Heizungsanlage bleiben jedoch konstant. Wie oben ausgeführt, ist die Doppelhaushälfte vermietet und es stellt sich die Frage nach der Umsetzbarkeit der PV-Anlage. Rein technisch sind hierbei keine Probleme zu erwarten. Es stehen unter dem Aspekt des „Mieterstroms“ jedoch verschiedene rechtliche Herausforderungen und Rechtsunsicherheiten sowie ein administrativer Mehraufwand dem Mehrwert entgegen, unabhängig ob der Hauseigentümer die PV-Anlage erbaut und betreibt oder die Mieter das Dach mieten und eine eigene PV-Anlage errichten. Die Sanierung mit einem Gas-Brennwertgerät hat noch geringere Gestehungskosten. Hinzu kommt, dass es keine weiteren Umbaumaßnahmen in der bestehenden Heizungsanlage (z.B. Heizkörper) gibt. Jedoch sind die Vorlauftemperaturen höher.

## 7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verschiedener Heizungssysteme

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Kostenbetrachtung für unterschiedliche Heizungssysteme für moderne Einfamilienhäuser in der Ulmer Region vorgestellt. Dabei werden explizit lokale Daten für die Lufttemperatur und solare Erträge sowie Messdaten des *Projekthauses Ulm* genutzt, um Aussagen für die Region zu treffen. Dies soll die Unsicherheiten reduzieren. Zur Validierung werden die ermittelten Ergebnisse mit anderen Publikationen [z.B. 38] verglichen und überprüft.

Die ausführlichen Ergebnisse sowie die Datengrundlage und Methoden werden im separaten Bericht [39] erläutert.

Es werden sieben verschiedene Varianten untersucht. Dazu zählen die reinen Heizsysteme Luftwärmepumpe, Pelletheizung, Fernwärme, Gasheizung, Ölheizung, die Kombination einer Luftwärmepumpe mit PV-Anlage und die Kombination der Luftwärmepumpe mit PV-Anlage und einem Pelletofen. Bei den Kombinationen der Luftwärmepumpe mit PV-Anlage werden 40 % des Strombedarfs der Luftwärmepumpe durch die PV-Anlage gedeckt. Die siebte Variante 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 Luftwärmepumpe mit 40 % anteiligem PV-Strom bereitgestellt.

### 7.1 Energiekosten

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

Alle Energiekosten unterliegen jährlichen Preissteigerungen (siehe Kapitel 2.3.4). Die Ausnahme hiervon sind die Gestehungskosten der PV-Anlage, die als konstant betrachtet werden. Die zur Verfügung stehende Energiemenge unterliegt jedoch jährlichen Schwankungen, aufgrund der solaren Einstrahlung und der wetterbedingten Variabilität.

Die Entwicklung der verschiedenen Energiekosten ist in Abbildung 24 dargestellt. Die Energiekosten der Luftwärmepumpe sind zu Beginn des Untersuchungszeitraums die höchsten. Erst gegen Ende des betrachteten Zeitraums werden diese von den Energiekosten der Ölheizung überstiegen. Aufgrund des angenommenen stärkeren Preisanstiegs für Heizöl hat die Ölheizung am Ende der betrachteten 20 Jahre die höchsten Energiekosten. 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 Energiekosten an fünfter Position.

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

Die Energiekosten der Kombination aus PV-Anlage, Luftwärmepumpe und Pelletofen sind, aufgrund der höheren Anteile günstiger Pellets, niedriger.

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

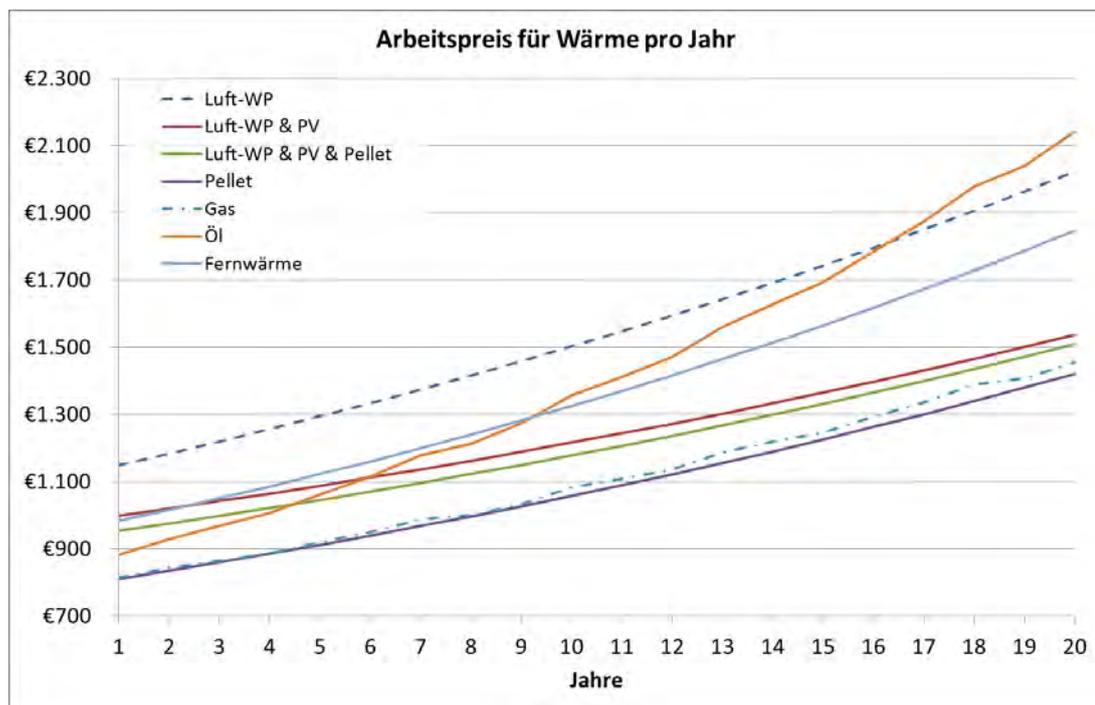


Abbildung 24: Entwicklung der Energiekosten über einen Zeitraum von 20 Jahren für verschiedene Heizungssysteme.

## 7.2 Gestehungskosten

Die Gestehungskosten beschreiben die durchschnittlichen Kosten für die lokale Bereitstellung einer kWh Wärmeenergie und berechnen sich aus den durchschnittlichen jährlichen Kosten geteilt durch die durchschnittliche jährliche Wärmeenergie. Hierbei fließen neben

den jährlichen Energiekosten auch die Kosten für die Investition und Wartungs- sowie Instandhaltungsarbeiten in die Berechnung ein.

Die Gestehungskosten sind in Abbildung 25 dargestellt. Die einzelnen Bestandteile an den Gestehungskosten aufgrund von Energiekosten, Instandhaltung und Investitionskosten sind aufgeführt und bieten eine Übersicht über die Hauptkostentreiber eines jeden Heizungssystems. Dabei ist eine Ölheizung mit  $0,196 \text{ €/kWh}$  die teuerste Heizungsvariante. Diese wird gefolgt von der Kombination aus PV-Anlage, Luftwärmepumpe und Pelletofen ( $0,177 \text{ €/kWh}$ ) und einer Gas-Heizung ( $0,177 \text{ €/kWh}$ ), einer Fernwärmeversorgung ( $0,171 \text{ €/kWh}$ ) und einer Pelletheizung ( $0,162 \text{ €/kWh}$ ). Die Gestehungskosten einer Luftwärmepumpe in reinem Netzstrombetrieb sind  $0,151 \text{ €/kWh}$ . Die günstigste Erzeugungsart ( $0,131 \text{ €/kWh}$ ) ist die Kombination aus Luftwärmepumpe 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 erneuten Investitionskosten sind in der Simulation über 20 Jahre nicht berücksichtigt.

Bei einer Bewertung über einen längeren Zeitraum sinken daher die spezifischen Gestehungskosten 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, daher wurde die Betrachtung auf 20 Jahre begrenzt.

In den Gestehungskosten der kombinierten Anlage mit PV-Anlage, Luftwärmepumpe 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.

### **7.3 Sensitivitätsanalyse für Luftwärmepumpen in Kombination mit Photovoltaik**

Die Sensitivitätsanalyse untersucht die Empfindlichkeit der Gestehungskosten auf kleine Änderungen der Eingangsparameter. Diese Untersuchung ist nur für die Kombination aus Luftwärmepumpe und PV-Anlage durchgeführt (Abbildung 26).

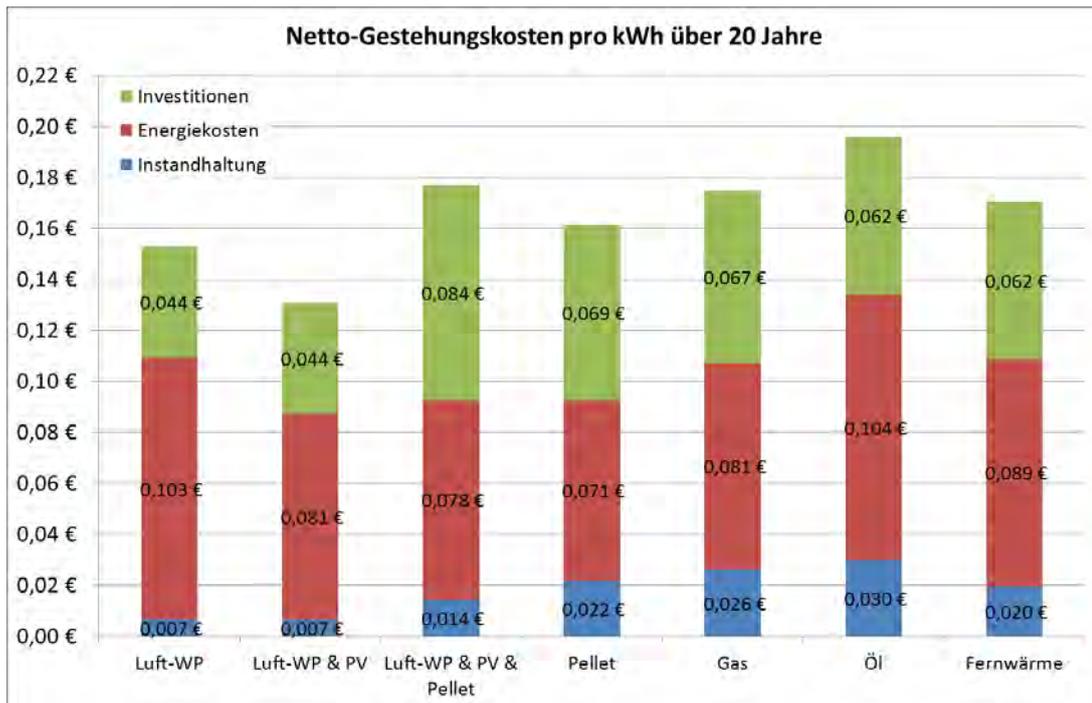


Abbildung 25: Gestehungskosten pro kWh Wärmeenergie für verschiedene Heizungssysteme für einen Zeitraum von 20 Jahren ohne Mehrwertsteuer (netto). Es werden die jährlichen Energiekosten sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten berücksichtigt. Es werden 40% des PV-Stroms genutzt.

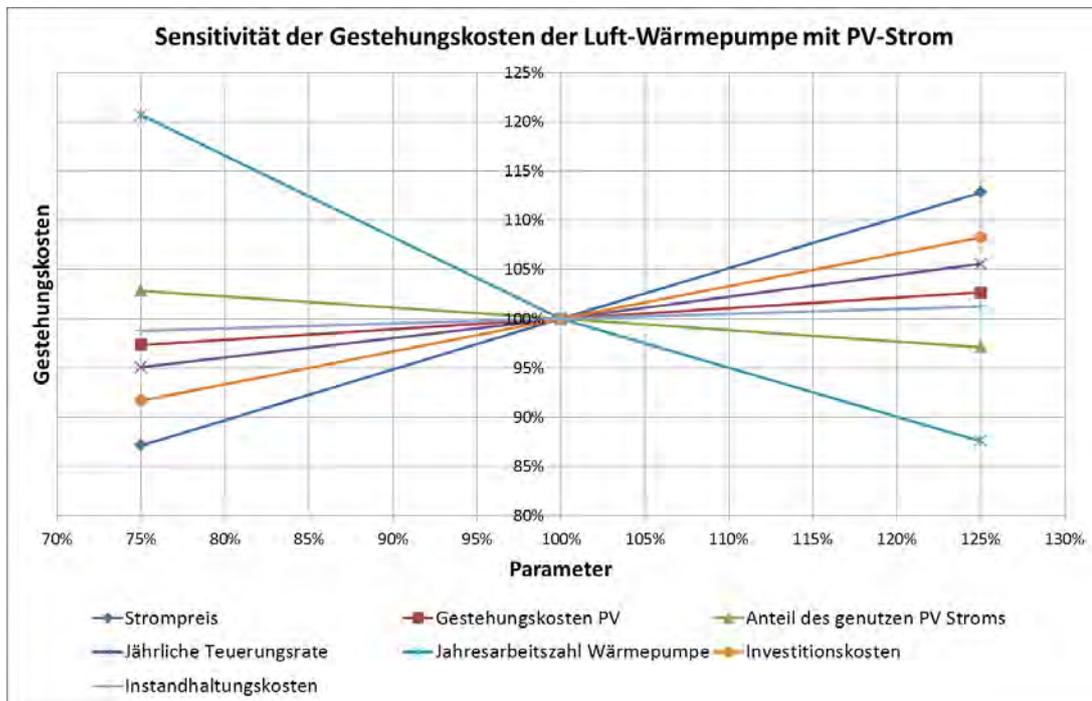


Abbildung 26: Sensitivität der Gestehungskosten pro kWh Wärmeenergie für die Kombination aus Luftwärmepumpe und PV-Anlage bei Änderungen der Eingangsparameter um 25%.

Als Eingangsparameter der Simulation zählen der Strompreis des Versorgungsunternehmens, die Gestehungskosten der PV-Anlage, der Anteil des genutzten PV-Stroms am gesamten Strombedarf der Luftwärmepumpe, die jährliche Teuerungsrate des Stroms, die JAZ, 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 werden.

Es zeigt sich, dass der Eingangsparameter mit dem größten Einfluss die JAZ der Luftwärmepumpe ist. Eine um 25% höhere JAZ senkt die Gestehungskosten um 12%, während sich eine um 25% niedrigere JAZ mit einer Erhöhung der Gestehungskosten um 21% auswirkt. Dies zeigt auch den überproportionalen Einfluss der JAZ 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 dritt wichtigste Eingangsparameter sind die Investitionskosten mit einer Änderung der Gestehungskosten von 8% für eine Parameteränderung um 25%. Die jährliche Teuerungsrate des Arbeitspreises verändert die Gestehungskosten um etwa 5% für eine Änderung von 25% des Eingangsparameters. Der Anteil des genutzten PV-Stroms und die Gestehungskosten der PV-Anlage wirken sich nur mit Änderungen von 3% auf die Gestehungskosten der Wärmeenergie aus. Die Instandhaltungskosten wirken sich mit etwa 1% nur minimal auf die Gestehungskosten aus.

## 7.4 Einfluss des Stromtarifs auf Luftwärmepumpen

Die Sensitivitätsanalyse zeigt einen großen Einfluss der Strompreise auf die Gestehungskosten einer Luftwärmepumpe. Um diese Unterschiede noch mehr zu verdeutlichen, wurden für eine Luftwärmepumpe ohne PV-Unterstützung verschiedene Stromkosten angenommen. Dabei werden die verschiedenen Tarife der SWU (Stand: Februar 2018) 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 27 zeigt die Gestehungskosten für die verschiedenen Stromtarife. Bei den Doppeltarifen wurde zusätzlich untersucht, wie sich ein Betrieb der Luftwärmepumpe ausschließlich im HT-Fenster, NT-Fenster und mittlerer Betrieb auswirkt. Die Veränderung der AZ 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, dass ein abschließlicher Betrieb im NT-Fenster (Nachts) voraussichtlich zu höheren Kosten für Wärmespeicher führen wird (der Einsatz des Elektroheizstabs wurde nicht berücksichtigt). Ein Mischbetrieb im Wärmepumpentarif ist in etwa vergleichbar mit der Referenz. Alle anderen betrachteten Fälle sind teurer als der Referenzfall mit anteiligem PV-Strom. Wie zu erwarten sind die Gestehungskosten im Grundversorgertarif am höchsten.

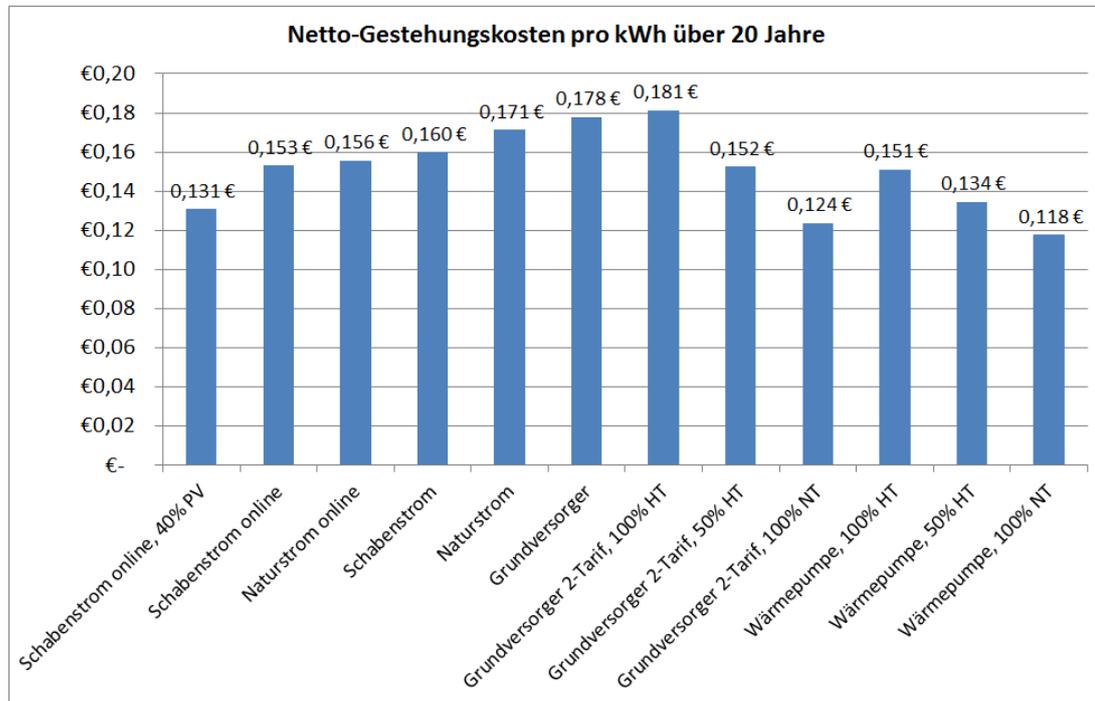


Abbildung 27: Sensitivität der Gestehungskosten pro kWh Wärmeenergie für eine Luftwärmepumpe bei Änderungen der Stromtarife.

## 7.5 Umweltkosten

Das Umweltbundesamt hat im Rahmen eines Forschungsprojektes Schätzungen von Umweltkosten erarbeitet [40]. Bei den ermittelten Umweltkosten handelt es sich dabei um Durchschnittswerte für Emissionen in Deutschland, deren Wirkung jedoch auch im Ausland auftreten kann. Es wird ein Kostensatz von 180 €/t CO<sub>2,äq</sub> für das Jahr 2016 empfohlen. Die Schäden, die durch den emissionsbedingten Klimawandel hervorgerufen werden, sind generationenübergreifend. Daher werden Emissionen, die in späteren Jahren als 2016 verursacht werden, mit höheren Umweltkosten bewertet.

