



## Abschlussbericht

*future:heatpump*

### Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen

<b>Antragsteller</b>	Technische Universität Braunschweig
<b>Ausführende Stelle</b>	Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS), Univ.- Prof. Dr.- Ing. M. Norbert Fisch Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften Mühlenpfordtstraße 23, 38106 Braunschweig
<b>Bearbeitung</b>	Dipl.-Ing. Franziska Bockelmann (Projektleitung) Dipl.-Ing. Markus Peter Dipl.-Ing. Mathias Schlosser
<b>Förderung</b>	Gefördert durch:  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie  aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
<b>Förderkennzeichen</b>	03ET1273A
<b>Laufzeit</b>	März 2015 bis Juli 2018
<b>Stand</b>	31.01.2019 (Abschlussbericht)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 03ET1273A gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

***Industriepartner***

**Doppelacker GmbH**

Tasdorfer Str. 42, 15370 Petershagen-Eggersdorf  
Internet: [www.doppelacker.com](http://www.doppelacker.com)

**Europols GmbH & Co. KG**

Ingolstädter Straße 51, 92318 Neumarkt  
Internet: [www.europoles.com](http://www.europoles.com)

**Stiebel Eltron GmbH & Co. KG**

Dr.-Stiebel-Straße 33, 37603 Holzminden  
Internet: [www.stiebel-eltron.de](http://www.stiebel-eltron.de)

---

**Uponor GmbH**

Industriestrasse 56, 97437 Hassfurt  
Internet: [www.uponor.de](http://www.uponor.de)

**Viessmann Werke GmbH & Co. KG**

Viessmannstraße 1, 35108 Allendorf (Eder)  
Internet: [www.viessmann.com](http://www.viessmann.com)

---

***Unterstützung beim Monitoring***

**deematrix Energiesysteme GmbH (eTank)**

Ernst-Thälmann-Str. 55, 15517 Fürstenwalde  
Internet: [www.etank.de](http://www.etank.de)

**geoKOAX GmbH**

Am Kirchenhölzl 13, 82166 Gräfelfing  
Internet: [www.geokoax.com](http://www.geokoax.com)

**Projektdaten und Fördergeber**

<b>Projekttitle</b>	future:heatpump - Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen
<b>Projektnummer</b>	03ET1273A
<b>Projektförderung</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
<b>Projektträger</b>	PTJ - Projektträger Jülich - Forschungszentrum Jülich GmbH Ansprechpartner: Herr Stricker / Herr Kollmann
<b>Projektlaufzeit</b>	01.03.2015 – 31.07.2018 (inkl. kostenneutraler Verlängerung)
<b>Förderung</b>	566.480 € (Förderquote 82,2%)
<b>Ausführende Stelle</b>	Technische Universität Braunschweig Institut für Gebäude- und Solartechnik Univ.- Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch Mühlenpfordtstr. 23, D - 38106 Braunschweig Tel: 0531 / 391 3555, Fax: 0531 / 391 8125 Internet: <a href="http://www.tu-braunschweig.de/igs">www.tu-braunschweig.de/igs</a> E-Mail: <a href="mailto:igs@tu-bs.de">igs@tu-bs.de</a>

# Inhaltsverzeichnis

1	KURZFASSUNG .....	6
2	ABSTRACT.....	7
3	PROJEKTVORSTELLUNG.....	8
3.1	MOTIVATION UND ZIELE DES FORSCHUNGSVORHABENS .....	8
3.2	AUFBAU UND METHODIK DES FORSCHUNGSVORHABENS .....	9
4	STAND DES WISSENS UND DER TECHNIK.....	13
4.1	WÄRMEPUMPE .....	13
4.2	NIEDERTEMPERATURWÄRMEQUELLEN .....	15
4.3	PLANUNG UND ERSTELLUNG VON ENERGIEKONZEPTEN MIT WÄRMEPUMPENSYSTEMEN .....	15
5	WÄRMEQUELLEN UND WÄRMEÜBERTRAGER (AP1) .....	17
5.1	NIEDERTEMPERATURWÄRMEÜBERTRAGER .....	18
5.1.1	Quelle Erreich .....	18
5.1.2	Quelle Luft .....	19
5.1.3	Quelle Wasser .....	20
5.2	RANDBEDINGUNGEN UND EINFLUSSFAKTOREN .....	21
5.3	MARKTRECHERCHER .....	22
5.4	QUERVERGLEICH DER WÄRMEÜBERTRAGER .....	25
6	SYSTEMKONFIGURATION (AP2) .....	29
7	MONITORINGGEBÄUDE (AP3) .....	31
7.1	MONITORINGERGEBNISSE GEBÄUDE.....	34
7.2	QUERVERGLEICH DER GEBÄUDE- UND ANLAGENKONZEPTER .....	37
8	WETTERDATEN .....	48
9	SIMULATIONEN (AP4) .....	54
9.1	SIMULATIONSPROGRAMM TRNSYS 17 .....	54
9.2	GEBÄUDE- UND ANLAGENMODELL .....	55
9.2.1	Einfamilienhaus.....	58
9.2.2	Mehrfamilienhaus .....	59
9.2.3	Bürogebäude.....	61
9.3	HEIZLASTERMITTLUNG .....	63
9.4	NIEDERTEMPERATURWÄRMEÜBERTRAGER .....	66
9.5	ERDREICHTEMPERATUREN UND -PARAMETER .....	66
9.6	WÄRMEPUMPE .....	68
9.7	REFERENZWETTERDATEN .....	71
9.8	VALIDITÄTSKRITERIEN DER NIEDERTEMPERATURWÄRMEQUELLEN UND –WÄRMEÜBERTRAGER .....	71
9.9	SIMULATIONSERGEBNISSE.....	74
10	VORDIMENSIONIERUNGSPROGRAMM WP <sub>SOURCE</sub> (AP8).....	79
10.1	VON DER GRUNDLAGENERMITTLUNG ZUR BEWERTUNG UND AUSLEGUNG .....	80
10.2	AUFBAU UND METHODIK VON WP <sub>SOURCE</sub> .....	82
10.3	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG .....	87
10.3.1	Wärmepumpe .....	88
10.3.2	Niedertemperaturwärmeübertrager .....	88
10.3.3	Jahresgesamtkosten .....	89
11	SONDERBETRACHTUNGEN (AP5) .....	91

11.1	WÄRMEPUMPEN IN UNTERSCHIEDLICHEN KLIMATA .....	91
11.2	KOPPLUNG VON PHOTOVOLTAIK UND WÄRMEPUMPE .....	93
11.3	GASABSORPTIONSWÄRMEPUMPE VS. ELEKTRISCH ANGETRIEBENER WÄRMEPUMPE .....	95
11.4	WÄRMEPUMPEN IM NAHWÄRMENETZ .....	96
11.5	ABLÜFTWÄRMEPUMPE IM PASSIVHAUS.....	99
12	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....	102
13	ÖFFENTLICHKEITSARBEIT .....	105
13.1	STUDENTISCHE BEARBEITUNGEN.....	105
13.2	VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE.....	106
14	QUELLEN UND LITERATUR ZUM PROJEKT.....	107
15	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....	108
16	ANHANG .....	110
16.1	WÄRMEÜBERTRAGERSTECKBRIEFE .....	110
16.2	INFORMATIONEN ZUR SIMULATIONSUMSETZUNG .....	122
16.2.1	<i>Wetterdaten</i> .....	122
16.2.2	<i>Simulationsmodell</i> .....	122
16.2.3	<i>Trinkwarmwasser - European Tapping Cycles</i> .....	126
16.3	GEBÄUDESTECKBRIEFE .....	127
16.4	MONITORINGERGEBNISSE DER GEBÄUDE.....	141
16.4.1	<i>Gebäude 1 - EFH</i> .....	141
16.4.2	<i>Gebäude 2 – EFH</i> .....	145
16.4.3	<i>Gebäude 3 – EFH</i> .....	150
16.4.4	<i>Gebäude 4 – EFH</i> .....	155
16.4.5	<i>Gebäude 5 – EFH</i> .....	159
16.4.6	<i>Gebäude 6 – MFH</i> .....	163
16.4.7	<i>Gebäude 7 – MFH</i> .....	167
16.4.8	<i>Gebäude 8 – MFH</i> .....	171
16.4.9	<i>Gebäude 9 – MFH</i> .....	175
16.4.10	<i>Gebäude 10 – MFH</i> .....	179
16.4.11	<i>Gebäude 11 – MFH</i> .....	183
16.4.12	<i>Gebäude 12 – Bürogebäude</i> .....	187
16.4.13	<i>Gebäude 13 – Bürogebäude</i> .....	190
16.4.14	<i>Gebäude 14 – Schule</i> .....	195

# 1 KURZFASSUNG

Im Rahmen des zunehmenden Einsatzes von Wärmepumpen steigt auch die Zahl der am Markt angebotenen, potentiell nutzbaren Niedertemperaturwärmequellen und zugehöriger Wärmeübertrager. Die größte Auswahl steht für die Nutzung des Erdreichs, für sogenannte oberflächennahe Geothermie zur Verfügung. Die angebotenen Systeme unterscheiden sich in ihren Bauweisen und Angaben zu den möglichen Eintrags- und Entzugsleistungen sowie Einbautiefen. Einen wissenschaftlichen Vergleich der Konzepte gibt es zu Beginn des Forschungsprojektes „future:heatpump“ jedoch nicht. Um einen für sachgerechte Planungen notwendigen Überblick über die verfügbaren Technologien und Randbedingungen, wie etwa Flächenbedarfe und Investitionskosten oder weitere Kennwerte zu den einzelnen Systemen und Komponenten zu erhalten, entsteht Planern ein erheblicher Aufwand. In der Praxis wird dieser Aufwand jedoch nur in seltenen Fällen betrieben. Um bereits im Zusammenhang mit der Konzeption und/oder Vorplanung der Wärmeversorgung eines Gebäudes die Bewertung geeigneter Wärmepumpensysteme, Niedertemperaturwärmequellen und -übertrager zu erleichtern, aber auch um die Wärmepumpentechnologie im Allgemeinen zu qualifizieren, und ihre sinnvolle Verbreitung zu unterstützen, ist eine übersichtliche Zusammenstellung von unterschiedlichen technologischen Ansätzen wünschenswert.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Forschungsprojekt future:heatpump widmet sich der energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Niedertemperaturwärmequellen für Wärmepumpen. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird das Vordimensionierungsprogramm WP<sub>SOURCE</sub> entwickelt. WP<sub>SOURCE</sub> ist ein Microsoft Excel basiertes Werkzeug zur Gegenüberstellung und grundlegenden Bewertung sowie zur Vorauswahl und überschlägigen Dimensionierung unterschiedlicher Wärmequellen und -übertragersysteme für vom Planer projektspezifisch definierte Anwendungsfälle von Wärmepumpen. Das Programm ermöglicht eine Bewertung verschiedener Niedertemperaturwärmequellen und -übertrager für Anlagen und Konzepte im Bereich von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden sowohl im Fall von Neubauten als auch bei Sanierungen.

Auf der Grundlage vorgegebener Anlagenparameter, dem resultierenden thermischen Verhalten des Gesamtsystems und aktueller Marktdaten, stellt WP<sub>SOURCE</sub> für individuell vorgegebene Einsatzbedingungen mögliche Anlagenkonfigurationen zusammen und erlaubt es dem Anwender, thermisch und wirtschaftlich geeignete Niedertemperaturwärmequellen und -wärmeübertrager für die in Planung befindliche Wärmepumpenanlage zu identifizieren. Die Aufbereitung und Gegenüberstellung der Daten bietet einen direkten Vergleich verschiedener Wärmequellen und -übertragersysteme. Neben weiteren relevante Kriterien, werden u. a. die Entzugsleistungen der Wärmeübertrager in Verbindung mit den ihnen zugeordneten Wärmequellen und die unter den gegebenen Randbedingungen zu erwartenden Arbeitszahlen und Kosten dokumentiert.

In einer Literatur- und Marktrecherche werden die wesentlichen planungsrelevanten Daten zu möglichen Wärmequellen sowie marktverfügbaren Wärmepumpen und Wärmeübertragersystemen erfasst. Weiterhin wird das Betriebsverhalten von 14 Gebäuden mit unterschiedlichen Wärmeübertragersystemen messtechnisch analysiert. Mittels Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen werden einzelne thermodynamische Effekte und Szenarien für acht Systeme genauer untersucht. Auf diese Weise fließen die Leistungsfähigkeit, die Energieeffizienz und die Betriebscharakteristik unterschiedlicher Niedertemperaturwärmequellen und zugehöriger Wärmeübertrager in WP<sub>SOURCE</sub> ein.

## 2 ABSTRACT

With the increasing market share of heat pumps, a variety of heat exchanger and low-temperature heat sources are being found as potential sources for heating buildings. A large potential comes from utilizing near surface geothermal energy in connection with heat pumps. The useable systems differ in their construction methods, as well as energy extraction rates and depth of installation. Through the project future:heatpump, a tool was developed to help planners make decisions for selecting, designing, and operating heat pump systems. It is often difficult and costly for a planner to be able to get an overview of various aspects of heat pump systems. These aspects include available technologies on the market, boundary conditions of the system, space requirements and required system components as well as investment costs. This effort is usually not expended by planners who are making a decision on selecting a system. The effort required to properly screen through available options is rarely done. An assessment of suitable heat pump systems, low-temperature heat sources, and heat exchangers, in connection with supplying heating to a building, is a desirable tool for planners. This allows for the qualification and selection of heat pump systems that may be available for a specific project that would normally be recognized as not possible. Meaningful information and support must also be shared about these different technological approaches.

The research project, future:heatpump, funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), is dedicated to the energetic and economic evaluation of low-temperature heat sources for heat pumps. As part of the research project, the pre-dimensioning program WP<sub>SOURCE</sub> has been developed. WP<sub>SOURCE</sub> is an Excel-based tool for the comparison and basic evaluation, preselection, and approximate dimensioning of different heat sources and heat exchanger systems for heat pump systems defined by the planner for specific projects. The program enables the evaluation of various low-temperature heat sources and exchangers for residential and non-residential buildings, both in the case of new construction and refurbishment.

Based on given system parameters, the resulting thermal behavior of the overall system, and current market data, WP<sub>SOURCE</sub> assembles possible system configurations for individually specified operating conditions and allows the user to identify thermally and economically suitable low-temperature heat sources and heat exchangers for the heat pump system being planned. The preparation and presentation of the data offers a direct comparison of different heat sources and exchanger systems. Other criteria that is relevant to the system is also documented and presented, such as the heat extraction rate of a heat exchanger in conjunction with a heat source as well as the associated system costs and expected system performance under the given boundary conditions.

Through literature and market research, relevant data on possible heat sources were recorded, as well as commercially available heat pumps and heat exchangers. In addition, the operating performance of 14 buildings with various heat exchanger systems were monitored and analyzed. For 8 heating systems, parameter studies and sensitivity analyses were performed to investigate the thermodynamic effects on each system. Using this information, the energy efficiency, performance, and operating characteristics of different low-temperature heat sources and associated heat exchangers were incorporated into WP<sub>SOURCE</sub>.

### 3 PROJEKTVORSTELLUNG

Die Entwicklung im Bereich des Energiebedarfs und der bedarfsgerechten Energieversorgung von Gebäuden zeigt eine zunehmend wirtschaftliche und ökologische Bedeutung im Zusammenhang mit der Nutzung von regenerativen Energiequellen. In diesem Zusammenhang stellt die Integration von Wärmepumpen in die Energieversorgung von Gebäuden eine zunehmend angewandte Technik dar, die vornehmlich zur Wärme- aber auch zur Kältebereitstellung genutzt wird. Die Marktpräsenz von Wärmepumpen ist in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen. Beim Verbraucher bewirkt der zunehmende Einsatz dieser Technologie Interesse und Vertrauen - auch wenn viele Wärmepumpen in der Praxis unbefriedigend oder zumindest nicht optimal arbeiten. Aus diesem Grund sind die optimierte Auslegung einer Wärmepumpe, die Auswahl der dazugehörenden Energiequelle sowie die Ankopplung an das Gebäude wesentliche Voraussetzungen zur Erreichung eines energieeffizienten und dauerhaft wirtschaftlichen Betriebs.

Die Zahl der am Markt vertretenden potentiell nutzbaren Niedertemperaturwärmequellen und -übertragungssysteme nimmt mit dem wachsenden Einsatz von Wärmepumpen zu. Dabei kommen neben den klassischen Erdwärmesonden und Flächenkollektoren Produkte wie Eisspeicher, Luftzäune oder Hochleistungs-Energiepfähle zum Einsatz, ohne dass gesicherte Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit oder das Kosten-Nutzen-Verhältnis vorliegen.

#### 3.1 Motivation und Ziele des Forschungsvorhabens

Gemäß den Zielen der Bundesregierung wird für zukünftige Energiekonzepte eine Begrenzung des Primärenergieverbrauchs im Jahr 2050 um 50 % gegenüber 2008 angestrebt. Aus energetischen und ökologischen Gesichtspunkten ist hinsichtlich der Ressourcenschonung und der Klimaproblematik die rationelle Energieverwendung und die Nutzung regenerativer Energieträger eine der wichtigsten Aufgaben der Energieforschung. Um das vorhandene Potenzial von regenerativer Energie umfassend und zeitnah zu nutzen, ist die Grundlagenforschung unerlässlich. Für die langfristigen Energie- und klimapolitischen Ziele sind zudem Steigerungen in der Nutzung der bisher verwendeten und umgesetzten regenerativen Energiequellen nötig.

Um den Energieverbrauch zu reduzieren, muss in diesem Fall der Gebäudebereich betrachtet werden. Die Energiebereitstellung zur Beheizung und der Warmwasserbereitung stellt den größten Verbrauchssektor mit mehr als ein Drittel der gesamten Endenergie dar. In Hinblick auf eine regenerative Energieversorgung von Gebäuden ist die Nutzung und Einbindung einer Wärmepumpe bereits am Markt angekommen. Doch viele der in der Praxis eingesetzten Wärmepumpen laufen nicht optimal oder weisen eine schlechte Performance auf. Grund ist häufig eine fehlerhafte Dimensionierung und Auslegung der Wärmequelle oder die nicht planmäßige Nutzung der Anlagen. In vielen Fällen ist das primärenergetische, ökologische und auch wirtschaftliche Potenzial einer Wärmepumpe größer, als es sich in der Praxis darstellt.