Ausgehend von dieser Grundlage sind im Folgenden die Umweltkosten für die verschiedenen Heizungssysteme für das *Projekthaus Ulm* dargelegt. Die angenommenen Umweltkosten decken dabei die emittierten Luftschadstoffe und Treibhausgase ab. Die mittleren Umweltkosten liegen bei 200,50 €/t CO<sub>2,äq</sub> und spiegeln den Anstieg der Umweltkosten

von 182,57 €/t CO<sub>2,äq</sub> im Jahr 2018 bis 217,25 €/t CO<sub>2,äq</sub> im Jahr 2037 wider. Abbildung 28 zeigt die Gestehungskosten zuzüglich der Umweltkosten. Die fossilen Heizungsvarianten und die Luftwärmepumpe mit reinem Netzstrom haben die höchsten Anteile an Umweltkosten. Niedrigere Umweltkosten haben die Varianten mit PV. Die geringsten Umweltkosten haben reine Pellet-Heizungen. In Kombination aller Kostenbestandteile ist eine Ölheizung mit 0,257 €/kWh die teuerste Heizungsvariante.

Diese wird gefolgt von der Fernwärmeversorgung (0,241 €/kWh), einer Gasbrennwert-Heizung (0,221 €/kWh) und der Kombination aus PV-Anlage, Luftwärmepumpe und Pelletofen (0,207 €/kWh). Die kombinierten Gestehungskosten einer Luftwärmepumpe in reinem Netzstrombetrieb sind 0,201 €/kWh und für Pelletheizungen bei 0,189 €/kWh. Die günstigste Erzeugungsart (0,162 €/kWh) ist die Kombination aus Luftwärmepumpe mit anteiligem Strom einer PV-Anlage.

Bei den Umweltkosten für Fernwärme merken die Autoren der Studie für das Umweltbundesamt an, dass die Kostensätze je nach Wärmequelle z.T. beträchtlich variieren. Für die Region Ulm/Neu-Ulm kann aufgrund der hohen Anteile an Biomasse von geringeren Werten ausgegangen werden. Eine detaillierte Untersuchung hierzu liegt jedoch nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit.

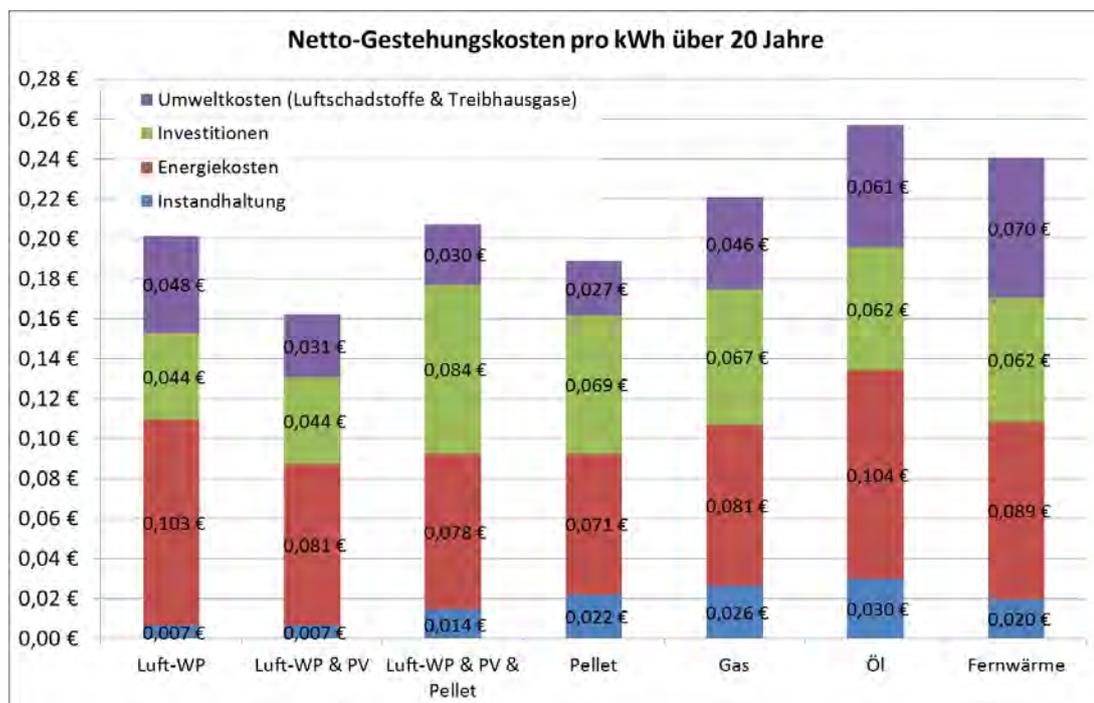


Abbildung 28: Gestehungskosten pro kWh Wärmeenergie für verschiedene Heizungssysteme für einen Zeitraum von 20 Jahren. Es werden die jährlichen Energiekosten, Wartungs-, Instandhaltungs- und Umweltkosten für Emissionen berücksichtigt. Es werden 40% des PV-Stroms genutzt.

## 7.6 Zusammenfassung

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 Luftwärmepumpen mit anteiligem Strom aus Photovoltaik-Anlagen. Die höheren jährlichen externen Energiekosten (Strom) werden durch geringere Investitions- und Instandhaltungskosten kompensiert. Bei den angenommenen Kosten und Preisentwicklungen lassen sich mit der Kombination von Luftwärmepumpen und Photovoltaik-Anlagen fast 20.000 € gegenüber einer Ölheizung einsparen.

Die Kombination aus Luftwärmepumpe, PV-Anlage und einem Pelletofen, wie sie im *Projekthaus Ulm* verbaut ist, verursacht zusätzliche Kosten, bietet jedoch auch eine höhere Versorgungssicherheit. Dies deckt sich auch mit den Anforderungen an Heizungssysteme zur Erreichung der Dekarbonisierung des Energiesystems [26].

Momentan sind einige Parameter, wie z.B. Jahresheizenergiebedarf und Instandhaltungskosten, in der Simulation noch als konstant angenommen. Diese sollen zukünftig auch einer zeitlichen Veränderung und Entwicklung unterliegen. Einige angenommene Parameter (z.B. JAZ, Anteil der PV-Nutzung) sind durch Messdaten oder genauere Modelldaten ersetzt worden.

## 8 Auswirkungen des Klimawandels

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Klimaanalyse auf die Kombination von lokaler Stromerzeugung aus PV-Systemen und dessen Nutzung zur Wärmeerzeugung mittels Luftwärmepumpen zusammengefasst. Dabei werden die meteorologischen Daten der Klimaszenarien in Simulationen genutzt, die auf Messdaten eines Gebäudes in Ulm basieren.

Die ausführlichen Ergebnisse sowie die Datengrundlage und Methoden werden im separaten Bericht [41] erläutert.

Den Ausführungen in [5] folgend, wird in diesem Bericht von *Klimaprojektionen* und nicht von Klimaprognosen oder Klimavorhersagen gesprochen. Bei Prognosen und Vorhersagen erwartet man eine exakte Übereinstimmung der zeitlichen Entwicklung zwischen Simulationen und Beobachtungen. Aufgrund der hohen Unsicherheiten in den Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Klimas, kann dies eine Klimasimulation nicht leisten. Beispielsweise kann die Simulation für Samstag, den 24. Februar 2079 zwar Sonnenschein vorhersagen, jedoch wäre eine Übereinstimmung der Simulation und Messung über einen Zeitraum von mehr als 60 Jahren nur Zufall.

Klimasimulationen bieten jedoch Übereinstimmung der statistischen Klimaeigenschaften zwischen Modell und Beobachtung. Daher werden meist auch nur Tages-, Monats- oder Jahresmittelwerte verwendet. Wenn im Folgenden nun von Extremwerten bei Temperaturen o.ä. gesprochen wird, sind dies nur mit Unsicherheiten behaftete Möglichkeiten, die eintreten **können**, jedoch keine definitiven Notwendigkeiten, die eintreten **müssen**.

Üblicherweise werden *Temperaturdifferenzen* in der Einheit Kelvin angegeben. In DIN 1345 [42] wird hierzu jedoch ergänzt: "Nach dem Beschluss der 13. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (1967–1968) darf die Differenz zweier Celsius-Temperaturen auch in der Einheit Grad Celsius (°C) angegeben werden.". Um die Lesbarkeit zu verbessern werden die Temperaturdifferenzen daher entsprechend der DIN 1345 [42] in Grad Celsius (°C) angegeben.

### 8.1 Lufttemperatur

Eine wichtige meteorologische Größe für Menschen und Technik ist die Lufttemperatur. Von ihr hängen u.a. das Verhalten sowie auch der Energiebedarf und die Möglichkeit zur Energieerzeugung ab.

In Abbildung 29 sind die Häufigkeitsverteilungen der mittleren Tagestemperatur im Jahresverlauf aus den Perioden 1961-2015 (links) sowie für das Klimaszenario A1B<sub>2</sub> (rechts) für die Region Ulm/Neu-Ulm dargestellt. Die roten Schattierungen zeigen die verschiede-

nen 10-%-Quantile und beschreiben, an wie vielen Tagen die Tagestemperatur unterhalb oder oberhalb des Quantils lag. So gibt die obere rote Fläche das 90-%-Quantil an, dass in 90 % aller Fälle an diesem Tag des Jahres die Temperatur unter dieser Grenze lag. Die schwarze, durchgezogene Linie kennzeichnet das 50-%-Quantil, den sog. Median, an. An der Hälfte aller Tage lag die Tagestemperatur über diesem Wert, an der anderen Hälfte unter diesem Wert. Die gepunkteten, schwarzen Linien zeigen die absolute minimale bzw. maximale mittlere Tagestemperatur.

Es zeigt sich in den historischen Messungen eine normale Temperaturverteilung mit niedrigen Lufttemperaturen im Winter (im Mittel knapp unter 0 °C; Maximal 12 °C und minimal -20 °C) und hohen Temperaturen im Sommer (im Mittel knapp etwa 18 °C; Maximal 27 °C und minimal 10 °C). In der Klimaprojektion stellt sich ebenfalls eine solche Temperaturverteilung ein. Die niedrigen Temperaturen sind ebenfalls im Winter (im Mittel knapp über 0 °C; Maximal 11 °C und minimal -15 °C) und hohen Temperaturen im Sommer (im Mittel knapp etwa 21 °C; Maximal 34 °C und minimal 10 °C). Jedoch zeigt sich eine geringere Streuung innerhalb der Quantile im Winter, dafür eine größere und asymmetrische Streuung der Quantile im Sommer. Die Wintertemperaturen werden höher, was ein milderer Winter bedeutet, während der Sommer Extremereignisse mit höheren Temperaturen aufweist.

Insbesondere gilt zu beachten, dass es sich dabei um die mittlere Tagestemperatur handelt und nicht um die absoluten Werte im Tagesgang. Eine mittlere Tagestemperatur von 34 °C kann z.B. Temperaturen von 28 °C in der Nacht und 40 °C am Tag bedeuten.

Abbildung 30 zeigt die mittleren Tagestemperaturen der Klimaprojektion während des Zeitraums von 2001 bis 2080. Über die Abszisse sind die Jahre aufgetragen und die Ordinate zeigt die Tage eines Jahres. Die mittlere Tagestemperatur ist farblich wiedergegeben von kalt (blau) bis heiß (rot). Hier zeigt sich deutlich eine Zunahme der Anzahl an warmen und heißen Tagen in der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums. Gleichzeitig zeigen sich mildere Winter mit der Abnahme an Tagen mit mittleren Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts.

## 8.2 Wärmebedarf

Der Wärmebedarf des Gebäudes hängt von verschiedenen Faktoren ab und wird normalerweise durch das Heizungssystem gedeckt. Der wichtigste und variabelste Faktor ist die Außentemperatur. Von ihr hängen die Wärmeverluste über die Außenhülle des Gebäudes (Dach, Fassade, Keller und Fenster) ab. Der Wärmebedarf zur Bereitstellung von Warmwasser wird nicht berücksichtigt. Dieser wird als annähernd konstant über den Jahresverlauf angenommen.

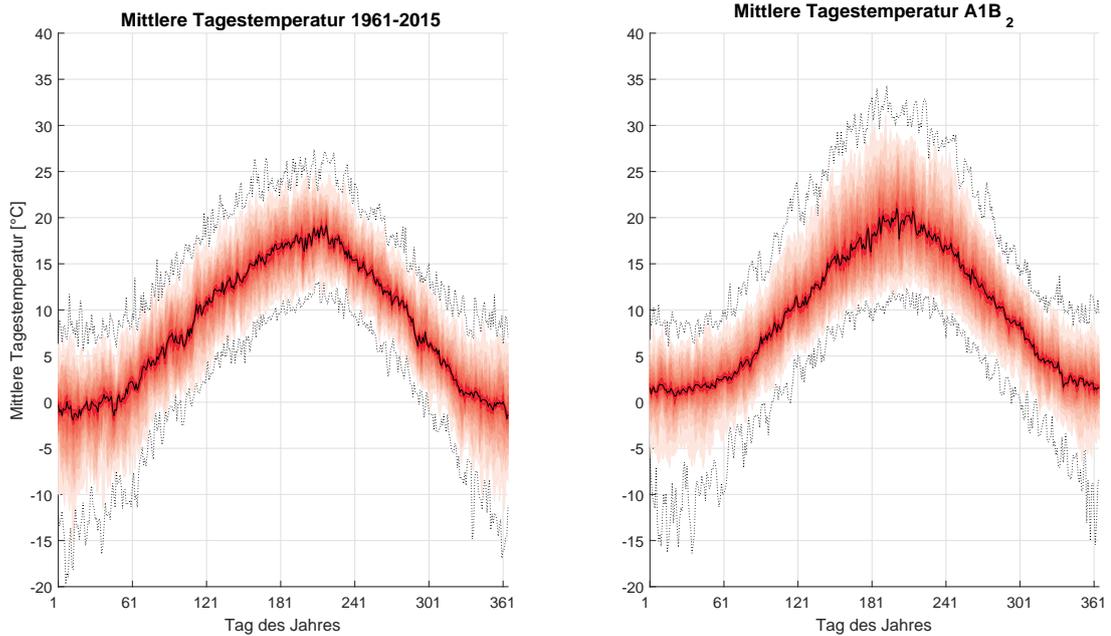


Abbildung 29: Verteilung der mittleren Tagestemperatur im Jahresverlauf für die Jahre 1961-2015 (links) und für die Klimaprojektion (rechts). Die roten Schattierungen zeigen die 10- %-Quantile. Die schwarze, durchgezogene Linie kennzeichnet das 50- %-Quantil. Die gepunkteten, schwarzen Linien zeigen die absolute minimale bzw. maximale mittlere Tagestemperatur.

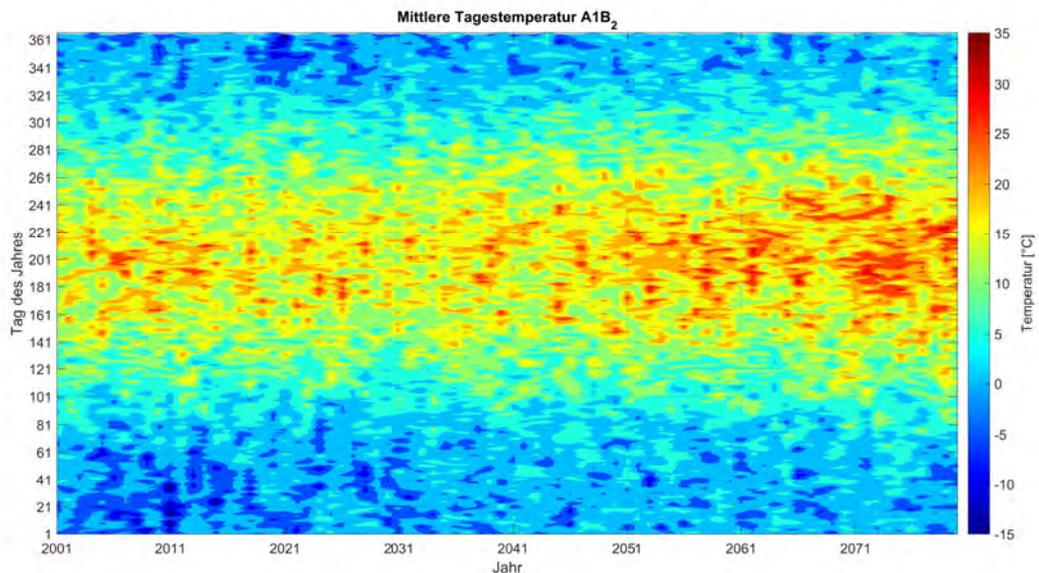


Abbildung 30: Mittlere Tagestemperatur der Periode 2001 bis 2080 anhand der Szenario-Klimaprojektion für den Standort Ulm. Die mittlere Tagestemperatur ist farblich wiedergegeben von kalt (blau) bis heiß (rot).

Abbildung 31 zeigt die zeitliche Änderung des Wärmebedarfs während des Zeitraums 2001 bis 2080 für die Klimaprojektion für das Projekthaus Ulm. Über die Abszisse sind die Jahre aufgetragen und die Ordinate zeigt die Tage eines Jahres. Der obere Teil der Abbildung zeigt die Entwicklung der Jahressumme des Wärmebedarfs. Der langjährige Mittelwert liegt bei etwa 11.400 kWh/a. Die Ausgleichsgerade zeigt eine mittlere, jährliche Abnahme von etwa 40 kWh/a, beginnend bei ca. 13.000 kWh/a im Jahr 2001 bis zu etwa 10.000 kWh/a im Jahr 2080. Der tägliche Wärmebedarf ist farblich wiedergegeben von gering (blau) bis hoch (rot). Weiße Flächen markieren Tage, an denen kein Wärmebedarf für Raumwärme besteht.

Aufgrund der Zunahme der milderen Winter mit der Abnahme an Tagen mit niedriger Tagesmitteltemperatur (siehe vorherigen Abschnitt 8.1) reduziert sich ebenfalls der Bedarf an Wärme.

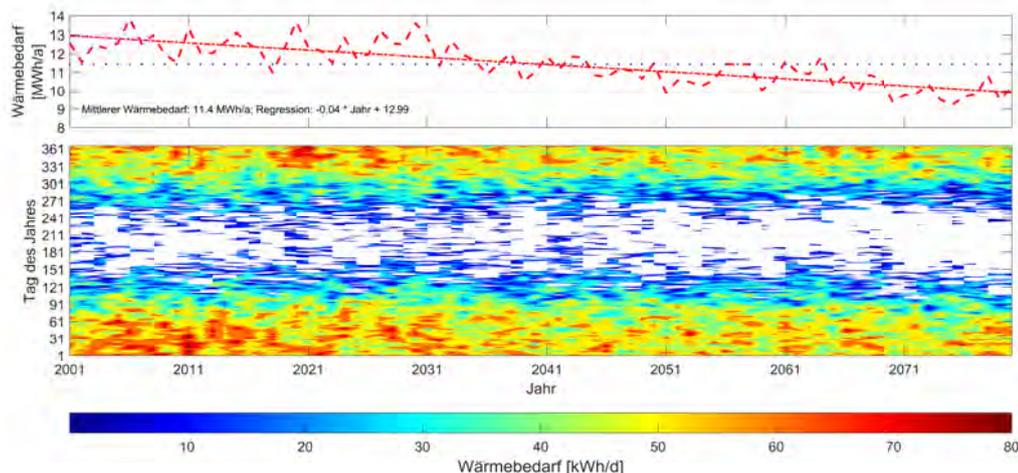


Abbildung 31: Jahressumme (oben) und Tagessumme (unten) des Wärmebedarfs des *Projekthauses Ulm* für die Periode 2001 bis 2080 anhand der A1B<sub>2</sub>-Klimaprojektion. Der langjährige mittlere Wärmebedarf ist als blaugepunktete Linie dargestellt, die Ausgleichsgerade als rote Strich-Punkt-Linie. Der tägliche Wärmebedarf ist farblich wiedergegeben von geringer Tagessumme (blau) bis hoher Tagessumme (rot). Weiße Flächen markieren Tage, an denen kein Wärmebedarf für die Raumheizung besteht.

Für die Abschätzung des Wärmebedarfs und der Heizungsauslegung wurden in der Vergangenheit, und z.T. auch heute noch, die Vollbenutzungsstunden von Heizungsanlagen nach der Norm VDI 2067-2 [35] herangezogen. Diese Norm gibt für Einfamilienhäuser in der Region Ulm 2.243 h p.a. Vollbenutzungsstunden an. Anhand der Verbrauchswerte

te der vergangenen Jahre lagen die Vollbenutzungsstunden des *Projekthauses Ulm* bei 2.034 h p.a.. Der Unterschied zwischen der Norm und der Messung kann dabei u.a. mit den unterschiedlichen Baustandards und den klimatischen Effekte (Unterschied zwischen zweijährigen Mittel und Drei-Jahres-Mittelwert sowie Klimawandel) begründet werden. Anhand der Simulation der verschiedenen Klimaprojektionen können diese Vollbenutzungsstunden von etwa 1.950 h p.a. auf 1.340 h p.a. sinken. Auch hier wirken sich die klimatischen Effekte und die Mittelwertbildungen auf den Unterschied zwischen Norm und Simulation aus. Weiterhin kann ein Einfluss von systematischen Abweichungen zwischen Simulation und Realität durch die Modellierung nicht ausgeschlossen werden. Eine Bias Korrektur als empirisch-statistisches Fehlerkorrekturverfahren wurde auf die Daten nicht angewandt, da der Mittelwert des Projekthaus nur auf Messungen aus zwei Jahren beruht und daher nicht als signifikant erachtet wird.

Es muss auch beachtet werden, dass die bisherigen Normen die Klimaerwärmung nicht berücksichtigt haben, da sie z.T. auf Messdaten aus den 1950er Jahren oder davor beruhen (siehe [41]). Hier wäre eine Überarbeitung der Normen durch die Normungsgremien, basierend auf aktuelleren Messwerten, sehr zu empfehlen.

### 8.3 Wärmepumpen Strombedarf

Die Entwicklung des Strombedarfs der Luftwärmepumpe und dessen Deckung durch die PV-Anlage hängen ebenfalls stark von der Klimaentwicklung ab. Vor allem die Änderung der Außentemperatur beeinflusst den Wärmebedarf und damit den Betrieb und die Effizienz der Luftwärmepumpe.

Abbildung 32 zeigt den Strombedarf der Luftwärmepumpe zur Deckung des Raumwärmebedarfs für die Klimaprojektion. Auf der Abszisse sind die Jahre aufgetragen und die Ordinate zeigt die Tage eines Jahres. Der obere Teil der Abbildung zeigt die Entwicklung des Strombedarfs. Der langjährige Mittelwert für den Strombedarf liegt bei etwa 5.400 kWh/a. Die Ausgleichsgerade zeigt die Abnahme des Jahresstrombedarfs aufgrund des reduzierten Heizungsbedarfs in Folge des Temperaturanstiegs. Die mittlere, jährliche Abnahme beträgt etwa 20 kWh/a, beginnend bei ca. 6.200 kWh/a im Jahr 2001 bis zu etwa 4.800 kWh/a im Jahr 2080. Der untere Teil der Abbildung 32 zeigt den täglichen Strombedarf der Luftwärmepumpe als Rasterdiagramm. Der tägliche Strombedarf ist farblich wiedergegeben von 0 kWh/d (blau) bis zu 50 kWh/d (rot). Weiße Flächen kennzeichnen Tage, an denen keine Heizung benötigt wird.

Ein Teil des Strombedarfs der Luftwärmepumpe kann direkt durch die Erzeugungsleistung der PV-Anlage gedeckt werden. Diese Bedarfsdeckung ist in Abbildung 33 dargestellt. Auf der Abszisse sind die Jahre aufgetragen und die Ordinate zeigt die Tage eines Jahres. Das

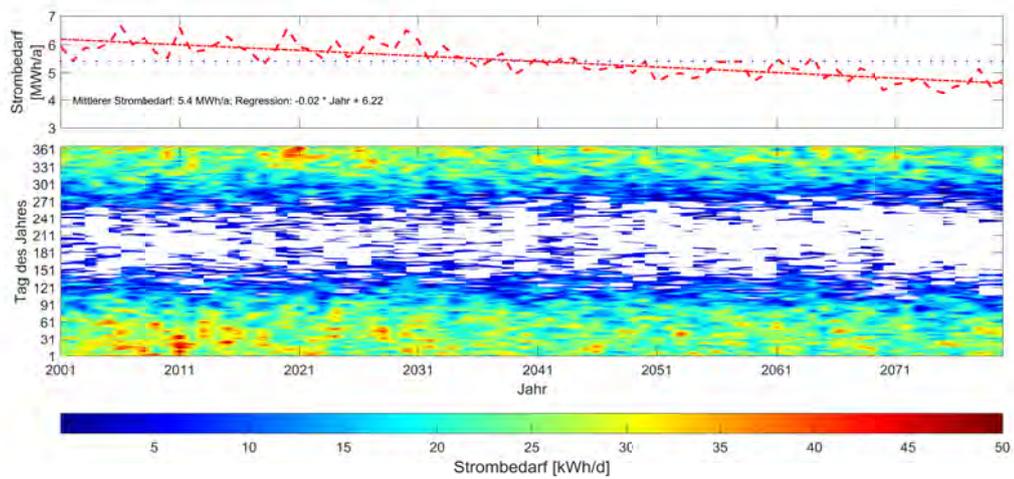


Abbildung 32: Jahressumme (oben) und Tagessumme (unten) des Strombedarfs der Luftwärmepumpe für Raumwärme des *Projekthauses Ulm* für die Periode 2001 bis 2080 anhand der A1B<sub>2</sub>-Klimaprojektion. Der langjährige Strombedarf ist als blaugepunktete Linie dargestellt. Die Ausgleichsgerade als rote Strich-Punkt-Linie. Der tägliche Strombedarf ist farblich wiedergegeben von geringem Bedarf (blau) bis hohem Bedarf (rot). Weiße Flächen kennzeichnen Tage, an denen keine Heizung benötigt wird.

Rasterdiagramm zeigt, wie viel des täglichen Strombedarfs der Luftwärmepumpe bilanziell durch den PV-Strom gedeckt werden kann. Negative Zahlen bedeuten, dass der PV-Strom zur vollständigen Deckung nicht ausreicht und zusätzlicher Strom aus dem öffentlichen Netz bezogen werden muss. Positive Zahlen drücken einen Überschuss des PV-Stroms aus, der im Haus für andere Verbraucher genutzt, in Batterien gespeichert oder ins Stromnetz eingespeist werden kann.

Die tägliche Deckung des Strombedarf ist farblich wiedergegeben von -60 kWh/d (blau) bis zu 60 kWh/d (rot). Weiße Flächen kennzeichnen Tage, an denen keine Heizung benötigt wird und der Strom der PV-Anlage vollständig für andere Zwecke genutzt werden kann. In den Wintermonaten ist deutlich zu erkennen, dass der Strom der PV-Anlage nicht ausreicht, um den Strombedarf der Luftwärmepumpe zu decken. Es muss zusätzliche Energie aus dem öffentlichen Netz entnommen werden. Die Periode mit annähernder Deckung im Frühjahr ist länger als im Herbst. Im Frühjahr treten häufiger Tage mit Wärmebedarf und hohen Erzeugungsleistungen durch die PV-Anlage auf.

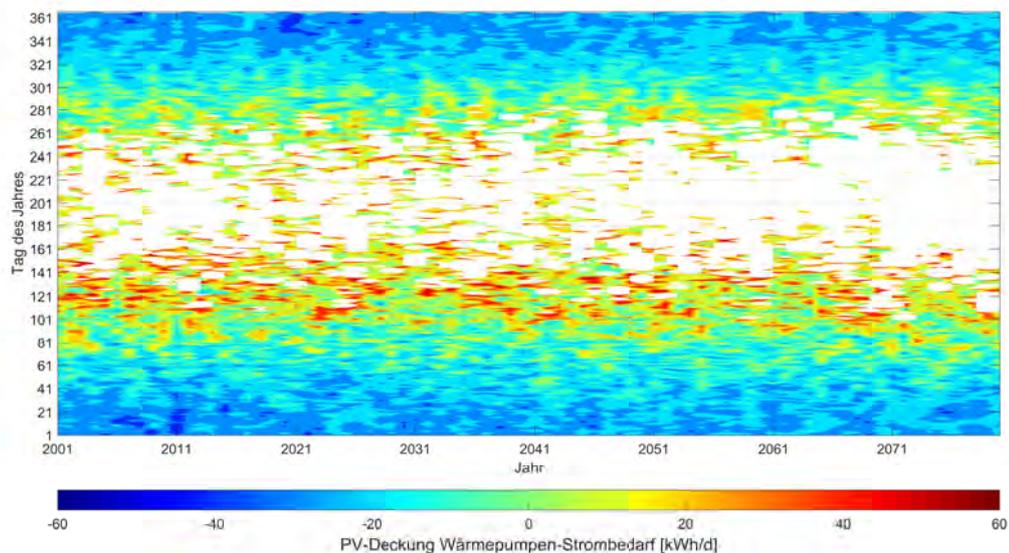


Abbildung 33: Deckung des Strombedarfs der Luftwärmepumpe für Raumwärme des *Projekthauses Ulm* für die Periode 2001 bis 2080 anhand der A1B<sub>2</sub>-Klimaprojektion. Die tägliche Deckung des Strombedarfs ist farblich wiedergegeben von geringem Bedarf (blau) bis hohem Bedarf (rot). Weiße Flächen kennzeichnen Tage, an denen keine Heizung benötigt wird.

Im *Projekthaus Ulm* steht der Pelletofen als weiterer Wärmeerzeuger zur Verfügung. Die Steuerung des Pelletofens und der Luftwärmepumpe erfolgt als bivalenter, alternativer Betrieb. Oberhalb einer festgelegten Abschalttemperatur erfolgt die Wärmebereitstellung ausschließlich über die Luftwärmepumpe. Unterhalb der Abschalttemperatur wird der

Pelletofen betrieben, der die gesamte Heizwärme bereitstellt, d.h. an kalten Tagen wird die Luftwärmepumpe nicht betrieben.

Die Deckung des Strombedarfs der Luftwärmepumpe bei bivalentem Betrieb ist in Abbildung 34 dargestellt. Über die Abszisse sind die Jahre aufgetragen und die Ordinate zeigt die Tage eines Jahres. Das Rasterdiagramm zeigt, wie viel des täglichen Strombedarfs der Luftwärmepumpe direkt durch den PV-Strom gedeckt werden kann. Negative Zahlen bedeuten, dass der PV-Strom zur vollständigen Deckung nicht ausreicht und zusätzlicher Strom aus dem öffentlichen Netz bezogen werden muss. Positive Zahlen drücken einen Überschuss des PV-Stroms aus, der im Haus für andere Verbraucher genutzt, in Batterien gespeichert oder ins Stromnetz eingespeist werden kann. Die tägliche Deckung des Strombedarfs ist farblich wiedergegeben von -60 kWh/d (blau) bis zu 60 kWh/d (rot). Weiße Flächen kennzeichnen Tage, an denen entweder keine Raumwärme benötigt wird oder diese durch den Pelletofen bereitgestellt wird. In den Wintermonaten ist deutlich zu erkennen, dass der Strom der PV-Anlage nicht ausreicht, um den Strombedarf der Luftwärmepumpe zu decken. Es muss zusätzliche Energie aus dem öffentlichen Netz entnommen werden. Zu Beginn des Simulationszeitraums wird viel Wärme durch den Pelletofen bereitgestellt. Dieser Anteil nimmt mit der Zeit und mit den steigenden Temperaturen (vgl. Kapitel 8.1) ab. Die Periode mit annähernder Deckung ist unverändert zum monovalenten Betrieb ohne Pelletofen.

## 8.4 Zusammenfassung

Eine Erwärmung um 2 °C im Mittel hört sich nicht sehr dramatisch an. Dies liegt daran, dass es sich bei diesem Wert um die Änderung der langjährigen Mitteltemperatur handelt. Eine Betrachtung von Mittelwerten auf z.B. Monatsbasis kann zu Fehlinterpretationen führen und vernachlässigt auch die Herausforderungen, die sich aufgrund von Extremwerten ergeben. Um dieser möglichen Fehlinterpretation zu begegnen, werden die zeitlich hochaufgelösten Daten der SRES-Szenarien genutzt.

Die SRES-Szenarien wurden vielfach als Basis für Klimaprojektionen verwendet. Sie stellen verschiedene plausible Entwicklungen der Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen in der Atmosphäre dar und basieren auf Annahmen zur globalen demografischen, sozioökonomischen und technologischen Entwicklung und deren Beziehungen zueinander. Für die Simulation wird ein mittlerer globaler Temperaturanstieg von 2,8 °C erwartet. Für Vergleiche der Klimaprojektionen zu heutigen Daten werden die Messdaten der hauptamtlichen Wetterstation des DWD in Ulm genutzt.

Die globale Erwärmung ist in Ulm schon spür- und messbar und wird sich im Rahmen des Klimawandels fortsetzen. Von der Temperatur hängen das Verhalten der Menschen

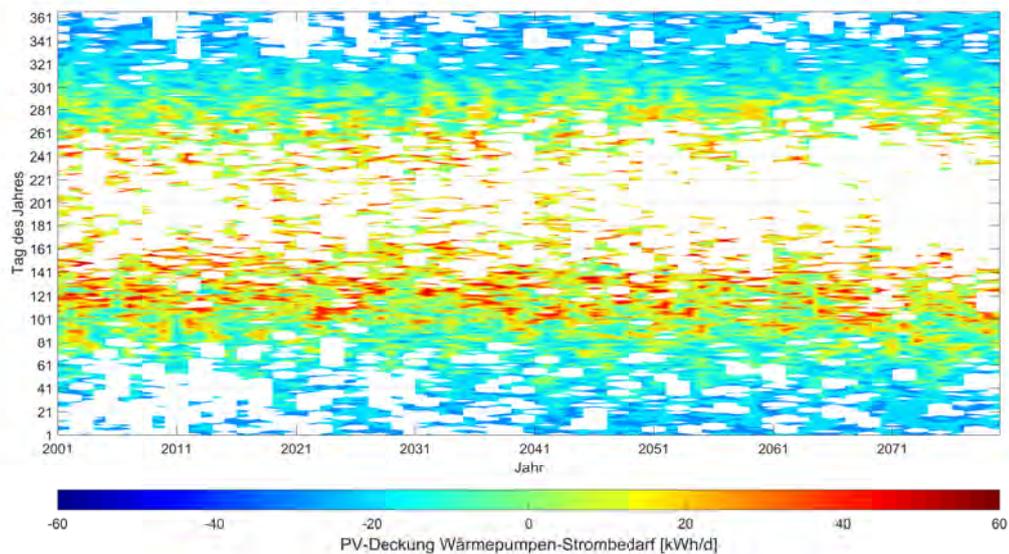


Abbildung 34: Deckung des Strombedarfs der Luftwärmepumpe für Raumwärme des *Projekthaus Ulm* für die Periode 2001 bis 2080 anhand der A1B<sub>2</sub>-Klimaprojektion. Ein Pelletofen dient als weiterer Wärmeerzeuger bei niedrigen Außenlufttemperaturen. Die tägliche Deckung des Strombedarfs ist farblich wiedergegeben von geringem Bedarf (blau) bis hohem Bedarf (rot). Weiße Flächen kennzeichnen Tage, an denen keine Wärme von der Luftwärmepumpe benötigt wird. Negative Zahlen bedeuten, dass der PV-Strom zur vollständigen Deckung nicht ausreicht. Positive Zahlen drücken einen Überschuss des PV-Stroms aus.

sowie auch der Energiebedarf und die Möglichkeit zur Energieerzeugung ab.

In der Klimaprojektion werden die Winter meist milder, jedoch wird es auch in Zukunft noch Kälteperioden geben. Die mittleren Tagestemperaturen im Sommer können, den Klimaprojektionen der A1B-Szenarios folgend, durchaus  $34^{\circ}\text{C}$  erreichen. Insbesondere gilt zu beachten, dass es sich dabei um die mittlere Tagestemperatur handelt und nicht um die absoluten Werte im Tagesgang. Eine mittlere Tagestemperatur von  $34^{\circ}\text{C}$  kann z.B. Temperaturen von  $28^{\circ}\text{C}$  in der Nacht und  $40^{\circ}\text{C}$  am Tag bedeuten.

Der Wärmebedarf des Projekthauses hängt insbesondere von der Außentemperatur ab und deshalb hat die globale Erwärmung einen großen Einfluss darauf. Die zeitliche Änderung des Wärmebedarfs während des Zeitraums 2001 bis 2080 für die Klimaprojektion zeigt eine mittlere, jährliche Abnahme von etwa  $40\text{ kWh/a}$ .

Durch den geänderten Wärmebedarf ändert sich auch der Strombedarf der Luftwärmepumpe und die Deckung durch die PV-Anlage. Die mittlere, jährliche Abnahme des Strombedarfs beträgt etwa  $20\text{ kWh/a}$ , beginnend bei ca.  $6.200\text{ kWh/a}$  im Jahr 2001 bis zu etwa  $4.800\text{ kWh/a}$  im Jahr 2080. Ein Teil des Strombedarfs der Luftwärmepumpe kann direkt durch die Erzeugung der PV-Anlage gedeckt werden. In den Wintermonaten reicht der Strom der PV-Anlage nicht aus, um den Strombedarf der Luftwärmepumpe zu decken. Es muss zusätzliche Energie aus dem öffentlichen Netz entnommen werden. Die Perioden mit annähernder Deckung sind im Frühjahr und im Herbst.

Im *Projekthaus Ulm* steht ein Pelletofen als weiterer, bivalenter Wärmeerzeuger zur Verfügung. Dies hat Einfluss auf den Strombedarf. Die milderen Winter und die längeren Sommer reduzieren den Wärmebedarf insgesamt und der notwendige Strombezug für die Luftwärmepumpe aus dem öffentlichen Netz wird geringer. Die höheren Außentemperaturen sorgen ebenfalls für einen höheren COP der Luftwärmepumpe und daher für einen geringeren Strombedarf.

Zusammengefasst hat der Klimawandel auch in Ulm schon begonnen und wird den Betrieb von Gebäuden und Anlagen beeinflussen. Je nach System sind die Auswirkungen unterschiedlich stark. Neben den Bemühungen, eine Verstärkung des Klimawandels durch die Emission von Treibhausgasen zu verhindern, sollten auch die z.T. Jahrzehnte alten Regeln und Vorschriften an die jetzt schon messbare globale Erwärmung angepasst werden [41].

## 9 Ergebnisveröffentlichungen

### 9.1 Auszeichnung

**Auszeichnung mit dem Umweltpreis 2017 des Alb-Donau-Kreis** Zum dreizehnten Mal hat der Alb-Donau-Kreis den Umweltpreis für Initiativen und Projekte des Umweltschutzes ausgeschrieben. Im Rahmen der Preisverleihung wurden auch die Initiatoren des *Projekthaus Ulm* für ihr wertvolles Engagement und ihren vorbildlichen Einsatz zum Schutz und zur Erhaltung der Umwelt geehrt (Abbildung 35). In dem *Projekthaus Ulm* wird die Nutzung von nachhaltigen Heizungssystemen aus Erneuerbaren Energien untersucht und die Ergebnisse und Erkenntnisse möglichst vielen Interessenten zur Verfügung gestellt. Hierbei wird bewusst auf den regionalen Bezug und eine Wiederverwertbarkeit geachtet.



Abbildung 35: Übergabe des Umweltpreis 2017 des Alb-Donau-Kreis durch Landrat Heiner Scheffold (rechts) (Foto: Volkmar Könneke)

### 9.2 Homepage

Die im Rahmen des vorangegangenen Projekts erstellte Projekthomepage<sup>8</sup> wurde auch mit den aktuellen Ergebnissen und Informationen weitergepflegt. Die Homepage steht auch nach Ende der Projektlaufzeit zur Verfügung und soll weiterhin über die Entwicklungen am *Projekthaus Ulm* informieren (Abbildung 36).