Das technisch nutzbare Potenzial der Wärmepumpe und insbesondere die Wahl bzw. Erschließung der Wärmequelle ist weit größer, als es bisher umgesetzt wird. Insbesondere bei Standorten, die die (hydro-)geologischen Voraussetzungen erfüllen, können hierüber wesentliche Anteile des Wärme- und Kältebedarfs gedeckt werden. Aber auch innovative, neue Wärmequellen und Übertrager können und sollten erschlossen werden. Niedertemperaturwärmequelle bedeutet heutzutage nicht mehr einfach nur erdgekoppelt, sondern umfasst diverse „neue“ Systeme / Wärmeübertrager zur Nutzung von Luft, Wasser, Eis, etc.

Damit die Wärmepumpe und ihre Quellsysteme auch zukünftig einen Beitrag zur Einsparung fossiler Brennstoffe leisten können, sind verstärkte Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet des Zusammenwirkens und der tatsächlichen Performance von Wärmepumpe und Quelle sowie der optimalen Einbindung und Umsetzung notwendig.

Ziel des hier vorgestellten Forschungsvorhabens ist daher die Unterschiede und die Performance von Wärmepumpen in Kombination mit den unterschiedlichen Niedertemperaturwärmeübertragersystemen und deren Quellen gezielter zu betrachten und energetisch sowie wirtschaftlich sinnvolle Umsetzungen und Ausführungen zu analysieren. Die immer wieder auftretende Frage zur Effizienz und Ergiebigkeit der einzelnen Systeme soll durch projektbegleitende Evaluierung von bestehenden Anlagen ermittelt und mit Simulationen belegt und dokumentiert werden. Aussagekräftige Ergebnisse zur Performance der unterschiedlichen Systeme sind zukünftig unumgänglich.

Um zukünftig die Vorplanung von Wärmepumpenanlagen zu erleichtern, ist eine übersichtliche und projektbezogene Zusammenstellung verschiedener Niedertemperaturwärmequellen und zugehöriger Wärmeübertragersysteme hilfreich. Daher ist ein weiteres Ziel des Forschungsprojektes eine Zusammenstellung von derzeit relevanten Niedertemperaturwärmequellen für Wärmepumpen und zugehöriger Wärmeübertragersysteme zu erarbeiten, deren Leistungsfähigkeit, Effizienz und Wirtschaftlichkeit an beliebigen Standorten in Deutschland abzuschätzen und sämtliche Daten und Erkenntnisse in einer für den Planungsalltag geeigneten Form zur Verfügung zu stellen. Das in diesem Zusammenhang zu entwickelnde Vordimensionierungsprogramm wird eine Bewertung, Vorauswahl und überschlägige Dimensionierung der untersuchten Wärmequellen und -übertragersysteme für einen vom Planer definierten Anwendungsfall ermöglichen.



Abbildung 1 Projektziel future:heatpump

### 3.2 Aufbau und Methodik des Forschungsvorhabens

Zu Beginn des Forschungsprojektes werden in einer Literatur- und Marktrecherche die gängigsten am Markt vorhandenen und umgesetzten Wärmeübertragersysteme erfasst und dargestellt. In einem projektbegleitenden Low-Level-Monitoring werden verschiedene Anlagen und Quellsysteme messtechnisch erfasst und dokumentiert. Im Rahmen von Systemsimulationen werden im weiteren Simulationsmodelle für ausgewählte Wärmequellen und zugehörige Übertragersysteme erstellt.

Lastprofile für Wärme und Kälte werden für die Systemsimulationen über Mustergebäude (EFH, MFH, Bürogebäude) in einer Gebäudesimulation ermittelt. Weitere Anlagensimulationen dienen zur Ermittlung der Performance und Jahresarbeitszahl im Heiz- und Kühlfall der einzelnen Systeme. Über Parameterstudien werden Kennlinien bestimmt, die zur Systemvordimensionierung dienen sollen. Die Simulations-, Berechnungs- und Monitoringergebnisse sind Ausgangspunkt einer abschließenden technischen und energetischen sowie ökologischen und wirtschaftlichen Bewertung der verschiedenen Systeme.

Mittelpunkt des Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines Vordimensionierungsprogrammes. Das Programm ist ein einfaches, Microsoft Excel basiertes Werkzeug zur grundlegenden Bewertung und Vorauswahl sowie überschlägigen Dimensionierung unterschiedlicher Wärmequellen und -übertragersysteme.

Das Forschungsprojekt gliedert sich in acht Arbeitspakete (AP) und deckt damit die Gebiete Technik, Performance und Ökologie sowie Ökonomie ab. Das Kernstück des Forschungsprojektes bildet die Erarbeitung des Pre-Check-Tools, siehe Abbildung 2

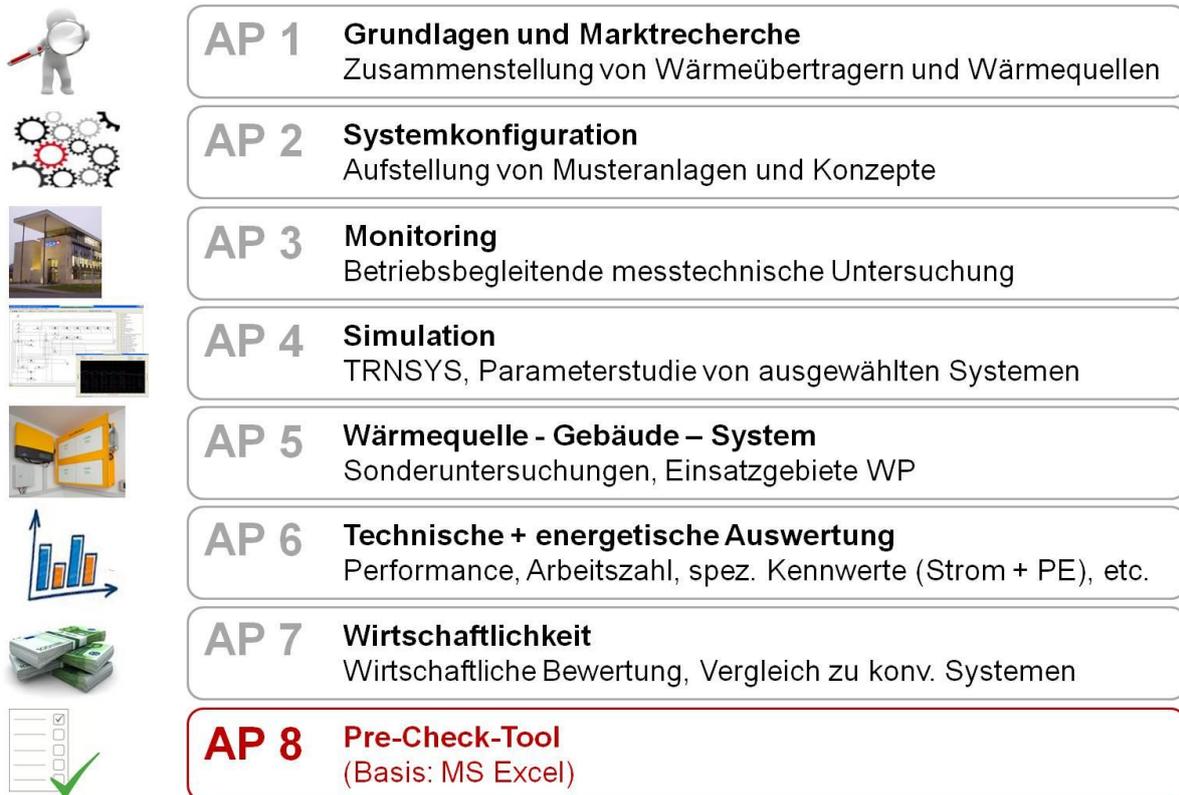


Abbildung 2 Arbeitspakete des F+E Projekts im Überblick

Innerhalb des Projektes werden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

#### AP 1 Grundlagen und Marktrecherche

In einer umfassenden System- und Marktrecherche werden die gängigsten am Markt vorhandenen und umgesetzten Wärmeübertragersysteme für die Koppelung mit Wärmepumpen als Grundlagenermittlung (u. a. Funktions- und Bauweise, Voraussetzungen und Anforderungen, Wärme- und Kälteleistungen sowie Energieerträge, Investitionskosten) erfasst und dargestellt. Im

Rahmen der Erarbeitung werden die Quellen, Anlagensysteme und die Einsatzpotentiale systematisch aufbereitet und verglichen. Im Zuge der Recherche wird auch auf neuartige bzw. zukunftsweisende Quellen und Übertragersysteme eingegangen und mit den marktdominanten Systemen verglichen. Zudem erfolgt eine Kostenanalyse, innerhalb derer vorrangig die Investitions- und Baukosten der betrachteten Systeme ermittelt und gegenübergestellt werden. Durch die Erstellung einer Übersichtsmatrix können im Vorfeld der weiteren Betrachtungen und Simulationen bereits kostenintensive und unwirtschaftliche Kombinationen ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse der Recherche fließen in die Konzeptkonfiguration ein.

#### AP 2 Systemkonfiguration

Über eine Systemkonfiguration werden Musteranlagen für die anschließenden Simulationen erarbeitet und festgelegt. Dabei wird auf die unterschiedlichen Gebäudestandards und -typologien (EFH, MFH, Bürogebäude) sowie Quellen eingegangen. In die Konfiguration fließen u. a. die Einsatzrandbedingungen, die Ergebnisse aus der Recherche sowie die Betrachtung marktrelevanter und auch innovativer Wärmequellen und –übertrager mit ein.

#### AP 3 Monitoring

In einem begleitenden Monitoring werden unterschiedliche in Betrieb befindliche Anlagen messtechnisch untersucht und dokumentiert. Im Rahmen des Projektes werden nur Gebäude und Anlagen erfasst und vermessen, die bereits über eine angemessene Mindestausstattung an Messtechnik verfügen.

Die verschiedenen Anlagen werden in ihrer Umsetzung und Einbindung dokumentiert und vergleichend gegenübergestellt. Wesentliche Unterschiede bzw. Parallelen werden herausgearbeitet. Es werden die Wärmemengen, der elektrische Stromverbrauch der Umwälz- und Wärmepumpen sowie die Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmeübertragersysteme sowie Verbraucher im Gebäude über einen Zeitraum von mindestens zwei Jahren (mindestens zwei Kühl- und Heizperioden) gemessen und ausgewertet. Zur Bewertung und zum Vergleich der Anlagen werden auf Basis der Messwerte Kennzahlen (z. B. Primärenergieverbrauch der Anlagen und Komponenten, Arbeitszahlen der Anlagen, etc.) gebildet.

Die im Rahmen des Monitorings gewonnen Erkenntnisse und Daten werden u. a. im Projekt zum Vergleich der Messwerte mit den Simulationswerten herangezogen.

#### AP 4 Simulation

Das Arbeitspaket Simulationen ist in drei Schwerpunkte geteilt.

„PART I“ befasst sich mit der mathematischen Erstellung und Umsetzung von Simulationsmodellen für typische Niedertemperaturwärmequellen für Wärmepumpen. Im Vorfeld erfolgt eine Recherche zu verfügbaren und verwendbaren Simulations- und Auslegungsprogrammen sowie -methoden der verschiedenen Wärmeübertragersysteme.

„PART II“ beschäftigt sich mit der Systemsimulation im Simulationsprogramm TRNSYS. Die in der Konzeptkonfiguration ermittelten und ausgewählten Musteranlagen werden als Gebäude- sowie Anlagenmodell abgebildet. Im Zuge von Part II werden die Lastgänge und Gebäudekonfigurationen definiert und für die Parameterstudie festgelegt.

„PART III“ beinhaltet die Parameterstudie zur Ermittlung der Performance und Energieeffizienz der zuvor festgelegten Systeme. Ziel der Parameterstudie ist die Erstellung einer Datengrundlage zur Vordimensionierung der Quellen inkl. der energetischen Bilanzierung.

#### AP 5 Wärmequelle - Gebäude - System

Unter dem Teil Sonderbetrachtung werden weitere Konzepte und Kombinationen bezüglich Quellen - Gebäude - System betrachtet. Unter die Untersuchungen fallen die Punkte:

- Wärmepumpen und ihre Anwendung und Umsetzung in verschiedene Klimazonen,
- Kopplung von Photovoltaikanlage und Wärmepumpe - Eigenstromnutzung,
- Vergleich von unterschiedlich angetriebenen Wärmepumpen, wie z. B. der Gasabsorptions-WP zur elektrisch angetriebenen WP,
- Einsatz von Wärmepumpen in Nahwärmenetzen und
- Wärmepumpensysteme für Passivhäuser - Abluft-Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung.

#### AP 6 Technische und energetische Auswertung

In der technischen und ökonomischen Auswertung werden die im Arbeitspunkt 4 dargestellten und simulierten Anlagenkombinationen in ihrer Energiebilanz (Performance, erzielbare Monats- und Jahresarbeitszahl, etc.) sowie durch Bildung von spez. Kennwerten bewertet. Betrachtungsschwerpunkte fallen hier auf den zu erzielenden Arbeitszahlen, dem Strombedarf sowie dem Primärenergiebedarf und dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß, etc.

#### AP 7 Wirtschaftlichkeit

Im Bereich Wirtschaftlichkeit werden die Investitionskosten sowie Jahresgesamtkosten (Kapital-, Betriebs- und Energiekosten) der einzelnen Systeme zusammengetragen und gegenübergestellt.

#### AP 8 Pre-Check-Tool

Das Hauptziel des Forschungsprojektes ist die Erstellung eines Vordimensionierungsprogrammes, das u. a. für Ingenieurbüros zur Grundlagenermittlung und Energiekonzepterstellung herangezogen werden kann. Im Programm werden, neben den Ergebnissen der Vordimensionierungen, auch alle Randbedingungen der Quellen, spezifische Leistungskennwerte, Klimaschutzpotentiale (CO<sub>2</sub>-Emissionen, Primärenergiebedarf), Wirtschaftlichkeitsfaktoren und viele weitere Daten dokumentiert.

Das Microsoft Excel basierte Programm gründet auf den Simulations- und Messergebnissen und gibt Auslegungsempfehlungen für Wärmequellen für die untersuchten Varianten und Gebäudetypologien wieder.

## 4 STAND DES WISSENS UND DER TECHNIK

Wärmequellen mit niedrigem Temperaturniveau, wie das oberflächennahe Erdreich oder die Außenluft, galten früher als „nutzlos“. Mit einer Wärmepumpe können diese Quellen zur Nutzung regenerativer Energie herangezogen und erschlossen werden.

Die auf dem Markt verfügbaren Wärmequellen für Wärmepumpen sind in ihrer Funktionsweise und Performance jedoch größtenteils sehr unterschiedlich. In anderen Forschungsprojekten und bereits umgesetzten Gegenüberstellungen von Systemen wurde bisher die Systeme nur gruppenspezifisch (erdgekoppelt, Einfamilienhausbau, o. ä.) oder nur im Einzelnen ohne Vergleich zu anderen Systemen analysiert und messtechnisch erfasst. [1][2][3] Eine ganzheitliche vergleichende Betrachtung, u. a. im Hinblick auf die Leistungszahlen und die Performance, ist nicht verfügbar. Im Folgenden wird der Stand des Wissens und der Technik zu den Themen Wärmepumpe, Niedertemperaturwärmequellen und Planung und Erstellung von Energiekonzepten mit Wärmepumpensystemen näher erläutert.

### 4.1 Wärmepumpe

Die Einbindung von Wärmepumpen in die Energieversorgung von Gebäuden ist eine zunehmend angewandte Technik, die vornehmlich zur Wärmebereitstellung in Wohngebäuden aber auch zur Wärme- und Kältebereitstellung in Nichtwohngebäuden (reversible Wärmepumpen) eingesetzt wird. Dabei nutzt die Wärmepumpe die zur Verfügung stehende Wärmequelle (Erdreich, Luft, etc.). Mit Hilfe des elektrischen Kompressors wird die Wärme dann auf das für das Gebäude notwendige Temperaturniveau angehoben. Die Wahl der Quelle ist dabei abhängig von den örtlichen Randbedingungen, Erschließungsflächen und dem vorhandenen Energiebedarf.

Bei der Planung und Umsetzung der Energieversorgung von Gebäuden sind Wärmepumpen bei Planern und Bauherren weitestgehend etabliert. Dennoch bleibt der Marktanteil im Bereich der verbauten Wärmeerzeuger in Deutschland im Bereich von 10 %, siehe Abbildung 3. Werden nur die Wohnungsneubauten betrachtet, steigt der Anteil der Wärmebereitstellung über Wärmepumpen bereits auf über 30 % an, siehe Abbildung 4. Dabei reduziert sich der Anteil von geothermisch gekoppelten Wärmepumpen von 14 % auf 7 %. Die Ausführung und Umsetzung erfolgt überwiegend über Luft-Wasser-Wärmepumpen. Aktuell werden bei den Luft-Wasser-Wärmepumpen im Wesentlichen sogenannte Invertergeräte installiert, die über eine Leistungsanpassung verfügen. Dieser Trend ist auch bei anderen Wärmepumpentechnologien zu beobachten.