---

<sup>8</sup><https://www.projekthaus-ulm.de>

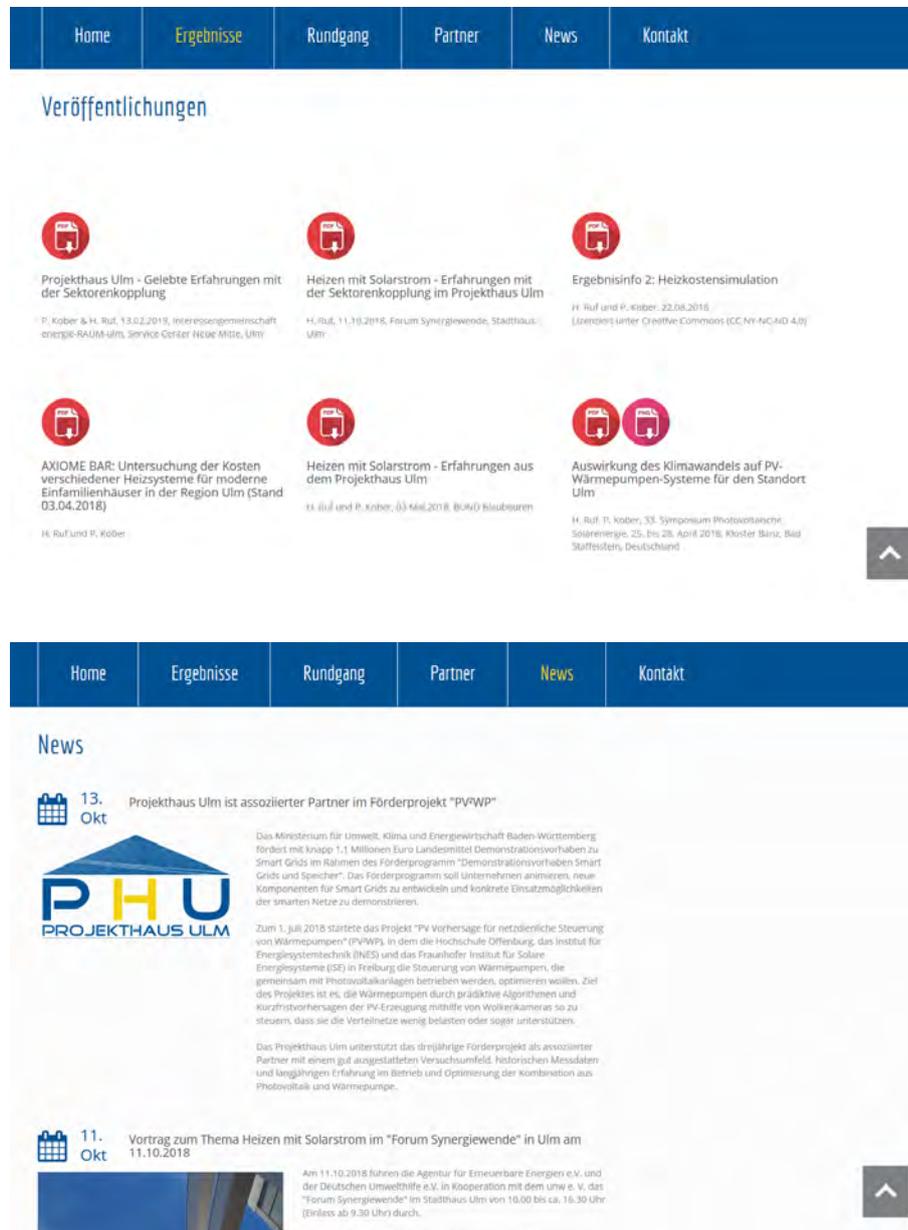


Abbildung 36: Screenshots der Ergebnisse und Neuigkeiten auf der *Projekthaus Ulm* Homepage <https://www.projekthaus-ulm.de>

### 9.3 Veröffentlichungen für die Bürger

Die Ergebnisse von AxIOME BAR wurden auf verschiedenen Veranstaltungen der Öffentlichkeit der Region Ulm und Neu-Ulm vorgestellt.

**Ergebnisinfos** Mit den Themen *Mögliche Auswirkungen des Klimawandels in Ulm* und *Heizkostenanalyse* sind ausgewählte Ergebnisse als sogenannte Ergebnisinfos veröffentlicht worden [43, 17]. Die Ergebnisinfos (Anhang B) sind unter einer CC BY-NC-ND 4.0<sup>9</sup> Lizenz lizenziert. Das heißt, jeder kann die Ergebnisinfos auf der Projekthomepage herunterladen, teilen oder auf seiner eigenen Homepage bereitstellen.

**Workshop mit der Regionalen Energieagentur am 13.02.2018** Vorstellung der bisherigen Erkenntnisse aus dem *Projekthaus Ulm* und Definition der zu untersuchenden Fragestellungen aus Sicht der Energieberatung.

**Vortrag bei der BUND-Gruppe Blaubeuren am 03.05.2018** Vorstellung der Projektergebnisse und Erkenntnisse aus dem *Projekthaus Ulm* vor etwa 20 Besuchern der BUND-Gruppe Blaubeuren.

**Informationsstand am Aktionstag Klimaschutz am 08.06.2018** Teilnahme mit einem Informationsstand (Abbildung 37) am Aktionstag Klimaschutz in Ulm auf dem Hans-und-Sophie-Scholl-Platz zu den Projektergebnissen und Erkenntnissen aus dem Projekthaus Ulm. Der Informationsstand wurde von *Schülern der Robert-Bosch-Schule betreut* und es konnten zwei Messstände zum Thema Wärmepumpe besichtigt werden.

**Workshop mit den Geschäftsführern der SWU Energie GmbH und Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH am 13.06.18** Vorstellung der Projektergebnisse und Erkenntnisse aus dem Projekthaus Ulm, insbesondere der möglichen Entwicklungen und Auswirkungen des Klimawandels auf Wohnhäuser in der Region Ulm, vor den Geschäftsführern der SWU Energie GmbH und der Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH.

**Vortrag bei der Ausschusssitzung der Innung Sanitär + Heizung Ulm/Alb-Donau am 21.06.18** Vorstellung der Projektergebnisse und Erkenntnisse aus dem Projekthaus Ulm, insbesondere der möglichen Entwicklungen und Auswirkungen des Klimawandels auf

---

<sup>9</sup>Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International



Abbildung 37: Informationsstand des *ProjektHaus Ulm* am Aktionstag Klimaschutz in Ulm (Fotos: Holger Ruf)

Wohnhäuser in der Region Ulm, vor etwa fünf Mitgliedern der Innung Sanitär + Heizung Ulm/Alb-Donau.

**Vortrag beim INES Kolloquium der Hochschule Offenburg am 26.06.18** Vortrag über den Einfluss des Wetters und Klimas auf Planung und Betrieb aller Sektoren (Verbrauch, Erzeugung, Übertragung und Verteilung) des Stromnetzes vor etwa 25 Teilnehmern.

**Vortrag beim AgendaForum der lokalen Agenda Ulm am 28.6.2018** Vortrag über die Auswirkungen des Klimawandels auf Solareinspeisung, Heiz- und Kühlenergiebedarf für die Zeit bis 2080 im Rahmen des AgendaForums der lokale agenda ulm 21 vor etwa 60 Besuchern (Abbildung 38).

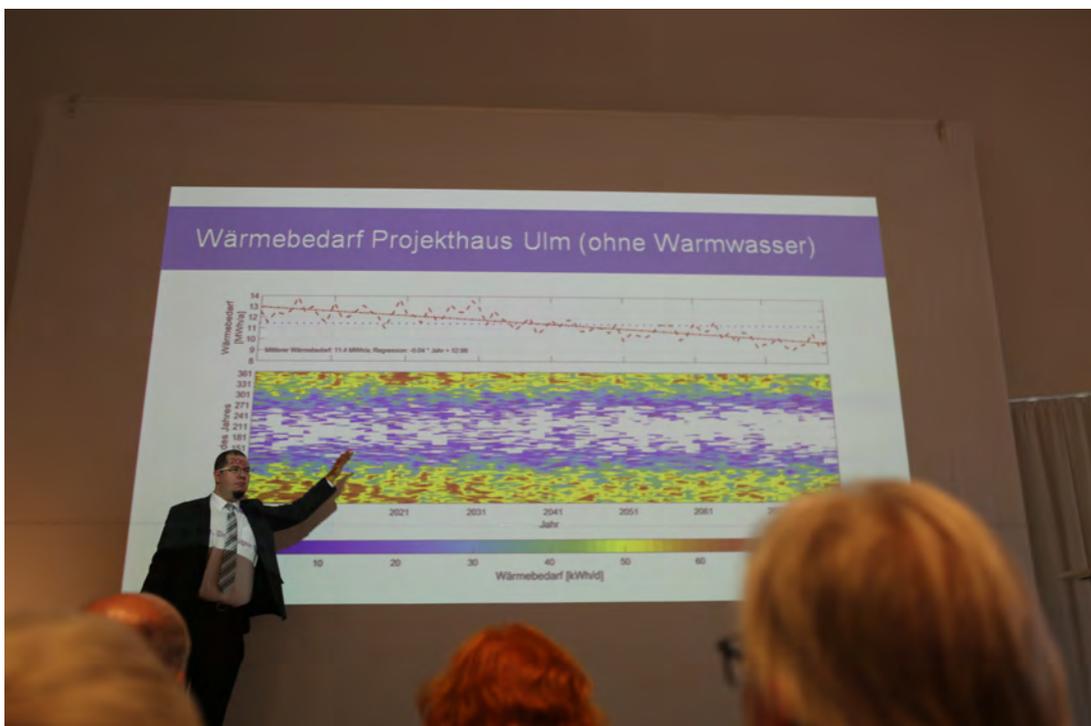


Abbildung 38: Vortrag im Rahmen des AgendaForums der lokalen agenda ulm 21 (Foto: Ralf Zwiebler)

**Informationsstand am Greenparking Day in Ulm am 15.09.2018** Teilnahme mit einem Informationsstand (Abbildung 39) am 2. GreenParking Day in Ulm zu den Projektergebnissen und Erkenntnissen aus dem Projekthaus Ulm.



Abbildung 39: Informationsstand des *Projektthaus Ulm* am 2. Greenparking Day in Ulm (Fotos: Georg Ruf)

**Vortrag beim Forum Synergiewende der Deutschen Umwelthilfe und UNW am 11.10.2018** Die Agentur für Erneuerbare Energien e.V. und die Deutsche Umwelthilfe e.V. haben in Kooperation mit dem unw e. V am 11.10.2018 das *Forum Synergiewende – PV-Eigenverbrauch und Prosumer Potenziale für den Klimaschutz* in Ulm durchgeführt. In der geförderten Veranstaltung wurde gezeigt, wie sich mit innovativen Technologien und Konzepten Strom und Wärme erfolgreich auf Basis Erneuerbarer Energien miteinander verbinden und Synergien nutzen lassen. Dabei wurde der Vortrag zum *Projekthaus Ulm* als Expertenbeitrag eines Best-Practice-Beispielen eingeladen. Eine Zusammenfassung der Fachtagung ist online<sup>10</sup> verfügbar.

**Workshop mit dem Zentrum Digitalisierung.Bayern am 23.09.2018** Vorstellung der bisherigen Erkenntnisse aus dem *Projekthaus Ulm* und Definition der zu untersuchenden Fragestellungen aus Sicht der Digitalisierung in der Energiewirtschaft.

**Vortrag bei der Ausschusssitzung der Elektro-Innung Ulm/Alb-Donau am 19.10.2018** Vorstellung der Projektergebnisse und Erkenntnisse aus dem Projekthaus Ulm, insbesondere der möglichen Entwicklungen und Auswirkungen des Klimawandels auf Wohnhäuser in der Region Ulm, vor etwa 10 Mitgliedern der Elektro-Innung Ulm/Alb-Donau.

**Vortrag bei der Herbstveranstaltung der SWU Energiegemeinschaft am 14.11.2018** Vorstellung der Projektergebnisse und Erkenntnisse aus dem *Projekthaus Ulm* vor etwa 35 Mitgliedern der SWU Energiegemeinschaft aus den Bereichen Elektrotechnik, Heizung und Sanitär.

**Vortrag bei der Interessengemeinschaft energie-RAUM-ulm am 13.02.2019** Vorstellung der Projektergebnisse und Erkenntnisse aus dem *Projekthaus Ulm* vor etwa 10 Teilnehmern im Rahmen eines Vortrags bei der Interessengemeinschaft energie-RAUM-ulm.

## 9.4 Einbindung in die Lehre

### **Schulung für Energieberater am Kompetenzzentrum Holzbau & Ausbau, Biberach**

Im Rahmen der ganztägigen Schulung wurde etwa 15 Energieberatern die Grundlagen und aktuelle Entwicklungen der Photovoltaik, die Erkenntnisse aus der Messkampagne im Projekthaus Ulm, die Auswirkungen der möglichen Entwicklungen des Klimawandels

---

<sup>10</sup><https://www.forum-synergiewende.de/pv-eigenverbrauch-und-prosumer-potenziale-fuer-den-klimaschutz-veranstaltungsdokumentation/>

auf Wohnhäuser in der Region Ulm sowie der Einfluss des Wetters und Klimas auf Planung und Betrieb aller Sektoren (Verbrauch, Erzeugung, Übertragung und Verteilung) des Stromnetzes vermitteln.

**Praktischer Unterricht RBS** An der Robert-Bosch-Schule Ulm werden die Erkenntnisse aus dem *Projekthaus Ulm* gezielt eingesetzt, um am schuleigenen Wärmepumpenprüfstand verschiedene Betriebsbedingungen zu simulieren und dann mit Hilfe der reellen Werte aus dem *Projekthaus Ulm* den Schülern eine energiesparende und wirtschaftliche Betriebsweise von Wärmepumpen zu vermitteln. Die zielführende Beratung der Kunden steht hierbei im Vordergrund. Außerdem werden echte Daten herangezogen, um den Unterschied zwischen JAZ und COP zu beleuchten. Hierzu werden Temperaturverläufe, Abtauvorgänge und Tageswerte aus dem PHU herangezogen. Das Projekthaus wurde des Weiteren schon mehrfach bei landesweiten Lehrerfortbildungen zum Thema Wärmepumpe und Lüftungstechnik als Referenzobjekt herangezogen. Die auf der Projekthomepage geteilten Vorträge werden auch an anderen Schulen zum Unterricht herangezogen.

**Bachelorarbeit an der Hochschule Offenburg** In der Bachelorarbeit von Herr P. Schad *Analyse von Betriebsdaten einer Wärmepumpe zur Identifizierung von Optimierungsoptionen* wurden die erhobenen Datenreihen des *Projekthauses Ulm* analysiert, um eine Aussage über Optimierungsoptionen der Luftwärmepumpe machen zu können.

## 9.5 Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Fachpublikationen

Die Erkenntnisse und Ergebnisse von AxIOME BAR wurden in verschiedenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Fachpublikationen der Fachwelt präsentiert. Im Einzelnen sind dies:

- H. Ruf und P. Kober *“Auswirkung des Klimawandels auf PV-Wärmepumpen-Systeme für den Standort Ulm”*, in 33. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2018
- H. Ruf und P. Kober *“Simulation der Auswirkungen des Klimawandels auf die PV-Wärmepumpen-Kombination eines Einfamilienhauses”*, in 5. Fachtagung Energiemeteorologie, Goslar, 2018
- H. Ruf und P. Kober *“Untersuchung der Kosten verschiedener Heizsysteme für moderne Einfamilienhäuser in der Region Ulm (Überarbeitung)”*, online, 2018
- H. Ruf und P. Kober *“Klimadatenanalyse - Bericht”*, online, 2018

- H. Ruf und P. Kober “*Kombination von PV und Raumklimaanlagen unter Berücksichtigung der Klimaerwärmung für den Standort Ulm*”, in 34. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2019
- A. Dittmann, P. Kober, E. Lorenz, O.V. Mier, H. Ruf, P. Schad, M. Schmidt “*Optimierung der PV-Speisung von Wärmepumpen durch Kurzfristprognosen mit Wolkenkameras*”, in 34. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2019 (Abbildung 40)



Abbildung 40: Postervorstellung am PV Symposium in Bad Staffelstein (Foto: Theresa Liegl, Conexio GmbH)

Die zugehörigen Autorenentwürfe stehen, soweit urheberrechtlich möglich, auf der Projekthomepage zur Verfügung.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der 1,5 Jahre Laufzeit des Projektes AxIOME BAR wurden unterschiedliche Experimente und Versuche am *Projekthaus Ulm* durchgeführt, um objektive und unabhängige Informationen über den Betrieb von Heizungssystemen in modernen Wohngebäuden für verschiedene Zielgruppen zu untersuchen. Das Projekthaus Ulm, ein seit Anfang 2014 bewohnter Einfamilienhausneubau, dessen thermische und elektrische Verbräuche hochaufgelöst gemessen werden, bietet eine gute Grundlage, um solche Analysen in der Region Ulm/Neu-Ulm durchzuführen.

In einem fast einjährigen Experiment wurden drei verschiedene Luftwärmepumpentechnologien an einem realen Standort miteinander verglichen. Durch das einheitliche Messsystem sind die Stromwerte gut vergleichbar, während sich große Unterschiede in den ermittelten Wärmemengen zeigten. Ein Teil der Unterschiede kann durch das verschiedene Nutzerverhalten der Gebäudebewohner begründet werden. Ein weiterer Teil muss jedoch der Messabweichung und sogar Unzulänglichkeiten der integrierten Messsysteme in den beiden Vergleichsgebäuden zugerechnet werden. Ein signifikanter Unterschied aufgrund der Technologie ließ sich nicht nachweisen und wäre wegen der geringen Größe der Stichprobe auch fragwürdig.

Zusammenfassend müssen AZ, die mit geräteinternen Messsystemen ermittelt wurden, vorsichtig interpretiert werden. Zur Not sollte auf berechnete Größen für eine erste Abschätzung der Wirtschaftlichkeit und Vergleiche zurück gegriffen werden.

Kamin- und Kachelöfen werden meist nur zur Erhöhung des Wohnkomforts installiert und dienen nicht zur grundlegenden Deckung des Wärmebedarfs. Bei Holzfeuerung im Wohnraum ohne Heizungsanschluss kann es schnell zu sehr hohen Raumtemperaturen und schlechter Verteilung im Gebäude kommen. In einem Experiment wurden im *Projekthaus Ulm* die Auswirkungen von solchen Systemen ohne Wassertasche nachgestellt und gemessen. Die Nutzer regulieren dann häufig die Raumwärme durch das Öffnen der Fenster. Die Versuche des Experiments im *Projekthaus Ulm* bestätigen dies. Bei einer Heizleistung von 3,5 kW stieg die Temperatur innerhalb des etwa 45 m<sup>2</sup> großen Wohnbereichs innerhalb weniger Stunden um über 2 K. Dabei zeigte sich auch eine sehr inhomogene Wärmeverteilung trotz des offenen Raumes. Mit steigender Temperatur nahm die relative Luftfeuchtigkeit ab und das Raumklima wurde als unbehaglich empfunden, was schließlich zum Abbruch des Experiments durch die Bewohner führte.

Es wird daher die Anbindung des Holzofens an das Heizungssystem mittels Wassertasche dringend empfohlen.

In heutigen Neubauten sind kontrollierte Wohnraumlüftungen notwendig, da die dichte Gebäudehülle und innere Feuchtequelle ohne ausreichende Lüftung ein Risiko für Schimmelbildung sind. Um die Energieeffizienz nicht zu verschlechtern, sind kontrollierte Wohnraumlüftungen mit Wärmerückgewinnungssystemen ausgestattet. Die Wärmerückgewinnung wurde anhand der installierten Messtechnik im *Projekthaus Ulm* untersucht und die Rückwärmezahl, also der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung, lag in dem erwarteten Bereich von etwa 80 %.

Weiterhin wurden während der Projektlaufzeit verschiedene Benutzungs- und Lüftungsstrategien getestet, die zwar nicht repräsentativ sein können, jedoch eine erste Grundlage für Empfehlungen an andere Bewohner von Gebäuden mit kontrollierten Wohnraumlüf-

tungen darstellen.

Anhand von zwei Simulationen wurde die Kombination einer PV-Anlage mit einer Luftwärmepumpe auch auf Bestandsgebäude untersucht. Hierbei wurde zum einen ein öffentliches Gebäude der Stadt Ulm, zum Anderen eine Doppelhaushälfte simuliert. Die Analyse des Heizungskonzepts zeigt, dass eine Luftwärmepumpe als Heizsystem den Strombedarf des öffentlichen Gebäudes voraussichtlich verdoppeln würde. Die bestehende PV-Anlage würde nur bedingt den Mehrverbrauch kompensieren. Eine Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur Gas-Brennwertheizung ist daher fraglich.