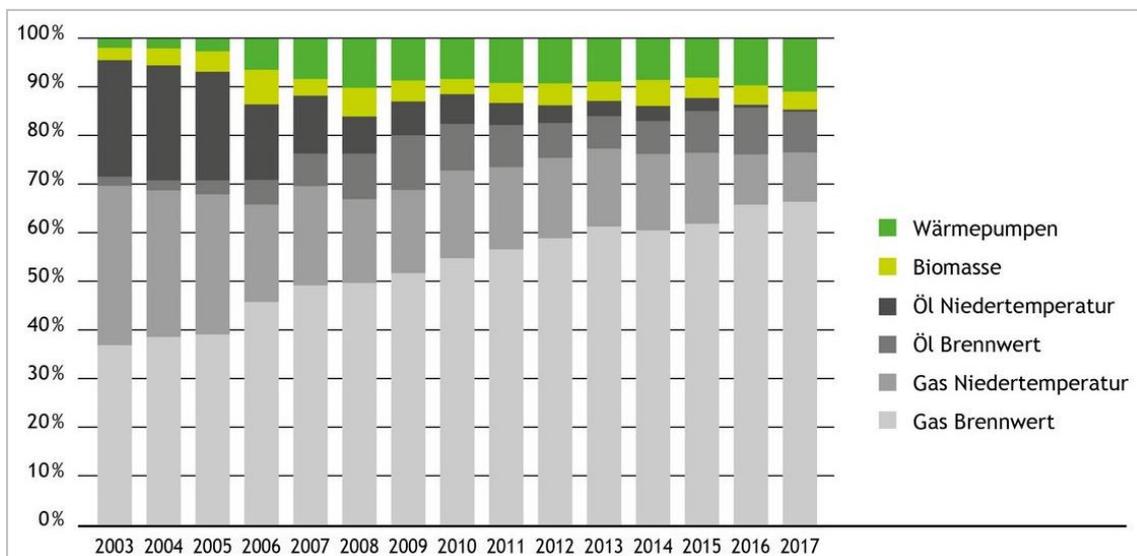


Abbildung 3 Marktanteile unterschiedlicher Wärmeerzeuger in Deutschland [6]

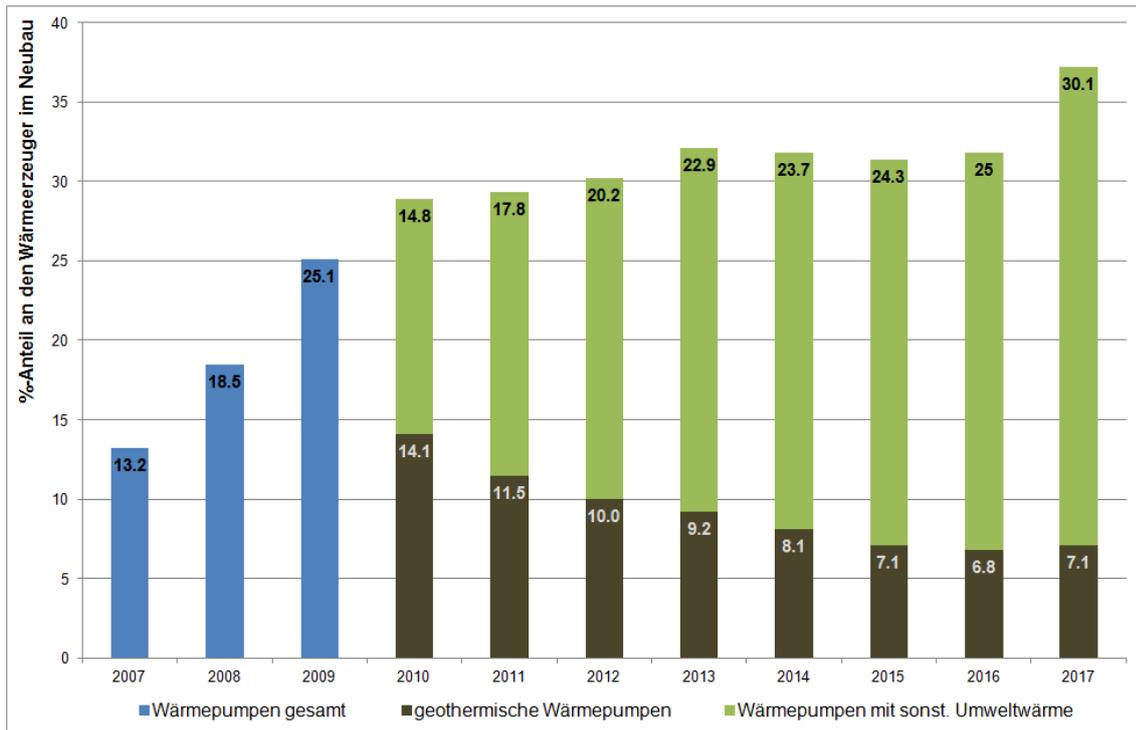


Abbildung 4 Prozentualer Anteil der Wärmepumpen bei Neubauten in Deutschland nach [4]

Im Jahr 2006 steigt der Absatzmarkt von Wärmepumpen auf rund 50.000 verkaufte Wärmepumpen pro Jahr, siehe Abbildung 5. Zwischen den Jahren 2011 und 2015 stellt sich ein jährliches konstantes Verkaufsniveau von etwa 60.000 Wärmepumpen ein. Seit 2016 steigen die Verkaufszahlen, sodass in 2017 ein Maximum der letzten 10 Jahre von rund 80.000 Wärmepumpen erreicht wird.

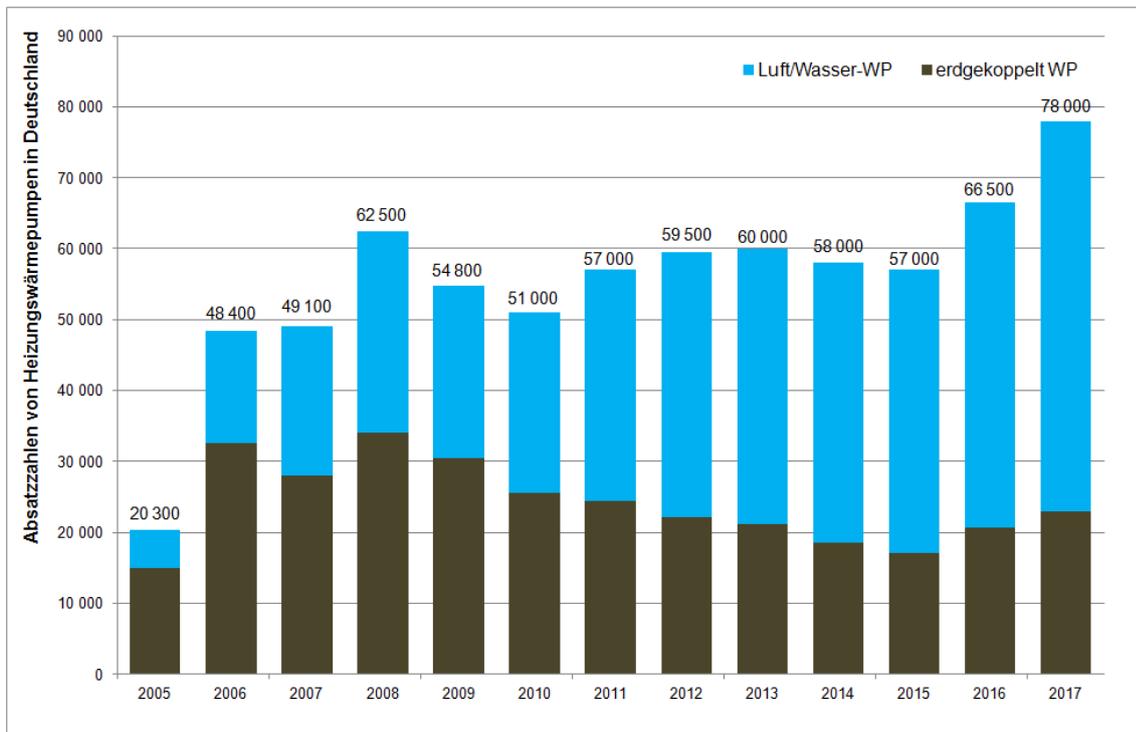


Abbildung 5 Absatzzahlen von Heizungswärmepumpen in Deutschland nach [5]

Die Einsatzbereiche erdgekoppelter Wärmeübertrager sind vielfältig. Für unterschiedliche Anwendungen stehen entsprechende Systeme zur Verfügung. Dennoch decken sich die Verkaufszahlen für Wärmepumpen und Wärmeübertrager nicht mit dieser Anwendungsvielfalt. Bevorzugt werden in großer Stückzahl Luft-Wasser-Wärmepumpen und mit sinkender Tendenz erdgekoppelte Systeme eingesetzt bzw. verkauft.

Über Feldtests in der Praxis werden zunehmend Mängel aufgedeckt, die einen optimalen Betrieb der Anlagen nicht ermöglichen. Gründe sind u. a. zu klein dimensionierte Wärmequellen, nicht gemäß der Auslegung betriebene Systeme, zu hohe Verbrauchswerte der Gebäude, eine nutzerbedingte falsche Betriebsweise der Anlage, zu optimistisch angesetzte Planungsangaben und vieles mehr. In vielen Fällen ist daher das primärenergetische, ökologische und auch wirtschaftliche Potenzial einer Wärmepumpe größer, als es sich in der Praxis darstellt.

## 4.2 Niedertemperaturwärmequellen

Mit der wachsenden Nachfrage und dem Verkauf von Wärmepumpen ist auch die Zahl der potenziell nutzbaren Niedertemperaturwärmequellen und -wärmeübertragersysteme gestiegen. Bei der Erschließung dieser Wärmequellen bieten sich diverse Anwendungs- und Optimierungsmöglichkeiten an. Nachteilig bei der Auswahl der Niedertemperaturwärmequelle ist jedoch, dass nicht immer hinreichende Informationen und eindeutige Kriterien zur Verfügung stehen, die einen Vergleich oder die Auswahl erleichtern. Hinzu kommen innovative Produkte, die für viele Planer zunächst unbekannt sind und bezüglich deren Leistungsfähigkeit oder das Kosten-Nutzen-Verhältnis oft kaum fundierte Kenntnisse vorliegen.

Ein detaillierter Überblick und die Beschreibung der unterschiedlichen Wärmequellen und Niedertemperaturwärmeübertrager, ist Kapitel 5 zu entnehmen.

## 4.3 Planung und Erstellung von Energiekonzepten mit Wärmepumpensystemen

Im täglichen Planungsgeschäft verläuft die Erstellung von Energiekonzepten oft nach dem immer gleichbleibenden Schema ab (Vergleich Abbildung 6).

1. Auf der Grundlage wesentlicher Daten zum Gebäude (Flächen, Volumen, Gebäudeausrichtung, thermischer Gebäudestandard, etc.) werden die Energiebedarfswerte erfasst, d. h. über den gemessenen Energieverbrauch bei Bestandsgebäuden oder im Fall eines Neubaus über spezifische Bedarfskennwerte.
2. Anhand der Energiekennwerte für Heizung und Trinkwassererwärmung (sowie Kühlung) werden unterschiedliche Versorgungskonzepte erarbeitet und die entsprechende Anlagentechnik den Varianten zugeordnet. Dabei spielen für Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Bürogebäude Wärmepumpenlösungen eine zunehmende Rolle und stehen im Vergleich zu den konventionellen Wärme- und Kälteerzeuger, wie z. B. Gaskessel und Kompressionskältemaschinen.
3. Basierend auf örtlichen Gegebenheiten, wie Lage und Beschaffenheit der Liegenschaft, der Grundstücksgröße und -form, aber auch Lärmschutzanforderungen und genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen (z. B. Grundwasserschutz, Tiefen- und/oder Flächenbegrenzungen bei der Nutzung des Erdreiches), werden die Möglichkeiten zur Erstellung einer Wärmepumpenanlage eruiert.
4. In einem abschließenden Vergleich erfolgt die Zusammenstellung der Investitions- und Jahresgesamtkosten der verschiedenen Versorgungsvarianten. Meist liegen die Investitionskosten der Wärmepumpensysteme über den konventionellen Anlagen, während die Jahresgesamtkosten in Abhängigkeit der jeweiligen Energiepreise günstiger ausfallen.

In diesem Zusammenhang fehlt bei der Vorauswahl eines Wärmepumpensystems im Planungsprozess eine einfache und übersichtliche Zusammenstellung der verschiedenen Wärmeübertragersysteme, mit den erforderlichen Randbedingungen sowie den Entzugs- bzw. Eintragskennwerten. Die dem Planer üblicherweise zur Verfügung stehenden Unterlagen und Informationen zu einzelnen Produkten lassen unmittelbar keinen direkten Vergleich zu. Aus diesem Grund werden anlagentechnische Entscheidungen und die Auswahl der zur Installation kommenden Variante oft ohne eine Berücksichtigung wesentlicher Rahmenbedingungen getroffen. Dabei ist die richtige Auswahl der Niedertemperaturwärmequelle (und Wärmesenke) während der Vorplanung ein entscheidendes Kriterium für den späteren sicheren und optimalen Betrieb des Wärmepumpensystems. Denn anders als bei konventionellen Wärme- und Kälteerzeugern ist eine spätere Nachregulierung nicht so einfach möglich.

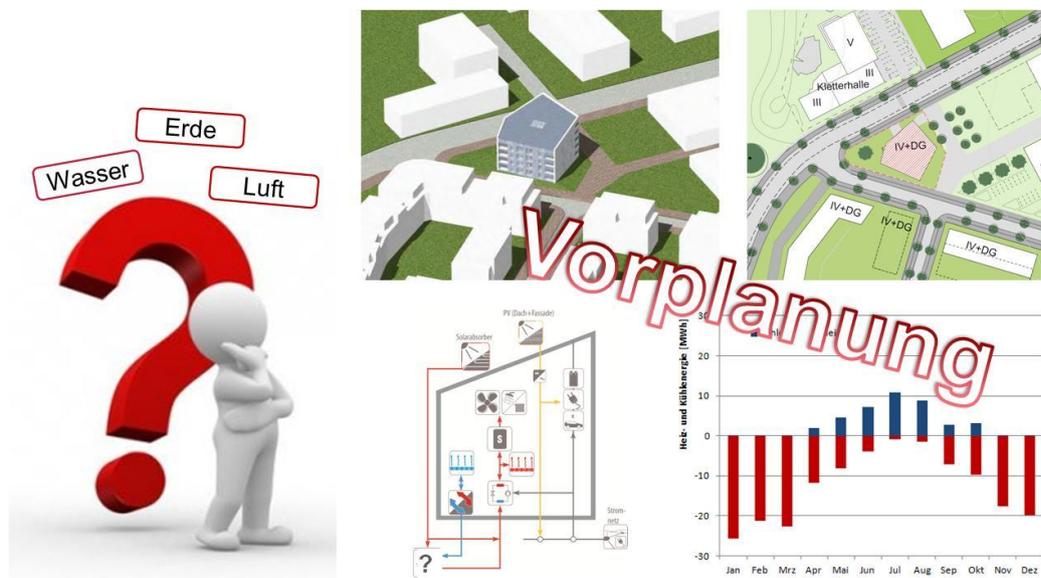


Abbildung 6 Planungsgrundlagen und -schritte [Quelle Rendering und Lageplan: HHS Architekten + Planer, Kassel]

Daher ergeben sich immer wieder die gleichen Fragestellungen im Rahmen der Energiekonzepterstellung in Bezug auf die Vordimensionierung der Wärmequelle der Wärmepumpe. Bei der Vielzahl der am Markt angebotenen Wärmeübertrager interessieren den Planer als auch den Bauherrn die entsprechenden Unterschiede zwischen den einzelnen Möglichkeiten. Welche Niedertemperaturwärmequelle und/oder Wärmeübertrager kann im vorliegenden Fall energetisch und wirtschaftlich sinnvoll genutzt werden.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Punkte:

- Welche Wärmequelle ist die richtige für meine Wärmepumpe?
- Gibt es signifikante Unterschiede zwischen den grundsätzlich geeigneten Wärmeübertragern?
- Welche Grundlagen und Randbedingungen müssen beachtet werden?
- Wo erhalte ich eine produktneutrale und übersichtliche Gegenüberstellung der in meinem Fall möglichen Wärmepumpensysteme?
- Was kosten die entsprechenden Niedertemperaturwärmequellen und/oder Wärmeübertragersysteme?

Um einen effizienten Prozess in der Vorplanung zu erreichen, ist eine einfache und übersichtliche Zusammenstellung der verschiedenen Wärmequellen und Wärmeübertragersysteme als Entscheidungsbasis wünschenswert.

## 5 WÄRMEQUELLEN UND WÄRMEÜBERTRAGER (AP1)

Das Potenzial von Wärmepumpen und vielen Niedertemperaturwärmequellen ist enorm groß. Insbesondere an Standorten die günstige (hydro-)geologische Voraussetzungen aufweisen, können wesentliche Anteile eines Wärme- und/oder Kältebedarfs über Wärmepumpen und geothermischen Niedertemperaturwärmequellen gedeckt werden. Aber auch eine Vielzahl anderer Wärmequellen, die zur direkten Nutzung in Gebäuden nicht das benötigte Temperaturniveau aufweisen, können mit Wärmepumpen in Kombination mit geeigneten Niedertemperaturwärmeübertragern nutzbar gemacht werden.

In einer umfassenden System- und Marktrecherche werden die gängigsten am Markt vorhandenen und umgesetzten Wärmeübertragersysteme für die Koppelung mit Wärmepumpen als Grundlagenermittlung erfasst und dargestellt. Die Zusammenführung und Aufbereitung der Informationen und Herstellerangaben sowie der Ergebnisse aus der Marktrecherche erfolgt (systemweise) in einer Übersichtsmatrix, siehe Abbildung 7. Insgesamt werden 16 Kategorien für Wärmeübertrager-/Wärmepumpensystemen definiert, die u. a. das Erdreich, die Luft oder Wasser als Wärmequelle nutzen. Als eigene Kategorie wird die weitverbreitete Luft-Wasser-Wärmepumpe in die Übersicht aufgenommen. Sonderformen, die z. B. auch als Hybridsysteme angesehen werden können, wie etwa der eTank, stellen eine eigene Kategorie dar. Die Kategorien bilden die auf dem Markt derzeit gängigsten Systeme zur Wärmergewinnung bzw. Quellenanbindung für Wärmepumpen ab. Viele Systeme dienen sowohl als Wärmequelle als auch als Wärmesenke für den Heiz- oder / und Kühlfall.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Niedertemperaturwärmeübertrager mit ihren Randbedingungen und Einflussfaktoren näher erläutert. Die Auswertung der Marktrecherche sowie der Quervergleich der Wärmeübertrager runden das Kapitel ab.