In dem Wohnhaus wurde zunächst eine Luftwärmepumpe ohne PV-Unterstützung betrachtet, die jedoch keine wirtschaftliche Lösung darstellt. Grund hierfür sind die hohen Energiekosten und die höheren Investitionskosten, um die Heizungsinstallation im Gebäude zu ertüchtigen (Austausch Gliederheizkörper durch Plattenheizkörper). Durch die Ergänzung mit einer PV-Anlage und deren niedrigeren Gestehungskosten für den elektrischen Strom sinken die Energiekosten. Die Investitionskosten für die Heizungsanlage bleiben jedoch konstant. Da die Doppelhaushälfte vermietet ist, ist eine Umsetzung aufgrund der wirtschaftlichen Interessen des Vermieters und der rechtlichen Herausforderungen und Unsicherheiten (Mieterstrom) eher fraglich.

Die Sanierung mit einem Gas-Brennwertgerät hat noch geringere Gestehungskosten. Hinzu kommt, dass es keine weiteren Umbaumaßnahmen in der bestehenden Heizungsanlage (z.B. Heizkörper) gibt. Jedoch sind die Vorlauftemperaturen höher, was eine geringere Effizienz bedeutet.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verschiedener Heizungssysteme für neue Einfamilienhäuser aus dem vorangegangenen Projekt wurden überarbeitet und ergänzt. Dabei wurden die Kosten von verschiedenen Heizungssystemen für moderne Einfamilienhäuser über einen Zeitraum von 20 Jahren simuliert. Die Ergebnisse der Prognose zeigen die geringsten Gestehungskosten für Luftwärmepumpen mit anteiligem Strom aus Photovoltaik-Anlagen. Die höheren jährlichen externen Energiekosten (Strom) werden durch geringere Investitions- und Instandhaltungskosten kompensiert. Die Kombination aus Luftwärmepumpe, PV-Anlage und einem Pelletofen, wie sie im *Projekthaus Ulm* verbaut ist, verursacht zusätzliche Kosten, bietet jedoch auch eine höhere Versorgungssicherheit. Die detaillierten Ergebnisse wurden in einem separaten Bericht veröffentlicht und stehen auf der Homepage<sup>11</sup> zur freien Verfügung [39].

In einer Simulation wurde das *Projekthaus Ulm* unter Berücksichtigung der Klimaerwärmung betrachtet. Für die Simulation wird ein mittlerer globaler Temperaturanstieg von 2,8 °C erwartet. Für Vergleiche der Klimaprojektionen zu heutigen Daten werden die Mess-

---

<sup>11</sup>[https://projekthaus-ulm.de/downloads/AxIOME\\_BAR\\_Bericht\\_Gestehungskosten.pdf](https://projekthaus-ulm.de/downloads/AxIOME_BAR_Bericht_Gestehungskosten.pdf)

daten der hauptamtlichen Wetterstation des DWD in Ulm genutzt. Eine Erwärmung um  $2^{\circ}\text{C}$  im Mittel hört sich nicht sehr dramatisch an. Dies liegt daran, dass es sich bei diesem Wert um die Änderung der langjährigen Mitteltemperatur handelt.

Die globale Erwärmung ist in Ulm schon spür- und messbar und wird sich im Rahmen des Klimawandels fortsetzen. In der Klimaprojektion werden die Winter meist milder, jedoch wird es auch in Zukunft noch Kälteperioden geben. Die mittleren Tagestemperaturen im Sommer können, den Klimaprojektionen des A1B-Szenarios folgend, durchaus  $34^{\circ}\text{C}$  erreichen. Insbesondere gilt zu beachten, dass es sich dabei um die mittlere Tagestemperatur handelt und nicht um die absoluten Werte im Tagesgang. Eine mittlere Tagestemperatur von  $34^{\circ}\text{C}$  kann z.B. Temperaturen von  $28^{\circ}\text{C}$  in der Nacht und  $40^{\circ}\text{C}$  am Tag bedeuten. Der Wärmebedarf des *Projekthaus Ulm* hängt insbesondere von der Außentemperatur ab und deshalb hat die globale Erwärmung einen großen Einfluss darauf. Die zeitliche Änderung des Wärmebedarfs während des Zeitraums 2001 bis 2080 für die Klimaprojektion zeigt eine deutliche Abnahme. Durch den geänderten Wärmebedarf ändert sich ebenfalls der Strombedarf der Luftwärmepumpe und die Deckung durch die PV-Anlage. In den Wintermonaten reicht der Strom der PV-Anlage nicht aus, um den Strombedarf der Luftwärmepumpe zu decken. Es muss zusätzliche Energie aus dem öffentlichen Netz entnommen werden. Die Perioden mit annähernder Deckung sind im Frühjahr und im Herbst.

Zusammengefasst hat der Klimawandel auch in Ulm schon begonnen und wird den Betrieb von Gebäuden und Anlagen beeinflussen. Je nach System sind die Auswirkungen unterschiedlich stark. Neben den Bemühungen, eine Verstärkung des Klimawandels durch die Emission von Treibhausgasen zu verhindern, sollten auch die z.T. Jahrzehnte alten Regeln und Vorschriften an die jetzt schon messbare globale Erwärmung angepasst werden [41].

Ein grundlegendes Ziel der Arbeiten am *Projekthaus Ulm* ist es, die untersuchten Fragestellungen aufzubereiten und zur freien Verfügung zu stellen. Hierbei werden die aktuellsten technischen Entwicklungen und Forschungstendenzen ebenso berücksichtigt wie die alltäglichen Herausforderungen in Einbau und Betrieb sowie die möglichen, lokalen Änderungen als Folge des Klimawandels. Das erarbeitete Fachwissen versorgt nicht nur die Bürger in Ulm/Neu-Ulm mit Informationen, sondern bietet auch der Industrie sowie dem Forschungs- und Entwicklungsstandort Ulm/Neu-Ulm Chancen für wirtschaftliche Weiterentwicklungen in den Themenbereichen der Heizungsindustrie und Digitalisierung.

Die Ergebnisse wurden u.a. zielgruppenspezifisch in Informations- und Schulungsunterlagen zusammengefasst. Fokus lag hierbei auf Informationsunterlagen für Bauherren und Bürger sowie Schulungsunterlagen für Facharbeiterlehrlinge, Technikerschüler, Studenten und Fachkräftefortbildung. Die Veröffentlichungsstrategie wurde zudem in unterschiedli-

chen Workshops, Informations- und Bildungsveranstaltungen fortgesetzt.

Zum 1. Juli 2018 startete das Projekt *PV Vorhersage für netzdienliche Steuerung von Wärmepumpen* (PV<sup>2</sup>WP), in dem das Institut für Energiesystemtechnik (INES) der Hochschule Offenburg und das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg die Steuerung von Wärmepumpen, die gemeinsam mit Photovoltaikanlagen betrieben werden, optimieren wollen. Ziel des Projektes ist es, die Wärmepumpen durch prädiktive Algorithmen und Kurzfristvorhersagen der PV-Erzeugung mithilfe von Wolkenkameras so zu steuern, dass sie die Verteilnetze wenig belasten oder sogar unterstützen.

Das Projekt wird im Rahmen des Förderprogramm *Demonstrationsvorhaben Smart Grids und Speicher*, in dem Unternehmen zur Entwicklung und Demonstration neuer Komponenten für Smart Grids animiert werden sollen, vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert.

Das *Projekthaus Ulm* unterstützt das dreijährige Förderprojekt als assoziierter Partner mit einem gut ausgestatteten Versuchsumfeld, historischen Messdaten und langjährigen Erfahrung im Betrieb und Optimierung der Kombination aus Photovoltaik und Luftwärmepumpe.

Durch die Beschaffung eines Elektroautos soll zukünftig auch die Sektorenkopplung vom Strom- hin zum Mobilitätssektor untersucht werden. Dies erfolgt in enger Abstimmung mit der SWU die im *Projekthaus Ulm* auch den proaktiven Einsatz von Intelligentes Messsystem, ugs. Smart Meter (iMSys) testen wollen. Hierzu werden zukünftig die Luftwärmepumpe und eine steuerbare Ladeeinrichtung an das iMSys angeschlossen (Abbildung 41). Die zu untersuchenden Fragestellungen sind:

- Wie verändert die lokale Sektorkopplung (Strom/Wärme/Mobilität) die Lastprofile?
- Sind Optimierungen für eine verringerte Netzzrückwirkung möglich?
- Welche Anlagen eignen sich für Lastmanagement und wie lassen sich diese in der Praxis steuern?
- Lassen sich Flexibilitäten ferngesteuert oder automatisch heben um das Netz zu entlasten und die Auslastung zu verstetigen?

Auch hier sollen die Projektergebnisse, soweit möglich, über die Homepage des *Projekthaus Ulm* wieder der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden.



## 11 Quellenverzeichnis

- [1] United Nations Framework Convention on Climate Change. Übereinkommen von Paris. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- [2] Bundesverband Wärmepumpe e.V. Wärmepumpen-Marktanteil in den Bundesländern: Anteil in neu errichteten Wohngebäuden in 2017, 2018. <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/>.
- [3] Statistisches Bundesamt. Erneuerbare energien 2018 erstmals auf platz 1 bei beheizung neuer wohngebäude: Heizungswärme kommt bei zwei dritteln der wohnungsneubauten primär aus erneuerbaren energien – bedeutung von gas nimmt ab: Pressemitteilung nr. 212 vom 6. juni 2019, 2019. [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/06/PD19\\_212\\_31121.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/06/PD19_212_31121.html).
- [4] Mareike Buth, Walter Kahlenborn, Jonas Savelsberg, Nina Becker, Philip Bubeck, Sibylle Kabisch, Christian Kind, Annkathrin Tempel, Franziska Tucci, Stefan Greiving, Mark Fleischhauer, Christian Lindner, Johannes Lückenkötter, Marcel Schonlau, Hanna Schmitt, Florian Hurth, Felix Othmer, René Augustin, Dennis Becker, Marlena Abel, Tjark Bornemann, Helene Steiner, Marc Zebisch, Stefan Schneiderbauer, and Christian Kofler. Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel: Sektorenübergreifende Analyse des Netzwerks Vulnerabilität. Online, 2015. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vulnerabilitaet-deutschlands-gegenueber-dem>.
- [5] Guy Brasseur, Daniela Jacob, and Susanne Schuck-Zöller, editors. *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer Verlag, 1 edition, 2016.
- [6] Holger Ruf and Patrick Kober. NETCHEK-PV: NETzverträgliches HEizen und Kühlen mit Photovoltaik-Strom: Abschlussbericht. Online, 2017.
- [7] Johannes Weniger and Volker Quaschnig. Begrenzung der Einspeiseleistung von netzgekoppelten Photovoltaiksystemen mit Batteriespeichern. In OTTI, editor, *28. Symposium Photovoltaische Solarenergie. 06. März bis 08. März 2013, Kloster Banz, Bad Staffelstein*, 2013. <https://www.volker-quaschnig.de/downloads/Staffelstein-2013-Weniger.pdf>.
- [8] Miara, Marek and Günther, Danny and Kramer, Thomas and Oltersdorf, Thore and Wapler, Jeanette. Wärmepumpen Effizienz: Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb. On-

- line, 2011. [http://wp-effizienz.ise.fraunhofer.de/download/wp\\_effizienz\\_endbericht\\_langfassung.pdf](http://wp-effizienz.ise.fraunhofer.de/download/wp_effizienz_endbericht_langfassung.pdf).
- [9] World Meteorological Organization WMO. *Guide to meteorological instruments and methods of observation*, volume no. 8 of *WMO*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 7th ed edition, 2008. <https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/CIMO-Guide.html>.
- [10] Deutscher Wetterdienst. Climate Data Center (CDC): Monatswerte Lufttemperatur, 2015. <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>.
- [11] Thomas Stocker, Lisa Alexander, and Myles Allen. *Climate change 2013: The physical science basis : final draft underlying scientific-technical assessment : Working Group I contribution to the IPCC fifth assessment report*. WMO, IPCC Secretariat, Geneva, 2013.
- [12] Michael Lautenschlager, Klaus Keuler, Claudia Wunram, Elke Keup-Thiel, Martina Schubert, Andreas Will, Burkhardt Rockel, and Uwe Boehm. Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.1, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD: CLM\_A1B\_1\_D3, 2009.
- [13] Michael Lautenschlager, Klaus Keuler, Claudia Wunram, Elke Keup-Thiel, Martina Schubert, Andreas Will, Burkhardt Rockel, and Uwe Boehm. Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.2, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD: CLM\_A1B\_2\_D3, 2009.
- [14] Michael Lautenschlager, Klaus Keuler, Claudia Wunram, Elke Keup-Thiel, Martina Schubert, Andreas Will, Burkhardt Rockel, and Uwe Boehm. Climate Simulation with CLM, Scenario B1 run no.1, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD: CLM\_B1\_1\_D3, 2009.
- [15] Michael Lautenschlager, Klaus Keuler, Claudia Wunram, Elke Keup-Thiel, Martina Schubert, Andreas Will, Burkhardt Rockel, and Uwe Boehm. Climate Simulation with CLM, Scenario B1 run no.2, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD: CLM\_B1\_2\_D3, 2009.
- [16] Stefan Finke. Photovoltaik-kosten, 2016. [www.photovoltaiksolarstrom.de/photovoltaik-kosten](http://www.photovoltaiksolarstrom.de/photovoltaik-kosten).
- [17] Holger Ruf and Patrick Kober. Heizkostensimulation. <https://projekthaus-ulm.de/downloads/20180822%20Projekthaus%20Newsletter%20web.pdf>.
- [18] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Energiepreise und energie-

- kosten, 2016. [www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/energiepreise-energiekosten.html](http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/energiepreise-energiekosten.html).
- [19] 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>.
- [20] SWU Energie GmbH. Preisübersicht Strom, 2017.
- [21] SWU Energie GmbH. Allgemeines zur Grund- und Ersatzversorgung Strom, 2017. <https://www.swu.de/fileadmin/content/energie-wasser/strom/SWU-Strom-Preisblatt-Strom-Grundversorgung.pdf>.
- [22] 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](http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf).
- [23] SWU Energie GmbH. Preisblatt für Fernwärmepreise: Stand: Oktober 2017, 2017. [https://www.swu.de/fileadmin/content/energie-wasser/waerme/SWU-Waerme-Preisblatt-Indizes-ab\\_01.10.2017-NU\\_Ludwigsfeld\\_Senden.pdf](https://www.swu.de/fileadmin/content/energie-wasser/waerme/SWU-Waerme-Preisblatt-Indizes-ab_01.10.2017-NU_Ludwigsfeld_Senden.pdf).
- [24] DIN EN 50470-3. Wechselstrom-Elektrizitätszähler - Teil 3: Besondere Anforderungen - Elektronische Wirkverbrauchsähler der Genauigkeitsklassen A, B und C, 2007. <http://www.beuth.de/de/norm/din-en-50470-3-vde-0418-0-3-2007-05/97258747>.
- [25] Falk Auer and Herbert Schote. Wärme aus der Umwelt auch gut für die Umwelt? Ergebnisse einer siebenjährigen Praxisuntersuchung: Erdgekoppelte Wärmepumpen sparen deutlich Primärenergie ein Kritische Bewertung von Luft-Wärmepumpen. [http://www.agenda-energie-lahr.de/WP\\_FeldtestPhase2.html](http://www.agenda-energie-lahr.de/WP_FeldtestPhase2.html).
- [26] Volker Kienzlen, Veit Bürger, Peter Schossing, Roland Koenigsdorff, Martin Pehnt, Jan Steinbach, Konstantinos Stergiaropoulos, and Anke Ostertag. Grundlegende Empfehlungen für Sanierung und Erneuerung von Heizungsanlagen: Hinweise und Empfehlungen für Hausbesitzer, Investoren sowie Fachplaner und Handwerk: Stand 01/2019. [https://www.kea-bw.de/fileadmin/user\\_upload/pdf/Artikel%20von%20KEA-Kollegen/Heiztechnik\\_der\\_Zukunft\\_KEA.pdf](https://www.kea-bw.de/fileadmin/user_upload/pdf/Artikel%20von%20KEA-Kollegen/Heiztechnik_der_Zukunft_KEA.pdf).
- [27] DIN EN 12831. Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast, 01.08.2003.

- [28] DIN EN 15251. Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akkustik; 2012.
- [29] Deutscher Bundestag. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden: EnEV, 24.07.2007. [http://www.gesetze-im-internet.de/aregv/inhalts\\_bersicht.html](http://www.gesetze-im-internet.de/aregv/inhalts_bersicht.html).
- [30] DIN EN 13779. Lüftung von nichtwohngebäuden - allgemeine grundlagen und anforderungen für lüftungs- und klimaanlagen und raumkühlssysteme, 2007. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-13779/94054008>.
- [31] Rüdiger Paschotta. Wärmerückgewinnung, 2010. <https://www.energie-lexikon.info/waermerueckgewinnung.html>.
- [32] Christoph Gerstbauer, Konstantin Kulterer, Georg Geissegger, Sieghart Brunner, and Christian Gorbacg. Leitfaden für Audits an Lüftungsanlagen.
- [33] Bundesweite aufnahme der monatlichen stromertragsdaten von pv-anlagen, 2019. [https://www.pv-ertraege.de/pvdaten/sfvpv\\_main\\_entry.html](https://www.pv-ertraege.de/pvdaten/sfvpv_main_entry.html).
- [34] Deutsches Institut für Normung. Grundflächen und Rauminhalte im Bauwesen - Teil 1: Hochbau, 2016.
- [35] Verein Deutscher Ingenieure e.V. Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen - Raumheizung, 1993.
- [36] 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. [https://www.ulm-netze.de/fileadmin/content/downloadcenter/Gas/Preisblaetter/Netze\\_Gas\\_Preisblatt\\_Ergaenzende\\_Bedingungen\\_NDAV.pdf](https://www.ulm-netze.de/fileadmin/content/downloadcenter/Gas/Preisblaetter/Netze_Gas_Preisblatt_Ergaenzende_Bedingungen_NDAV.pdf).
- [37] 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.
- [38] Bettina Mailach and Bert Oschatz. BDEW-Heizkostenvergleich Neubau 2016: Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung im Neubau. <https://www.bdew.de/energie/bdew-heizkostenvergleich-neubau-2016/>.

- [39] Holger Ruf and Patrick Kober. Untersuchung der Kosten verschiedener Heizsysteme für moderne Einfamilienhäuser in der Region Ulm: Version 1.1. [https://projekthaus-ulm.de/downloads/AxIOME\\_BAR\\_Bericht\\_Gestehungskosten.pdf](https://projekthaus-ulm.de/downloads/AxIOME_BAR_Bericht_Gestehungskosten.pdf).
- [40] Astrid Matthey and Björn Bünger. Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten: Kostensätze: Stand 02/2019. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-11\\_methodenkonvention-3-0\\_kostensaetze\\_korr.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-11_methodenkonvention-3-0_kostensaetze_korr.pdf).
- [41] Holger Ruf and Patrick Kober. Klimadatenanalyse: AxIOME BAR: Anwendungsorientierte InfOrmationen für Moderne. [https://www.projekthaus-ulm.de/downloads/AxIOME\\_BAR\\_Bericht\\_Klimadaten.pdf](https://www.projekthaus-ulm.de/downloads/AxIOME_BAR_Bericht_Klimadaten.pdf).
- [42] DIN 1345. Thermodynamik; Grundbegriffe, 01.12.1993.
- [43] Holger Ruf and Patrick Kober. Mögliche Auswirkungen des Klimawandels in Ulm. <https://projekthaus-ulm.de/downloads/20180327%20Projekthaus%20Newsletter%20web.pdf>.

## Anhang

### A Sankey-Diagramme Projekthaus Ulm

Monatliche Energieflussdiagramme des *Projekthaus Ulm* für das Jahr 2017.