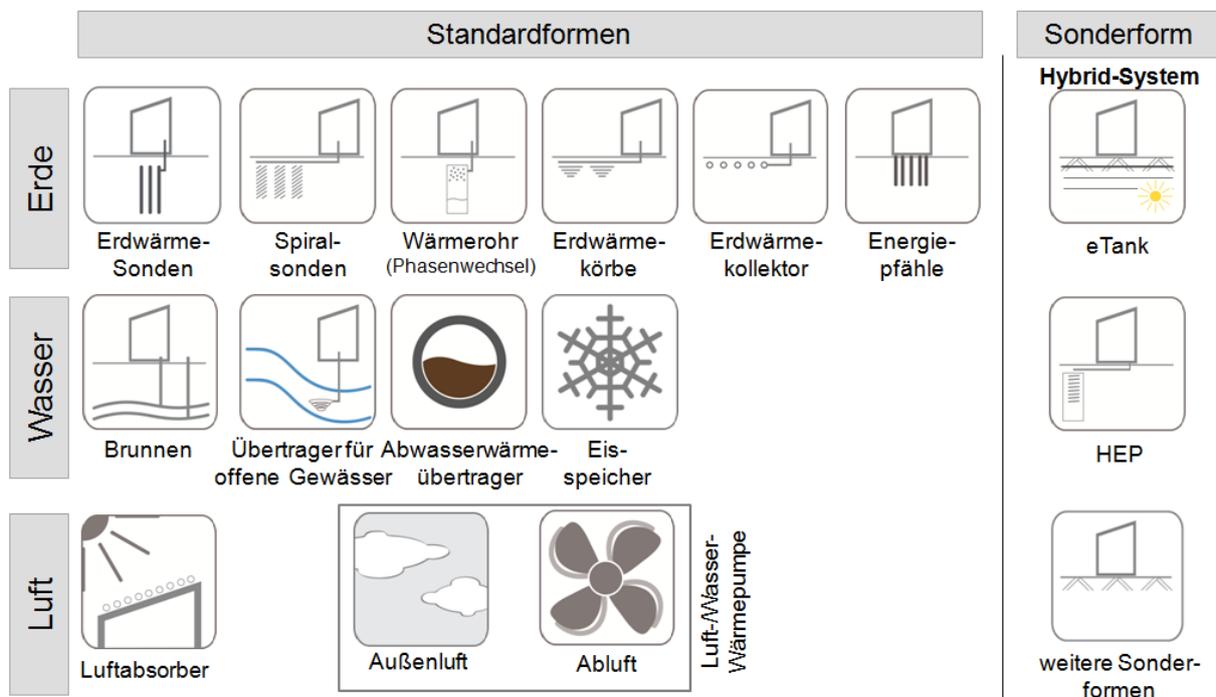


Abbildung 7 Auswahl / Kategorien der Wärmeübertragersysteme

## 5.1 Niedertemperaturwärmeübertrager

Die im Weiteren betrachteten Systeme bestehen generell aus einem Wärmeübertragungssystem und einer Wärmequelle (Wärmespeicher). Dabei dient der Wärmeübertrager (Rohre, Wärmeübertrager, o. ä.) für den Transport der Wärme zwischen der Wärmepumpe und der Wärmequelle bzw. -senke.

Im Rahmen der Aufbereitung und Darstellung der unterschiedlichen Wärmeübertrager sowie zur Ergänzung und Beschreibung der Wärmeübertrager im Pre-Check-Tool werden für 12 ausgewählte Kategorien jeweils Steckbriefe erstellt. Diese befinden sich im Anhang unter Kapitel 16.1.

Der Steckbrief beinhaltet u. a.

- eine allgemeine Beschreibung des Wärmeübertragers
- technische Daten (Material, Abmessungen, ...)
- Kennwerte (Eintrag, Entzug)
- Informationen zum Einbau und der Verlegung
- mittlere Investitionskosten (netto)
- Einsatzgebiete
- Randbedingungen und Bemerkungen zum Wärmeübertrager

Die Marktrecherche wird bereits im Jahr 2016 durchgeführt. Neben den bisher bekannten Wärmequellen und Wärmeübertragern entwickelt sich der Markt stetig weiter. Daher stellt die Marktübersicht nur eine Momentaufnahme dar. Nachfolgend werden die entsprechenden Wärmequellen nur kurz beschrieben. Die ausführliche Darstellung ist den Steckbriefen zu entnehmen.

### 5.1.1 Quelle Erdreich

#### Erdwärmesonde / Spiralsonde / Erdwärmekollektor (Flächenkollektor) / Erdwärmekorb

Die Wärmeübertragung erfolgt über Rohrschleifen, die im Erdreich verlegt, eingebracht oder in die Tiefe abgeteuft werden. Die Wärmeübertrager unterscheiden sich vorrangig in ihrer Bauform und Anordnung der Rohre. Mit Hilfe der Rohre und dem darin zirkulierenden Wärmeträgermedium wird die Wärme dem Erdreich entzogen bzw. eingetragen. Erdwärmesonden können bis in Tiefen zwischen 50 und 400 Metern eingebracht werden, während Erdwärmekollektoren flächig in ca. 1,50 m Tiefe verlegt werden.

Hinsichtlich der Erdwärmesonden sind mittlerweile eine Vielzahl an Ausführungsvarianten auf dem Markt zu finden. So gibt es neben den klassischen Doppel-U-Rohrsonden u. a. auch Koaxialsonden und Speichersonden (z. B. geoKOAX). Generell gilt, dass diese Systeme nicht überbaut werden dürfen. Eine Ausnahme bildet die Erdwärmesonde.

#### Thermisch aktivierte Bauteile (z. B. Energiepfähle)

Bei der thermischen Aktivierung von Bauteilen werden konstruktiv benötigte massive Bauteile wie Gründungspfähle, Bodenplatten oder Wände gegen das Erdreich zur Übertragung von Wärme aus oder an das Erdreich genutzt. Hierfür werden in den Bauteilen Rohrleitungsschleifen eingebaut, die der Wärmeübertragung dienen. Es handelt sich hierbei um das gleiche Prinzip wie bei der Erdwärmesonde, nur dass konstruktive massive Bauteile dafür thermisch aktiviert werden und so Synergieeffekte genutzt werden können.

### CO<sub>2</sub>-Sonde / Wärmerohr / Direktverdampfer-Sonde

CO<sub>2</sub>-Sonden oder Wärmerohre sind Erdwärmesonden bei denen kein Wasser oder Glykol-Gemisch als Wärmeträgermedium verwendet wird, sondern ein Medium, welches sich bei der Betriebstemperatur an der Grenze zwischen flüssigem und gasförmigem Aggregatzustand befindet. Bei dieser Art von Wärmeübertrager wird mit dem Aggregatswechsel gearbeitet und dadurch die Wärmeleitfähigkeit verbessert. Diese Systeme sind jedoch nur für den Heizfall geeignet.

### Agrothermie

Agrothermie bezeichnet den u. a. auf landwirtschaftlichen Flächen (Acker- und Wiesenflächen) eingebrachten Erdwärmekollektor. Das Rohrsystem wird dabei mit einem neu entwickelten Schwertpflug auf bis zu 2 m Tiefe in das Gelände gepflügt und vermeidet so einen großflächigen Bodenabtrag im Vergleich zum Erdwärmekollektor (Flächenkollektor).

### Energietank (eTank)

Beim eTank handelt es sich um eine besondere Art von Energiespeicher, der unter oder neben dem Gebäude errichtet wird. Der Aufbau des eTanks besteht bis zu einer Tiefe von 1,50 m aus mehreren Schichten Erdreich, in denen Rohre verlegt werden. Zusätzlich wird das aufgefüllte Erdreich vertikal und nach oben gegen das angrenzende Erdreich thermisch gedämmt. Das Prinzip des eTanks besteht darin, dass das Erdreich über Solarenergie (Solarkollektoren) oder anderen Energiequellen (Wärmeeintrag im Sommer) erwärmt wird. Im Heizfall wird die im Erdreich gepufferte Energie über eine Wärmepumpe nutzbar gemacht.

## **5.1.2 Quelle Luft**

### Außenluft

Die klassische Luft-Wasser-Wärmepumpe nutzt die Außenluft direkt als Wärmequelle oder Wärmesenke. Im Winter wird eine entsprechende Abtaufunktion benötigt, um der Eisbildung beim Wärmeübertrager entgegen zu wirken. Das ggf. anfallende Kondensat muss frostfrei abgeführt werden. Insgesamt gibt es drei verschiedene Aufstellmöglichkeiten, d.h. Außenaufstellung, Splitgerät, Innenaufstellung mit entsprechender Kanalführung der Außen- und Fortluft.

### Abluft

Als Wärmequelle dient in diesem Fall die Abluft. In den meisten Fällen wird daher eine Lüftungsanlage benötigt. Bei Wohngebäuden dient hauptsächlich die verbrauchte Raumluft als Wärmequelle, bei Nichtwohngebäuden z. B. die Abluftwärme aus Prozessen oder Produktionshallen. Das Prinzip gleicht der Luft-Wasser-Wärmepumpe. Das System kann direkt im Raum angeordnet werden oder aber auch in der entsprechenden Lüftungszentrale.

### Solar- und Luftabsorber

Der Solar- und Luftabsorber ist in der Regel ein unverglaster RohrabSORBER aus Kunststoff, der auf Dächern installiert wird. Der Solar- und Luftabsorber entzieht der Umwelt Energie (Umgebungsluft, direkte und diffuse Sonnenstrahlung, Niederschlag) und dient als direkte Wärmequelle für die Wärmepumpe, als auch zur Regeneration z. B. eines Eisspeichers. Als Wärmeträgermedium wird ein Wasser-Glykol-Gemisch verwendet.

### 5.1.3 Quelle Wasser

#### Grundwasser (Saug- und Schluckbrunnen)

Das System besteht aus einem Saug- und einem Schluckbrunnen über den die Erschließung des Grundwassers als Wärmequelle und -senke erfolgt. Dabei wird das Grundwasser aus dem Saugbrunnen gepumpt und über einen Wärmeübertrager geführt. Nach Abkühlung des Wassers durch die Wärmepumpe (Heizfall) wird das Wasser über den Schluckbrunnen wieder in das Erdreich bzw. den Grundwasserleiter geführt.