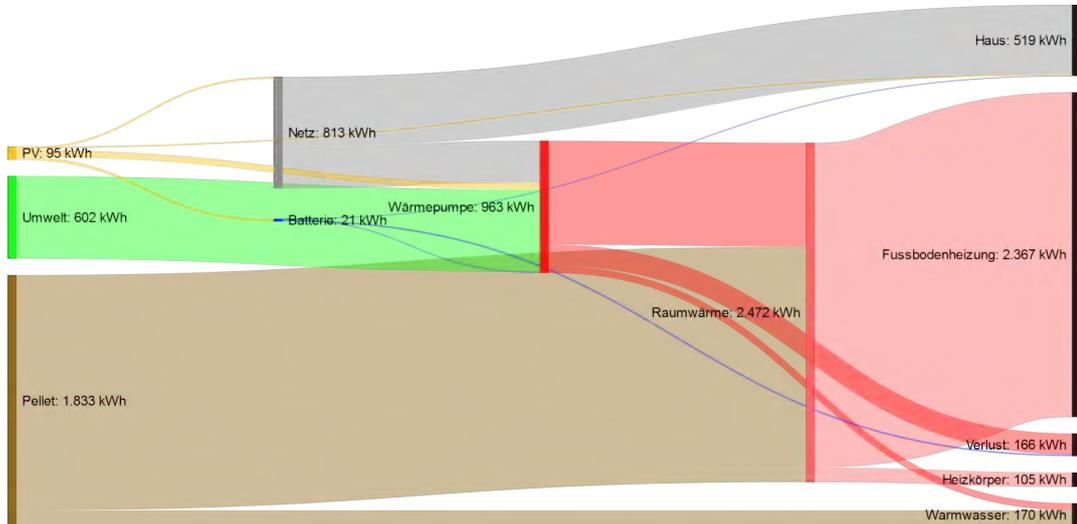


Abbildung 42: Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* für Januar 2017.

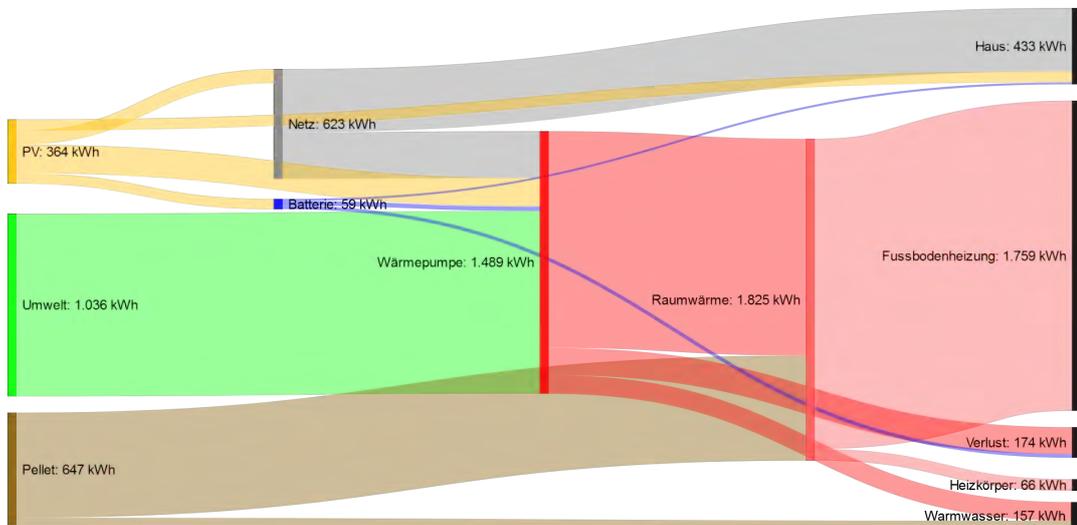
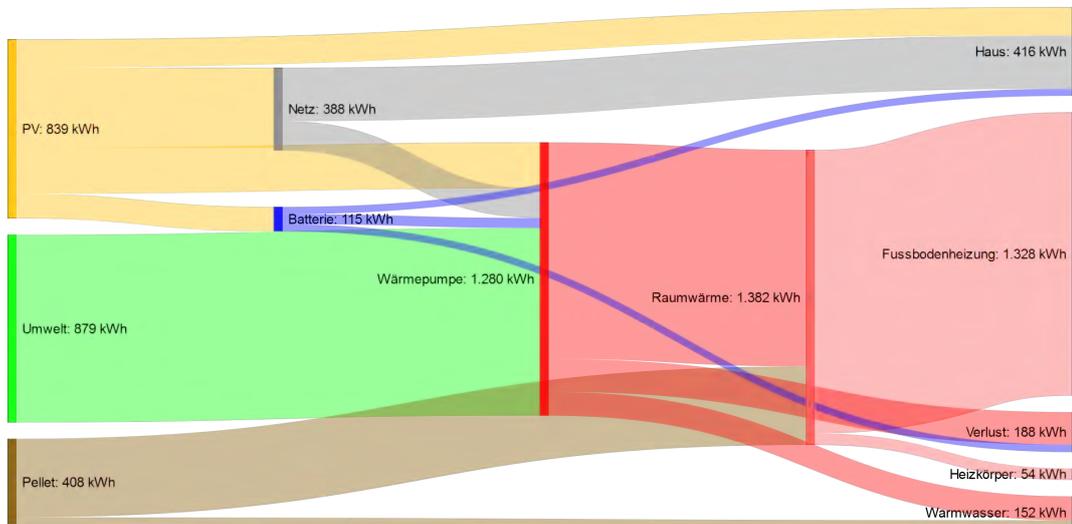
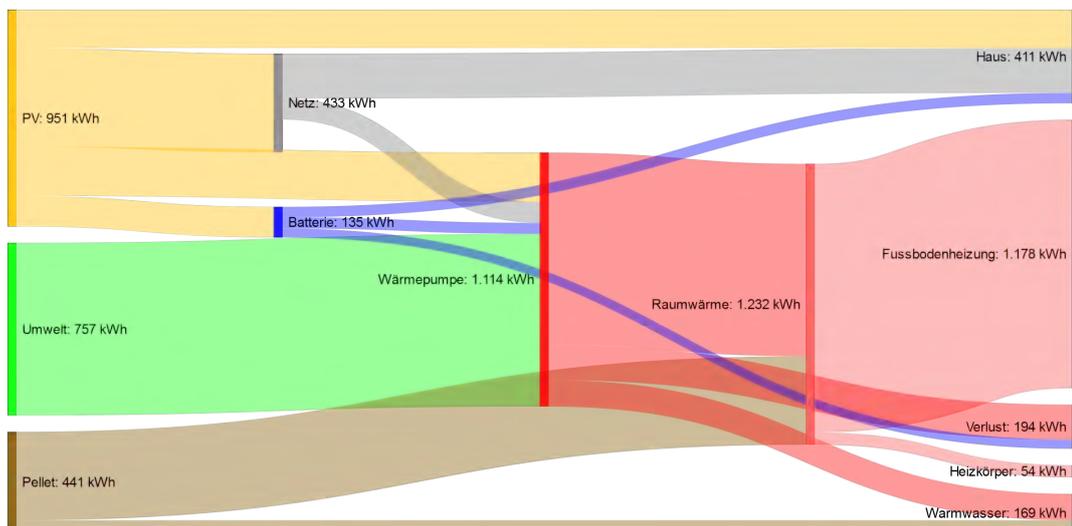


Abbildung 43: Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* für Februar 2017.

Abbildung 44: Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* für März 2017.Abbildung 45: Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* für April 2017.

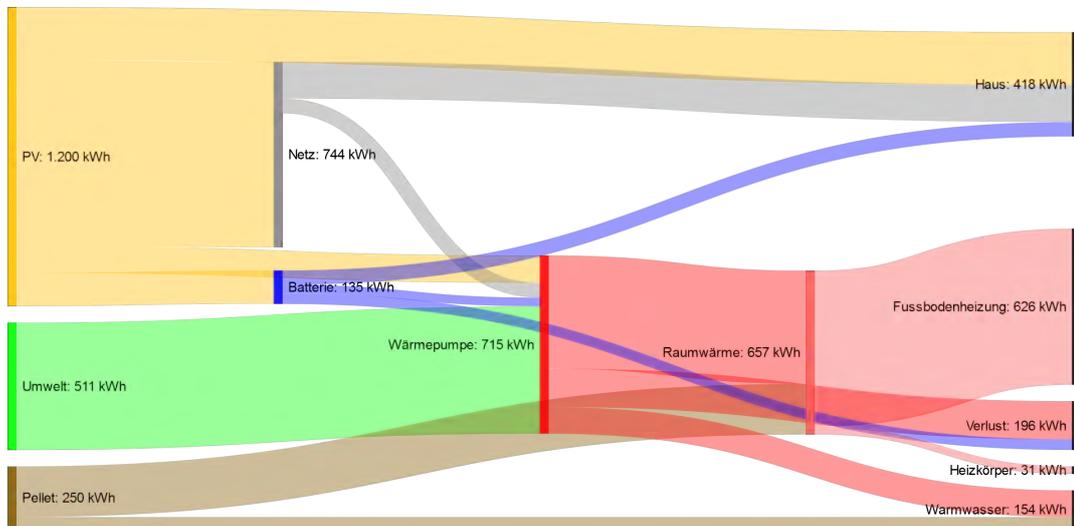


Abbildung 46: Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* für Mai 2017.

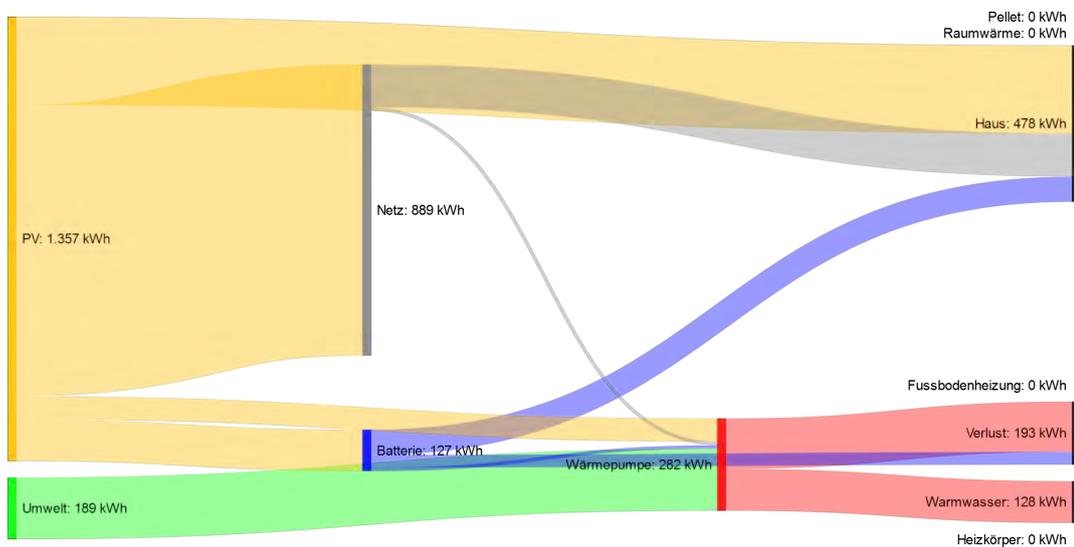


Abbildung 47: Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* für Juni 2017.

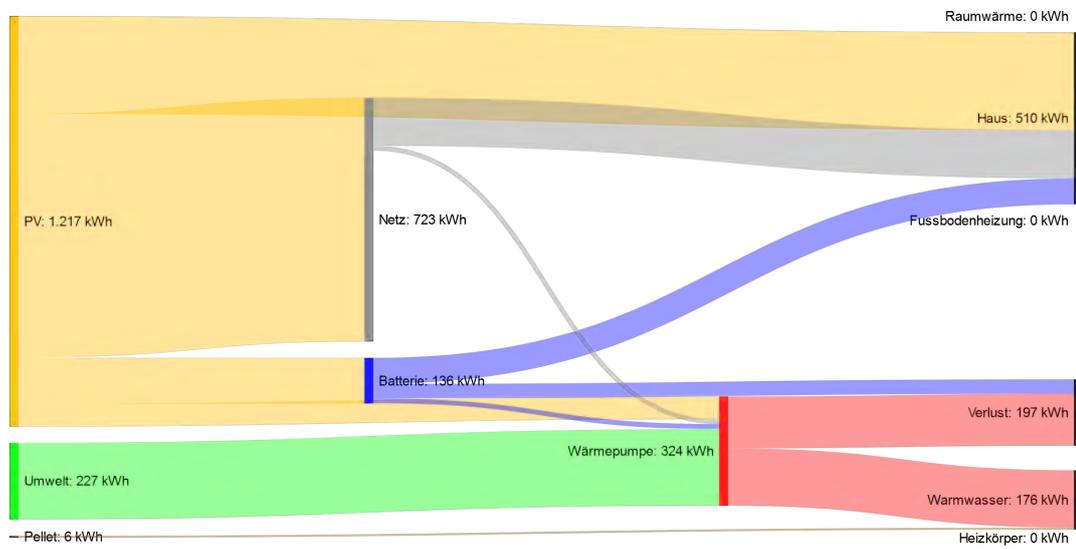


Abbildung 48: Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* für Juli 2017.

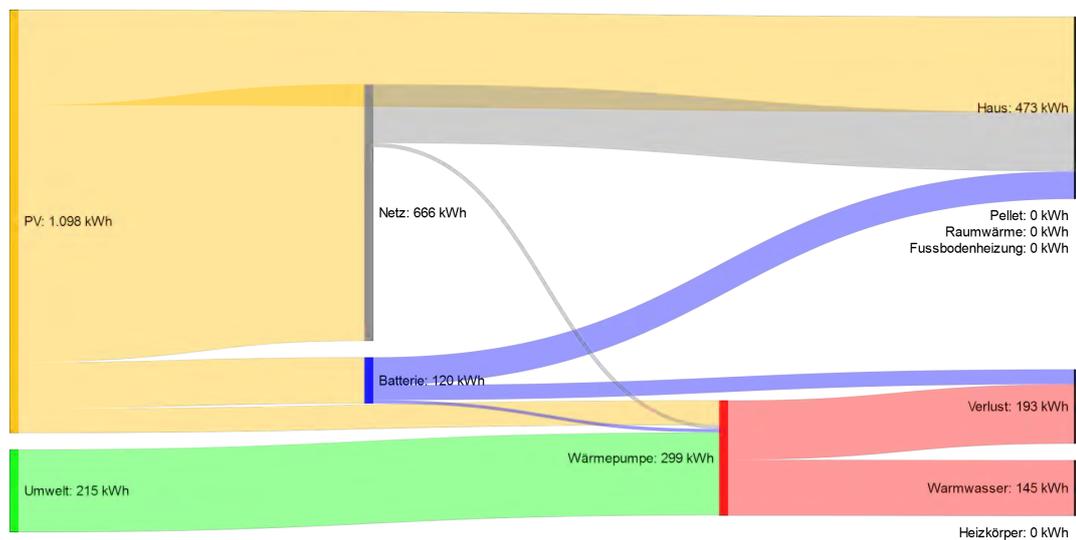
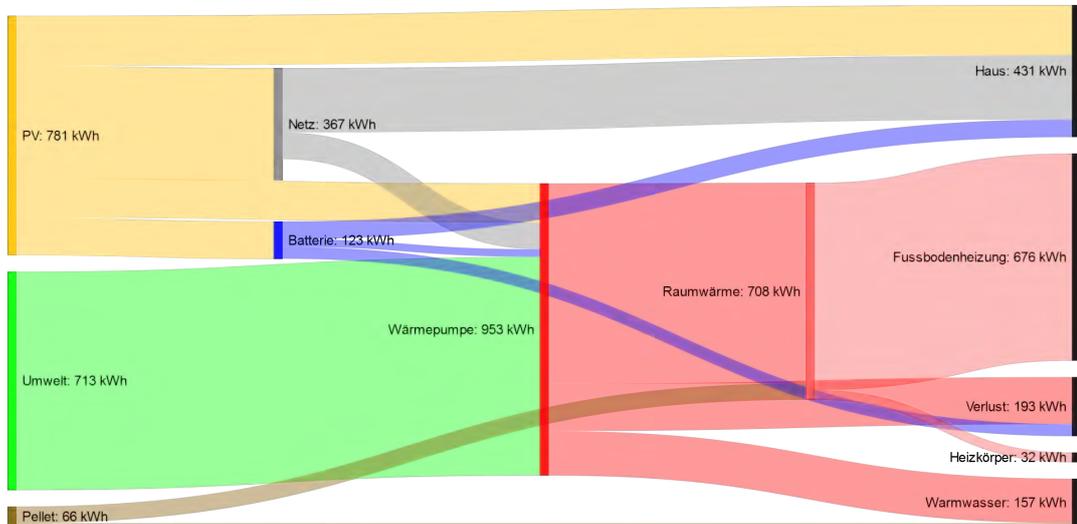
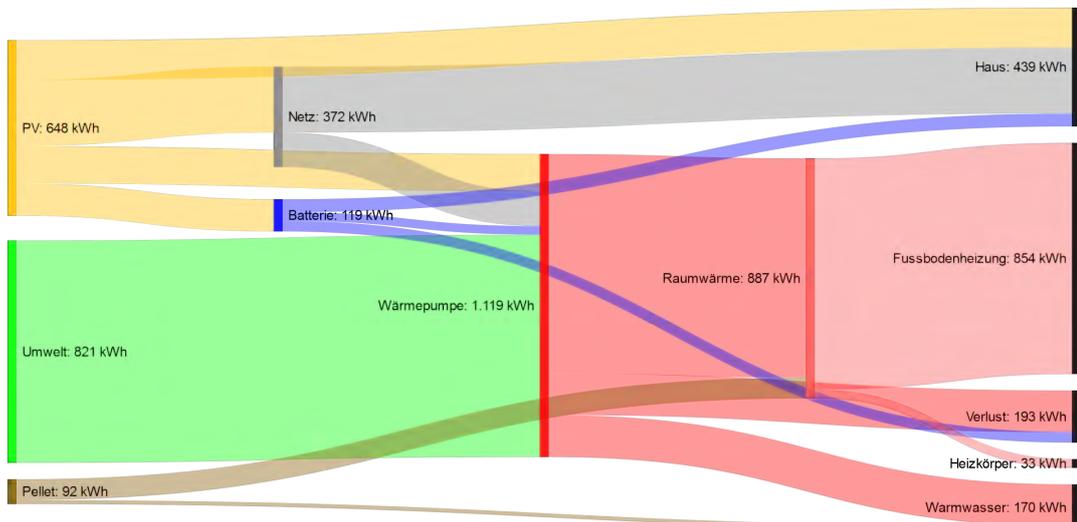
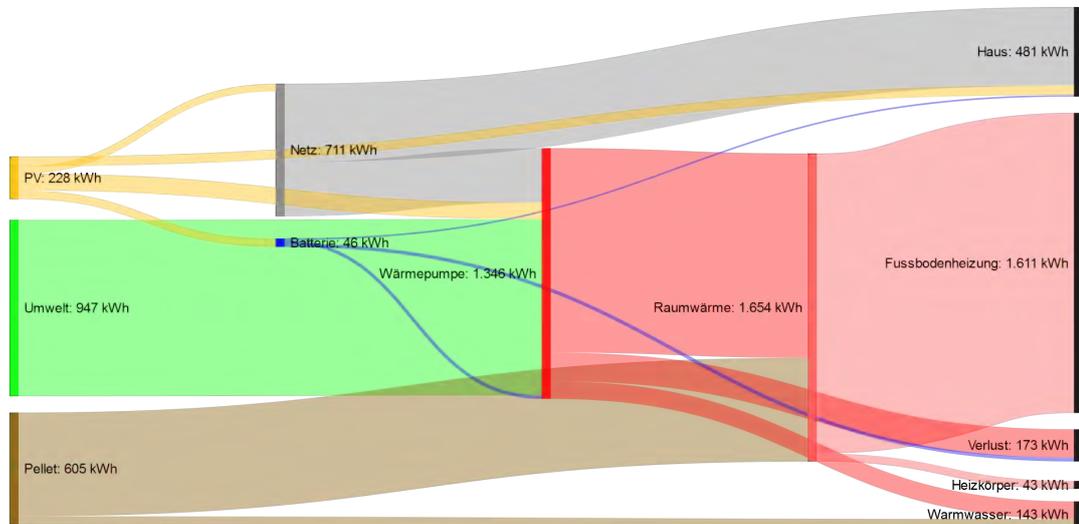
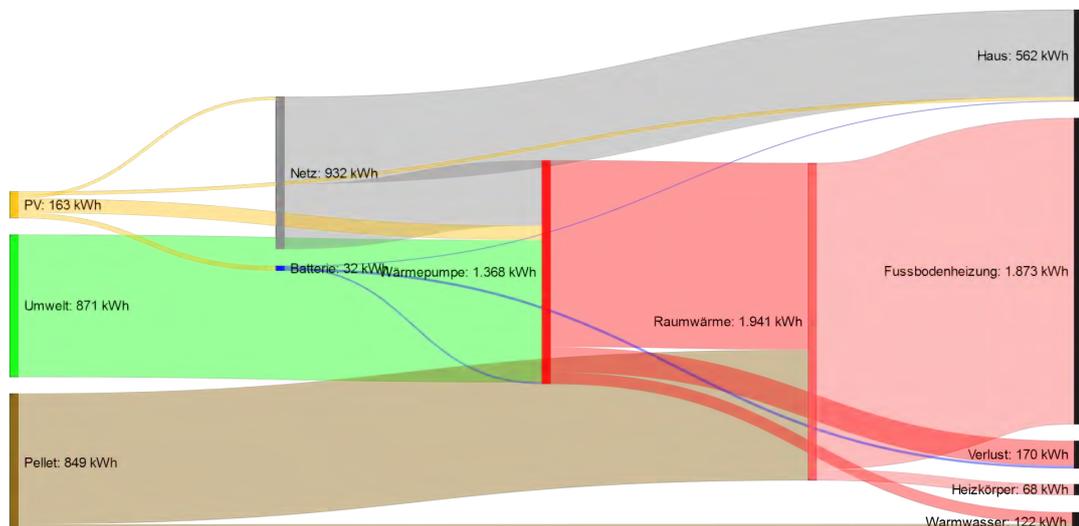


Abbildung 49: Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* für August 2017.

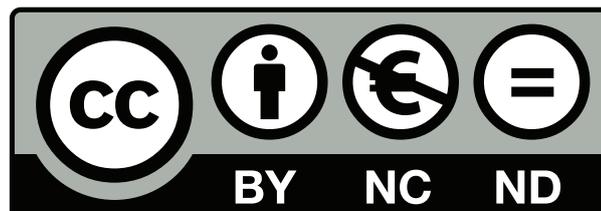
Abbildung 50: Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* für September 2017.Abbildung 51: Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* für Oktober 2017.

Abbildung 52: Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* für November 2017.Abbildung 53: Energieflussdiagramm des *Projekthaus Ulm* für Dezember 2017.

## B Ergebnisinfos

Die Ergebnisinfos dieser Projekts sind unter einer CC BY-NC-ND 4.0 Lizenz veröffentlicht (Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International).

Das heißt, jeder kann die Ergebnisinfos auf der Projekthomepage herunterladen, teilen oder auf seiner eigenen Homepage bereitstellen.



## ERGEBNISINFO

27.03.2018, Ausgabe 1

# Mögliche Auswirkungen des Klimawandels in Ulm



## ÜBERBLICK

- Analyse der Klimaprojektion im ungünstigen Fall für die Region Ulm / Neu-Ulm.
- Mögliche Entwicklung der Temperatur bis 2080.
- Veränderung des Wärmebedarfs eines Einfamilienhaus (KfW-70).
- Exemplarischer Strombedarf einer Luftwärmepumpe.

## Einleitung

Das Wetter, und damit auch der Klimawandel, haben einen großen Einfluss auf die vielfältigen Lebensbereiche der Menschen weltweit. Es ist wissenschaftlich gesichert und gut belegt, dass der Mensch Hauptverursacher der bereits laufenden globalen Erwärmung ist.

Trotz dieser Erkenntnisse und dem Übereinkommen von Paris im Jahr 2015, bei dem 195 Nationen die Begrenzung der menschengemachten globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C gegenüber vorindustriellen Werten verabschiedeten, sind die Maßnahmen nicht ausreichend. Laut den *Vereinten Nationen* wird bei den derzeitigen Aktivitäten das 2°C-Ziel deutlich verfehlt und die Erdtemperatur wird sich um mindestens 3 °C erhöhen.

Die Auswirkungen des Klimawandels sind global wie auch regional zu bemerken. So haben Hitzeereignisse und das Risiko von Hochwasser in Deutschland markant zugenommen. In den vergangenen Jahren haben außerdem schwere Gewitter größere Schäden angerichtet.

## Gebäudesimulation

Das „Projekthaus Ulm“, ein seit Anfang 2014 bewohnter Einfamilienhausneubau (KfW-Effizienzhaus 70), bietet hochaufgelöste Verbrauchsdaten im Strom- und Wärmebereich. Die Gebäudetechnik umfasst eine 9 kW Photovoltaik-Anlage, einen 4 kWh Batteriespeicher, eine Luftwärmepumpe mit Direktkondensation, eine Pellet-Heizung und eine Lüftung mit Wärme- und Feuchterückgewinnung.

Der Pelletöfen steht als weiterer unabhängiger Wärmeerzeuger zur Verfügung. Die automatische Steuerung des Pelletöfens und der Wärmepumpe erfolgt als sog. bivalenter, alternativer Betrieb. Oberhalb einer festgelegten Abschalttemperatur erfolgt die Wärmebereitstellung ausschließlich über die Luftwärmepumpe. Unterhalb der Abschalttemperatur wird der Pelletöfen betrieben, der die gesamte Heizwärme bereitstellen kann.

Die globale Erwärmung hat natürlich auch Auswirkungen auf den Alltag in der Region Ulm / Neu-Ulm. Die Untersuchung der möglichen lokalen Änderungen auf die Energiesysteme in Gebäuden (Neubau und Bestand) als Folge des Klimawandels, insbesondere des Wärmebedarfs und der lokalen Stromerzeugung durch Photovoltaik-Anlagen, sind Teil des Förderprojekts *AxIOME\_BAR*. Diese Analyse kann nur auf lokaler Ebene realisiert werden, da sich der Klimawandel unterschiedlich auf die verschiedenen Regionen in Deutschland auswirkt.

Die vorliegende Ergebnisinfo fasst die Ergebnisse der Klimaanalyse in der Region Ulm / Neu-Ulm zusammen und beschreibt die Auswirkungen des Klimawandels auf die Kombination von Photovoltaik-Anlagen und Luftwärmepumpen.

Das bedeutet, an kalten Tagen wird die Luftwärmepumpe nicht betrieben. Ein manuelles Bedienen des Pelletöfens ist zusätzlich möglich.

Das Modell der Luftwärmepumpe ist empirisch anhand von mittleren täglichen Verbrauchs- und Erzeugungswerten sowie der mittleren Tages-temperatur aus dem Jahr 2015 erstellt. Für das Modell wird die Heizgrenze normgerecht bei 15 °C definiert.

Die Photovoltaik-Anlage des Projekthauses ist nach [1] modelliert. Die Basis ist ein empirisches Modell erstellt mit Hilfe von Messdaten einer Vielzahl von Photovoltaik-Systemen. Dieses empirische Modell ist anhand typischer Technologien, wie sie in Deutschland zum Einsatz kommen, auf Parameter übertragen und seine Eignung in der Region Ulm überprüft worden.

GEFÖRDERT MIT  
MITTELN DER  
SOLARSTIFTUNG  
ULM/NEU-ULM





## Klimaprojektion

Der Deutsche Wetterdienst betreibt seit Jahrzehnten eine hauptamtliche Wetterstation seines Messnetzes in Ulm. Diese Station misst verschiedene meteorologische Daten (z.B. Lufttemperatur und -feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit) kann jedoch natürlich nur Aussagen über die Vergangenheit liefern.

Die meisten Klimaprojektionen basieren auf Szenarien, wie die Entwicklung der Menge an Treibhausgasen in Zukunft aussehen könnte. Die Ergebnisse hier nutzen die Klimaprojektion des sogenannten A1B-Szenarios [2,3].

Das A1B-Szenario geht von starkem Wirtschaftswachstum, rascher Entwicklung neuer Technologien sowie einem ausgewogenen Energiemix aus und erwartet einen mittleren globalen Temperaturanstieg von 2,8 °C. Die projektierte Unsicherheit reicht dabei von 1,7 °C bis 4,4 °C [4]. Letzteres ist einem Verfehlen der globalen Klimaziele und der Festlegungen des Paris-Abkommens gleichzusetzen.

Dieses Szenario bildet die Grundlage für die vorliegende Untersuchung. Dafür spricht nicht nur die freie Datenzugänglichkeit und Betrachtung des schlimmsten Falls, sondern auch die hohe zeitliche Auflösung. Eine Betrachtung von Mittelwerten, z.B. auf Monatsbasis, kann zu Fehlinterpretationen führen.

Mittelwerte sind stets mit einem Informationsverlust verbunden. So kann die z.B. die Information einer mittleren Geschwindigkeit von 100 km/h auf der Strecke von Stuttgart nach Ulm bedeuten, dass man den Weg in etwa einer Stunde gefahren ist, oder eben auch dass man eine halbe Stunde im Stau stand und die restliche Zeit mit 200 km/h über die Autobahn gefahren ist.

*“Mittelwerte sind stets mit einem Informationsverlust verbunden.”*

### KLIMA UND WETTER

Das **Klima** fasst die Wettererscheinungen zusammen, die den **mittleren** Zustand der Atmosphäre an ein bestimmten Ort charakterisiert. Die statistischen Eigenschaften (z.B. Mittelwert, Häufigkeit extremer Ereignisse) beruhen auf dem Jahresablauf und einer lange Bezugsperiode (normalerweise mindestens 30 Jahre).

Das **Wetter** beschreibt hingegen den **kurzfristigen**, physikalischen Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort.

## Zunahme der Temperatur in der Region

Das A1B-Szenario erwartet einen mittleren globalen Temperaturanstieg von 2,8 °C. Dies kann z.B. für die Region Ulm/Neu-Ulm eine mittlere Tagestemperatur von bis zu 34 °C im Sommer bedeuten.

Dabei ist zu beachten, dass es sich dabei um die mittlere Tagestemperatur handelt und nicht um die absoluten Werte im Tagesgang. Eine mittlere Tagestemperatur von 34 °C kann z.B. Temperaturen von 28 °C in der Nacht und 40 °C am Tag bedeuten.

Abbildung 1 zeigt die zeitliche Änderung der

mittleren Tagestemperatur während des Zeitraums von 2001 bis 2080 der A1B-Klimaprojektion. Über die horizontale Achse sind die Jahre aufgetragen und die vertikale Achse zeigt die Tage eines Jahres. Die mittlere Tagestemperatur ist farblich wiedergegeben von kalt (blau) bis heiß (rot).

Hier zeigt sich deutlich eine Zunahme der Anzahl an warmen und heißen Tagen in der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums. Gleichzeitig zeigen sich mildere Winter mit der Abnahme an Tagen mit mittleren Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts.

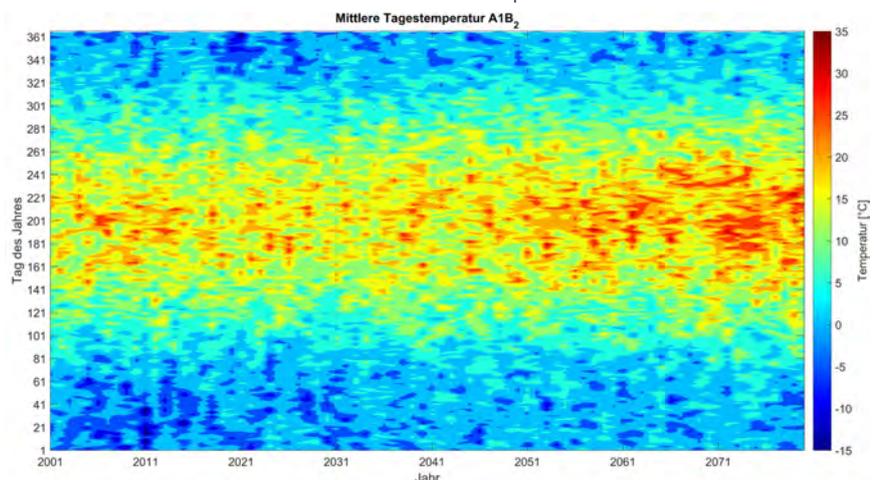


Abbildung 1: Mittlere Tagestemperatur der Periode 2001 bis 2080 anhand der A1B-Szenario-Klimaprojektion für den Standort Ulm.

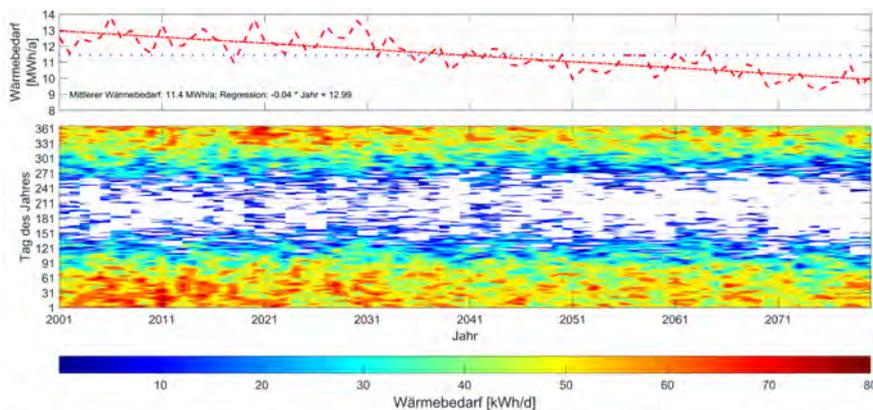


Abbildung 2: Jahressumme und Tagessumme des Wärmebedarfs des Projekthauses Ulm für die Periode 2001 bis 2080 anhand der A1B-Klimaprojektion.

## Veränderung des Wärmebedarfs

Der Wärmebedarf des Gebäudes hängt von verschiedenen Faktoren ab und wird normalerweise durch das Heizungssystem gedeckt. Der wichtigste und variabelste Faktor ist die Außentemperatur. Von ihr hängen die Wärmeverluste über die Außenhülle des Gebäudes (z.B. Dach, Fassade, Keller und Fenster) ab. Der Wärmebedarf eines Gebäudes hängt außerdem noch von der geografischen Lage, der Gebäudegeometrie, -alter und -größe ab.

Abbildung 2 zeigt die simulierte zeitliche Änderung der Wärmebedarfs während des Zeitraums 2001 bis 2080 für das Projekthaus Ulm. Über die horizontale Achse sind die Jahre aufgetragen und die vertikale Achse zeigt die Tage eines Jahres. Der obere Teil der Abbildung zeigt die Entwicklung der Jahressumme des Wärmebedarfs. Der tägliche Wärmebedarf ist farblich wiedergegeben von gering (blau) bis hoch (rot). Weiße Flächen markieren Tage, an denen kein Wärmebedarf für Raumwärme besteht.

Der Wärmebedarf zur Bereitstellung von Warmwasser wird in der Analyse nicht berücksichtigt, kann jedoch als annähernd konstant über den Jahresverlauf angenommen werden.

Aufgrund der Zunahme der milderen Winter mit der Abnahme an Tagen mit niedriger Tagesmitteltemperatur reduziert sich der Bedarf an Wärme.

Der langjährige Mittelwert liegt bei etwa 11.400 kWh/a. Jedoch zeigt sich eine mittlere, jährliche Abnahme von 400 kWh/a, beginnend bei ca. 13.000 kWh/a im Jahr 2001 bis zu etwa 10.000 kWh/a im Jahr 2080.

Bezogen auf das Projekthaus Ulm liegt der mittlere, spezifische Jahresheizenergiebedarf bei 39 kWh/m<sup>2</sup>a. Er reduziert sich im Mittel von 44 kWh/m<sup>2</sup>a zu Anfang des Untersuchungszeitraums auf 34 kWh/m<sup>2</sup>a aufgrund des klimabedingten Temperaturanstiegs.

## Strombedarf der Luftwärmepumpe und Deckung durch die Photovoltaik-Anlage

Der Haupterzeuger des Heizungssystems ist eine Luftwärmepumpe mit Direktkondensation im Wärmespeicher und Frischwassersystem. Mit dem Einsatz an elektrischer Arbeit entzieht die Luftwärmepumpe der Umgebung Wärme und führt diese der Heizung zu. Dabei entzieht sie der Umgebung mehr Wärme als elektrische Arbeit aufgewendet werden muss. Jedoch sinkt die Effizienz der Luftwärmepumpe allerdings umso mehr, je geringer die Lufttemperatur ist.

Ein Teil des Strombedarfs der Wärmepumpe kann direkt durch die Erzeugungsleistung der Photovoltaik-Anlage gedeckt werden. Die Entwicklung des Strombedarfs der Wärmepumpe und dessen Deckung durch die Photovoltaik-Anlage hängen ebenfalls stark von der Klimaentwicklung ab.

Es zeigt sich auch, dass die Deckung des Strombedarfs der Wärmepumpe durch die Photovoltaikanlage im Verlauf der Klimaprojektion geringer wird.

Zum Einen sinkt der Wärmebedarf insgesamt aufgrund der höheren Außentemperaturen. Mildere Winter führen zu einer höheren Effizienz der Luftwärmepumpe und damit zu geringeren Betriebszeiten, die durch die möglichen Erträge der Photovoltaik-Anlage im Winter gedeckt werden.

Zum Anderen werden die Perioden ohne Wärmebedarf für die Heizung im Sommer länger. In diesen Zeiten muss die Luftwärmepumpe nur vereinzelt starten, um den Bedarf an Warmwasser zu decken.

Zusammengefasst steht somit mehr Solarstrom für andere Zwecke zur Verfügung. Es kann jedoch angenommen werden, dass bei einer Zunahme von heißeren und längeren Sommern der Bedarf an Klimageräten zur Gebäudekühlung zunehmen wird.

## KLIMAPROJEKTION

Den Ausführungen in [5] folgend, wird hier von **Klimaprojektionen** und nicht von Klimaprognosen oder Klimavorhersagen gesprochen. Bei Prognosen und Vorhersagen erwartet man eine exakte Übereinstimmung der zeitlichen Entwicklung zwischen Simulationen und Beobachtungen. Aufgrund der hohen Unsicherheiten in den Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Klimas kann dies eine Klimaprojektion nicht leisten. Beispielsweise kann die Klimaprojektion für Samstag, den 24. Februar 2079, zwar Sonnenschein vorhersagen, jedoch wäre eine Übereinstimmung der Klimaprojektion und Messung über einen Zeitraum von mehr als 60 Jahren nur Zufall.

Klimaprojektionen bieten jedoch Übereinstimmung der statistischen Klimaeigenschaften zwischen Modell und Beobachtung. Daher werden meist auch nur Tages-, Monats- oder Jahresmittelwerte verwendet. Die hier genannten Extremwerten bei Temperaturen o.ä., sind nur mit Unsicherheiten behaftete Möglichkeiten.

Diese Möglichkeiten **können** eintreten, sind jedoch keine definitiven Notwendigkeiten, die eintreten **müssen**.

## IMPRESSUM

**Projektträger**

unw - Ulmer Initiativkreis  
nachhaltige  
Wirtschaftsentwicklung e.V.  
Olgastraße 82  
89073 Ulm

**Förderkennzeichen**

Projekt AxIOME\_BAR  
2017-01

**Herausgeber**

Ingenieurbüro Holger Ruf  
Dornstadter Straße 15  
89081 Ulm

**Layout und Design**

Michael Ruf

**Autoren**

Dr.-Ing. Holger Ruf  
Patrick Kober

**Urheberrecht**

Titelbild, Foto S. 2: Holger Ruf  
Abb. 1, 2: Projekthaus Ulm  
(Ruf, Kober)

Dieses Werk ist lizenziert unter einer  
Creative Commons Namensnennung  
- Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen  
4.0 International Lizenz (CC  
BY-NC-ND 4.0).



## Zusammenfassung

Der Klimawandel betrifft die unterschiedlichsten Regionen und Bereiche. Auch hat die globale Erwärmung Auswirkungen auf den Alltag in der Region Ulm/Neu-Ulm. Die Untersuchung der möglichen, lokalen Änderungen auf die Energiesysteme in Gebäuden (Neubau und Bestand) werden im Förderprojekt *AxIOME\_BAR* durchgeführt.

Der Grundidee des Projektes folgend, sind die Ergebnisse für die Allgemeinheit frei zugänglich.

Eine Erwärmung um 2 °C im Mittel hört sich nicht sehr dramatisch an, beschreibt aber nur die Änderung der langjährigen Mitteltemperatur. Eine Betrachtung von Mittelwerten auf z.B. Monatsbasis kann zu Fehlinterpretationen führen und vernachlässigt die Herausforderungen, die sich aus Extremwerten ergeben. Um dieser möglichen Fehlinterpretation zu begegnen wird die zeitlich hochaufgelöste Klimaprojektion zusammen mit Modellen, die hier in der Region validiert wurden, genutzt.

Im Projekthaus Ulm wird der -vor allem von der Außentemperatur abhängende- Wärmebedarf primär durch eine Luftwärmepumpe gedeckt. Wird die angenommene Klimaprojektion angesetzt, zeigt sich bis 2080 eine mittlere, jährliche Abnahme von 400 kWh an Raumwärme.

Durch den geänderten Wärmebedarf ändert sich auch der Strombedarf der Luftwärmepumpe und die Deckung durch die Photovoltaik-Anlage. Ein Teil des Strombedarfs der Wärmepumpe kann direkt durch die Erzeugung der Photovoltaik-Anlage gedeckt werden.

In den Wintermonaten reicht auch in Zukunft der Strom der Photovoltaik-Anlage nicht aus, um den Strombedarf der Wärmepumpe zu decken. Es muss zusätzliche Energie aus dem öffentlichen Netz entnommen werden. Die Perioden mit annähernder Deckung sind im Frühjahr und im Herbst, während im Sommer mehr Strom erzeugt wird als benötigt wird.

Die schon vorhandenen Messdaten zeigen, dass der Klimawandel auch in Ulm schon begonnen hat und den Betrieb von Gebäuden und Anlagen beeinflussen wird.

## Weitere Informationen

In dem Buch *Klimawandel in Deutschland* (ISBN 978-3-662-50397-3) fassen über 100 Autoren die bereits zu beobachtenden und zukünftigen Veränderungen des Klimawandels für alle Themenbereiche und gesellschaftlichen Sektoren zusammen.

Alle Texte in dem Buch wurden mehrfach wissenschaftlich begutachtet und können als Einstieg in die komplexen Zusammenhänge des Klimawandels dienen.

Das elektronische eBook ist ein Open Access Buch und frei zugänglich auf [link.springer.com](http://link.springer.com)

Der ausführliche Bericht zur *Klimadatenanalyse* für die Region Ulm/Neu-Ulm im Rahmen des Projektes, sowie weitere Veröffentlichungen und Informationen zum Projekthaus Ulm sind frei zugänglich auf [www.projekthaus-ulm.de](http://www.projekthaus-ulm.de)



## Quellen

- [1] H. Ruf, M. Schroedter-Homscheidt, G. Heilscher, und H. G. Beyer, "Quantifying residential PV feed-in power in low voltage grids based on satellite-derived irradiance data with application to power flow calculations," *Solar Energy*, vol. 135, pp. 692–702, 2016. DOI: 10.1016/j.solener.2016.06.001
- [2] M. Lautenschlager et al, Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.2, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD: CLM\_A1B\_2\_D3. Available: [https://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=CLM\\_A1B\\_2\\_D3](https://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=CLM_A1B_2_D3) (2017, Aug. 18). DOI: 10.1594/WDCC/CLM\_A1B\_2\_D3
- [3] [www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/sres-szenarien\\_node.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/sres-szenarien_node.html)
- [4] L. Bernstein und R. K. Pachauri, *Klimaänderung 2007: Synthesebericht*. Berlin, 2008. ISBN: 978-3-00-025397-3
- [5] G. Brasseur, D. Jacob, und S. Schuck-Zöller, Hrg., *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*, 1. Auflage: Springer Verlag, 2016. ISBN: 978-3-662-50397-3

## ERGEBNISINFO

22.08.2018, Ausgabe 2



## Heizkostensimulation

## Einleitung

Die Energiewende in Deutschland findet auf regionaler Ebene statt. Eine Herausforderung in Ulm ist dabei der Umgang mit den Überschüssen aus über 100 MW installierter Photovoltaikleistung im Netzgebiet der Stadtwerke Ulm.

Heutige Technologien bieten wirtschaftliche Möglichkeiten für private Gebäude, sich von den steigenden Energiekosten teilweise unabhängig zu machen und aktiv an der Transformation des Energiesystems in Deutschland teilzunehmen.

Im Forschungsbereich wird unter dem Begriff **Sektorkopplung** derzeit die verstärkte Nutzung der überschüssigen Energie aus Photovoltaik (PV)-Anlagen für Heizungszwecke, Elektromobilität und zur Erhöhung des Eigenverbrauchs untersucht.

## Gebäudesimulation

Das „ProjektHaus Ulm“, ein seit Anfang 2014 bewohnter Neubau eines Einfamilienhauses (KfW-Effizienzhaus 70), bietet hochaufgelöste Verbrauchsdaten im Strom- und Wärmebereich. Die Gebäudetechnik umfasst eine 9 kW PV-Anlage, einen 4 kWh Batteriespeicher, eine Luftwärmepumpe mit Direktkondensation, eine Pellet-Heizung und eine Lüftung mit Wärme- und Feuchterückgewinnung.

Die Steuerung schaltet die Wärmepumpe bevorzugt ein wenn viel Strom von der PV-Anlage zur Verfügung steht, d.h. die Wärme wird zu wirtschaftlichen Zeiten produziert. Anstelle des, in der Praxis häufig installierten, elektrischen Heizstabs steht der Pelletofen als weiterer unabhängiger Wärmeerzeuger zur Verfügung. Oberhalb einer festgelegten Abschalttemperatur erfolgt die Wärmebereitstellung ausschließlich über die Luftwärmepumpe. Unterhalb der Abschalttemperatur wird der Pelletofen betrieben, der die gesamte Heizwärme bereitstellen kann. Das bedeutet, an kalten Tagen wird die Luftwärmepumpe nicht betrieben.

Durch die Nutzung des ProjektHaus Ulm als Wohnhaus einer Familie lassen sich reale Daten

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 ein neu errichtetes Niedrigenergiehaus Messtechnik und eine Datenaufzeichnung installiert.

Durch Publikationen und Tagungsbeiträge werden diese Daten einer breiten Untersuchung der Kosten verschiedener Heizsysteme für moderne Einfamilienhäuser in der Region Ulm der Öffentlichkeit zugänglich gemacht und können Anreize sowie Ideen für zukünftige Projekte und Entscheidungen bieten.

Welche Kosten der verschiedenen Heizsysteme in Neubauprojekten für die Region Ulm anfallen, wird nachfolgend in einem Vergleich dargestellt.

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.

Es werden sieben verschiedene Varianten von Gebäudeheizungen untersucht [1]. Dazu zählen die reinen Heizsysteme Luft-Wärmepumpe, Pelletheizung, Fernwärme, Gasheizung, Ölheizung, sowie die Kombination einer Luft-Wärmepumpe mit PV-Anlage und die Kombination der Luft-Wärmepumpe mit PV-Anlage und einem Pelletofen. Dabei werden 40% des Strombedarfs der Wärmepumpe durch die PV-Anlage gedeckt.

Das empirische Modell der Luftwärmepumpe ist anhand von mittleren täglichen Verbrauchs- und Erzeugungswerten sowie der mittleren Tagestemperatur aus dem Jahr 2015 erstellt. Der gemessene Wärmebedarf des Projekthauses wird als konstant für die simulierten 20 Jahre angenommen. Basierend auf der bisherigen Preisentwicklung, werden für die verschiedenen Brennstoffe ähnliche jährliche Preissteigerung von 3,0 % bis 4,8 % angenommen.

## ÜBERBLICK

- Gebäudesimulation für Heizungen über 20 Jahre
- Berechnung der Gesteungskosten für sieben Heizsysteme
- Sensitivitätsanalyse der Gesteungskosten für Luftwärmepumpen in Kombination mit PV

GEFÖRDERT MIT  
MITTELN DER  
SOLARSTIFTUNG  
ULM/NEU-ULM





## Ergebnisse

Der klimabereinigte Wärmebedarf des Projekthauses lag im Mittel bei 15.430 kWh, inklusive der Warmwasserbereitung.

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.

Alle Preise und Kosten sind im Folgenden ohne die gesetzliche Mehrwertsteuer angegeben.

Für die Kosten der Heizungssysteme werden nur die reinen Investitionskosten der Heizungsanlage ohne Heizflächen und Leitungssysteme berücksichtigt. Dies führt zu geringeren Gesteuerungskosten im Vergleich zu [2]. Werden die Kosten für die Heizflächen und Rohre mit berücksichtigt, sind die Ergebnisse vergleichbar.

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.

## Gestehungskosten

Die Gestehungskosten umfassen die gesamten Kosten einer Anlage. Sie setzen sich aus dem Verhältnis der durchschnittlichen jährlichen Kosten und Wärmeenergien zusammen. Hierbei fließen neben den jährlichen Brennstoffkosten auch die Kosten für die Investition, sowie Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten in die Berechnung ein.

Die Gestehungskosten mit den o.g. Simulationsparametern und Anteilen (PV-Stromanteil 40 %) sind in Abbildung 1 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), Fernwärmeversorgung (0,171 €/kWh) und Pelletheizung (0,162 €/kWh).

Die Gestehungskosten einer Luft-Wärmepumpe in reinem Netzbetrieb sind 0,151 €/kWh. Die günstigste Erzeugungsort (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 erneute 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 Gestehungskosten 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.

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.

### GESTEHUNGSKOSTEN

Der Bezug der Jahresgesamtkosten auf die jährliche Nutzwärme ergeben die **Gestehungskosten für Wärme je Anlage**. Die Jahresgesamtkosten setzen sich aus den folgenden Kosten zusammen:

- kapitalgebundene Kosten (aus Kapital- und Instandhaltungskosten)
- verbrauchsgebundene Kosten (Kosten für Brennstoffe, Hilfsenergie, Ascheentsorgung und sonstige Betriebsstoffe)
- betriebsgebundene Kosten (Kosten für Personal, Emissionsmessungen, Wartungsverträge)
- sonstige Kosten (z.B. Kosten für Versicherung, Pacht, usw.)

Dies ist vergleichbar mit den Kosten für gefahrene Kilometer bei Autos. Hier werden auch nicht nur die Kosten für Kraftstoff berücksichtigt, sondern auch KFZ-Steuer und Versicherung, Kundendienst, sowie Reparaturen.

Netto-Gestehungskosten pro kWh über 20 Jahre

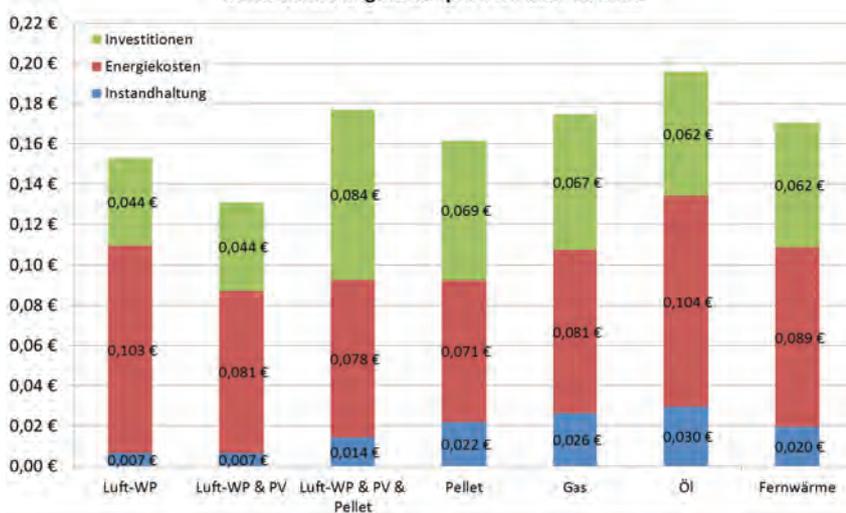


Abbildung 1: Gestehungskosten pro kWh Wärmeenergie für verschiedene Heizungssysteme für einen Zeitraum von 20 Jahren. Es werden die jährlichen Brennstoffkosten sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten berücksichtigt. Es werden 40 % des PV-Stroms genutzt.

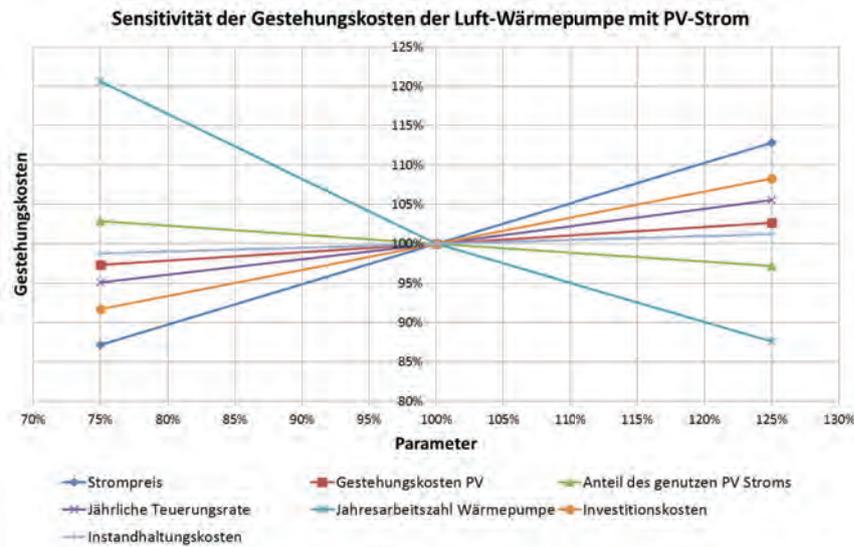


Abbildung 2: Sensitivität der Gesteungskosten pro kWh Wärmeenergie für die Kombination aus Luft-Wärmepumpe und PV-Anlage bei Änderungen der Eingangsparameter um 25 %.

*„Die Jahresarbeitszahl hat den größten Einfluss auf die Gesteungskosten.“*

## Sensitivitätsanalyse für Luftwärmepumpen in Kombination mit PV

Die Sensitivitätsanalyse untersucht die Empfindlichkeit der Gesteungskosten auf Änderungen der Eingangsparameter. Diese Untersuchung wird nur für die Kombination aus Luft-Wärmepumpe und PV-Anlage durchgeführt.

Als Eingangsparameter der Simulation zählen der Strompreis des Versorgungsunternehmens, die Gesteungskosten 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, die dem 100%-Fall entspricht, wurde jeder einzelne Eingangsparameter um 25 % erhöht und gesenkt, während die anderen Eingangsparameter konstant gehalten wurden (Abbildung 2).

Es zeigt sich, dass der Eingangsparameter mit dem größten Einfluss die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe ist. Eine um 25 % höhere Jahresarbeitszahl senkt die Gesteungskosten um 12 % während sich eine um 25 % niedrigere Jahresarbeitszahl mit einer

Erhöhung der Gesteungskosten um 21 % auswirkt. Dies zeigt auch den überproportionalen Einfluss der Jahresarbeitszahl auf die Gesteungskosten.

Der Eingangsparameter mit dem zweitgrößten Einfluss ist der Arbeitspreis für elektrische Arbeit. Eine Änderung um 25 % wirkt sich proportional mit 13 % auf die Gesteungskosten aus.

Der dritt wichtigste Eingangsparameter sind die Investitionskosten, welche bei einer Parameteränderung um 25 % eine Änderung der Gesteungskosten um 8 % bewirken. Eine Änderung der jährlichen Teuerungsrate des Arbeitspreises um 25 % verändert die Gesteungskosten um etwa 5 %.

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.

## EIGENVERBRAUCH PV-ANLAGE

Im Projekthaus Ulm wird nur 40% des Stromes aus der PV-Anlage direkt von der Wärmepumpe genutzt. Da kann man sich die Frage stellen, warum nicht mehr genutzt wird?

Das grundlegende Problem ist die **Gleichzeitigkeit** von PV-Strom-Erzeugung und Strombedarf der Wärmepumpe.

Zum Einen erzeugt die PV-Anlage im Sommer viel Strom, während der Wärmebedarf, und damit der Strombedarf der Wärmepumpe, gering ist. Der überschüssige Strom wird anderweitig im Haus genutzt oder in das öffentliche Stromnetz eingespeist.

Umgekehrt ist der Wärmebedarf im Winter groß, aber die PV-Anlage liefert wenig bis keinen Strom aufgrund der geringen solaren Einstrahlung, schlechtem Wetter oder gar Schnee auf den PV-Modulen. Der benötigte Strom für die Wärmepumpe wird dann aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen.

Auch während des Tages kann die Wärmepumpe zu Zeiten Strom benötigen, zu denen die PV-Anlage nicht arbeitet (z.B. Morgens vor Sonnenaufgang) oder die PV-Anlage liefert Strom, allerdings hat die Wärmepumpe bereits den gesamten Wärmebedarf und Wärmespeicher gefüllt und kann diesen Strom nicht mehr in Wärme umwandeln.

## IMPRESSUM

## Projektträger

unw - Ulmer Initiativkreis  
nachhaltige  
Wirtschaftsentwicklung e.V.  
Olgastraße 82  
89073 Ulm

## Förderkennzeichen

Projekt AxIOME\_BAR  
2017-01

## Herausgeber

Ingenieurbüro Holger Ruf  
Dornstädter Straße 15  
89081 Ulm

## Layout und Design

Michael Ruf (Medienfachwirt Print)

## Autoren

Dr.-Ing. Holger Ruf  
Patrick Kober

## Urheberrecht

Titelbild: TBIT/Pixabay.com  
Foto S. 2: avantrend/Pixabay.com  
Abb. 1, 2: Projekthaus Ulm  
(Ruf, Kober)

Dieses Werk ist lizenziert unter einer  
Creative Commons Namensnennung  
- Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen  
4.0 International Lizenz (CC  
BY-NC-ND 4.0).



Heizungsanlage	Mittlere Jahreskosten	Gesamtkosten	Einsparung gegenüber Ölheizung
Ölheizung	3.020 €	60.413 €	-
Gasheizung	2.732 €	54.640 €	5.772 €
Pelletheizung	2.494 €	49.882 €	10.530 €
Fernwärme	2.632 €	52.631 €	7.781 €
Luft-Wärmepumpe	2.332 €	46.644 €	13.768 €
Luft-Wärmepumpe und PV-Anlage	2.017 €	40.339 €	20.074 €
Luft-Wärmepumpe, PV-Anlage, Pelletofen	2.730 €	54.606 €	5.806 €

Tabelle 1: Gesamtkosten für Heizungsenergie basierend auf den Gestehungskosten über 20 Jahre kalkuliert. Die gesamte Heizenergiemenge beträgt 303.660 kWh.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Kosten von verschiedenen Heizungssystemen für moderne Einfamilienhäuser wurden über 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 (Tabelle 1).

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. der Jahresheizenergiebedarf und die Instandhaltungskosten in der Simulation 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 durch die Smart Meter im Projekthaus Ulm lassen sich zukünftig auch noch Analysen hinsichtlich zeitvariabler Stromtarife durchführen.

## Weitere Informationen

Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) hat ebenfalls im Jahr 2016 eine Vergleichsstudie zu Heizungssystemen im Neubau durchgeführt. Verglichen wurden die jährlichen Kosten von über 5 Heizsystemen in fünf Gebäudevarianten.

Der Heizkostenvergleich kann kostenlos abgerufen werden: [www.bdew.de/energie/bdew-heizkostenvergleich-neubau-2016/](http://www.bdew.de/energie/bdew-heizkostenvergleich-neubau-2016/)

Der jeweils aktuelle und ausführliche Bericht zur **Kostenanalyse** für die Region Ulm/Neu-Ulm, sowie weitere Veröffentlichungen und Informationen zum Projekthaus Ulm, sind frei zugänglich auf [www.projekthaus-ulm.de](http://www.projekthaus-ulm.de)



## Quellen

- [1] H. Ruf und P. Kober, "Untersuchung der Kosten verschiedener Heizsysteme für moderne Einfamilienhäuser in der Region Ulm; Version 1.1," Online, 2018. Verfügbar unter: [https://www.projekthaus-ulm.de/downloads/AxIOME\\_BAR\\_Bericht\\_Gestehungskosten.pdf](https://www.projekthaus-ulm.de/downloads/AxIOME_BAR_Bericht_Gestehungskosten.pdf).
- [2] B. Mailach und B. Oschatz, "BDEW-Heizkostenvergleich Neubau 2016: Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung im Neubau," Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), Online, 2016. Verfügbar unter: <https://www.bdew.de/energie/bdew-heizkostenvergleich-neubau-2016/>