#### Oberirdische Gewässer

Der Wärmeübertrager wird in der Regel in das Gewässer (See, Fluss, Hafenbecken, etc.) eingebracht und über Verankerungen an der Gewässersohle und / oder am Uferbereich befestigt. Der Wärmeübertrager dient zur Wärmegewinnung aus dem umgebenden Wasser und wird über Anschlussleitungen mit der Wärmepumpe verbunden. Des Weiteren kann der Wärmeübertrager auch für die Gebäudekühlung im Sommer genutzt werden.

---

#### Abwasser

Die im Abwasser enthaltene thermische Energie, aus häuslichem sowie industriellem Abwasser, wird als Quelle der Wärmepumpe zur Verfügung gestellt. Durch spezielle Wärmeübertrager oder Rohre wird dem Abwasser Wärme entzogen und dient der Wärmepumpe so als Wärmequelle. Das System kann nachträglich in der Kanalisation installiert werden. Es besteht auch die Möglichkeit beim Neubau einer Abwassertrasse ein entsprechendes Kanalrohrsystem mit integriertem Wärmeübertrager direkt vorzusehen.

---

#### Eisspeicher

Als Wärmequelle dient das Wasser einer Zisterne. Der Wasserspeicher besteht meist aus Beton und wird im Erdreich eingelassen. Dieser ist mit einem Rohrleitungssystem durchzogen, welches als Wärmeträgermedium ein Wasser-Glykol-Gemisch enthält. Generell wird über das Rohrsystem dem Speicher über die Wärmepumpe in der Heizperiode Wärme entzogen. Durch den Phasenwechsel von flüssig zu fest (Eis) kann dem Wasser weiter Wärme entzogen werden, bis das Wasser vollständig zu Eis gefroren ist. Dadurch steht eine zusätzliche Wärmemenge zur Verfügung. Im Anschluss muss der Eisspeicher über zusätzliche Solar- und Luftabsorber, Solarthermie oder Abwärme regeneriert bzw. wieder aufgetaut werden. Unter den Begriff Abwärme fällt auch die Kühlung des Gebäudes im Sommer.

#### Hochleistungs-Energiepfähle (HEP von der Fa. Europols)

Hochleistungs-Energiepfähle sind lange zylindrische Wassertanks aus Beton, die in den Erdboden einbracht werden. Die Betontanks werden mit Wasser gefüllt. Über Wärmeübertrager (Rohrschleifen) wird dem Wasser Wärme entzogen. HEPs können u. a. zur Speicherung von Abwärme genutzt werden.

## 5.2 Randbedingungen und Einflussfaktoren

Bei der Wahl der Niedertemperaturwärmequelle und dem entsprechenden Wärmeübertragungssystem müssen die vorhandenen Randbedingungen, Einflussfaktoren und Einschränkungen auf die Entzugs- und Eintragsleistung berücksichtigt werden. Die Überprüfung der Standortrandbedingungen muss daher bereits in der frühen Planungsphase erfolgen. Neben den typischen klimatischen und geologischen Randbedingungen sind weitere Einflüsse und Einschränkungen zu berücksichtigen. Hierzu zählen:

- klimatische Randbedingungen
  - geothermischer Wärmestrom
  - Wassergehalt des Bodens
  - Grundwasser (konvektiver Wärmetransport)
  - Wärmeleitung (konduktiver Wärmetransport)
  - Niederschlag
  - Solarstrahlung
  - Außentemperatur
  
- geologische Randbedingungen
  - Bodeneigenschaften
  - Wasserschutzgebiet oder vorhandene Gewässer
  - Bohrtiefenbegrenzung u. a. durch
    - Grund- und Trinkwassernutzung
    - Bergbau
    - kritischen Grundwasserstockwerksbau
    - Bohrrisiko
  - vorhandene Erdwärmesonden oder Übertragungssysteme, die ggf. beeinflusst werden oder beeinflussen
  
- Einflüsse und Einschränkungen
  - Energiekonzeption des Bauwerks
  - Grundstücksgröße und einzuhaltende Grenzabstände
    - Einfluss auf mögliche Anordnung der Übertragungssysteme
  - Systemauswahl
    - Überbaubar oder Freifläche erforderlich
    - Flächenbedarf
    - Abteuftiefen / Einbautiefen
  - Schallschutz / Außenlärmpegel
  - Zusatzsysteme zur redundanten Energieversorgung oder Regeneration

Tabelle 1 zeigt für ausgewählte Wärmeübertrager die zu beachtenden Randbedingungen und Einflussfaktoren. Dabei wird auf die wesentlichen klimatischen und geologischen Einflüsse sowie Nebenbedingungen eingegangen.

Tabelle 1 Zu beachtende Randbedingungen und Einflussfaktoren je Wärmeübertrager

	klimatischer / geologischer Einfluss					Nebenbedingungen				
	Niederschlag	Bodenkennwerte (Wärmestrom, etc.)	Grundwasser	Solarstrahlung	Außentemperatur	Wasserschutzgebiet	Grundstücksgröße	Tiefenbegrenzung	Schallschutz	Redundanz
Erdwärmesonden		X	X			X	X	X		
Erdwärmekörbe	X	X	X	X	X	X	X			
Spiralsonden	X	X	X	X	X	X	X			
Flächenkollektor	X	X	X	X	X	X	X			
Energiepfähle		X	X			X				
Brunnen			X			X	X	X		
Abwasser	X				X					X
Eisspeicher mit Solar- und Luftabsorber	(X)		(X)	X	X	(X)	X			
Luft-Wasser-WP					X		X		X	

### 5.3 Marktrecherche

In einer umfassenden System- und Marktrecherche werden zu Beginn des Forschungsprojektes die gängigsten am Markt vorhandenen und umgesetzten Wärmeübertragersysteme für die Koppelung mit Wärmepumpen als Grundlagenermittlung erfasst und dargestellt. Neben einer allgemeinen Literatur- und Marktrecherche erfolgt auch eine produktbezogene Umfrage bei Industrieunternehmen und Herstellern. Um einen Überblick über die am Markt verfügbaren Systeme zu bekommen, werden die angeschriebenen Unternehmen in verschiedenen Kategorien befragt.

Der Fragebogen bezieht sich auf folgende Aspekte:

- Allgemeine Angaben zum Produkt, Produktbezeichnung, Material des Wärmeübertragers, vorgesehene Niedertemperaturwärmequelle (z. B. Luft, Wasser oder Erdreich), das verwendete Wärmeträgermedium und die geometrischen Daten und Abmessungen zum Auf- oder Einbau.
- Betrieb und Anwendung des Wärmeübertragers, wie Eintrags- und Entzugsleitung, vorgesehene Temperaturniveaus für Vorlauf und Rücklauf sowie das Einsatzgebiete der Wärmeübertrager (EFH, MFH, Bürogebäude, Neubau und/oder Sanierung, wie auch die Verwendung für Heizbetrieb, Kühlbetrieb, Trinkwassererwärmung oder anderes).
- Investitionskosten für Material und Einbau.
- Gesetzliche Grundlagen, Auslegungsvorschriften und bereits vorhandenen Auslegungs- und Dimensionierungsprogramme.

Insgesamt werden 24 Unternehmen kontaktiert, die jeweils mindestens ein Wärmeübertragungssystem zur Kopplung von Niedertemperaturwärmequellen mit Wärmepumpen vertreiben. Bei den Firmen handelt es sich sowohl um am Markt etablierte Unternehmen als auch um neue Hersteller und Vertriebsfirmen dieser Technologie.

Die Zusammenführung und Aufbereitung aller Informationen und Angaben der Hersteller sowie aus der Marktrecherche erfolgt je System in einer Übersichtsmatrix. Tabelle 2 stellt die ermittelten Information mit den jeweiligen Eigenschaften der Wärmeübertrager in einer Übersicht zusammen. Die angegebenen Daten aus Tabelle 2 stellen Mittelwerte auf der Grundlage der Angaben der Hersteller sowie der in Deutschland üblichen Bodenklassen dar. Anzumerken bleibt, dass bei jeder Baumaßnahme im Vorfeld die Wärmeeintrags- bzw. Wärmeentzugskennwerte der zur Anwendung kommenden Wärmeübertragungstechnologie bestimmt werden müssen. Hierzu gehören auch die Zusammensetzung und Beschaffenheit des Bodens.

Tabelle 2 Überblick der Wärmeübertragungssysteme (Mittelwerte der Herstellerangaben)

Übertragungssystem	Quelle	Abmessungen Überträger	Einbautiefe	Entzugs- und Eintragsleistung	Randbedingungen
Erdwärmesonden	Erdreich	Bohrloch Ø 75 - 180 mm	50 - 100 m	30 - 100 W/m (beides)	Abstand zwischen Sonden einhalten Vorschriften / Randbedingungen der Bundesländer beachten genehmigungspflichtig
Spiralsonden	Erdreich (solare Einstrahlung, Niederschlag)	Ø bis 520 mm	bis 15 m	200 - 1.500 W/Sonde	keine Überbauung möglich außerhalb tiefwurzelnder Bäume
Phasenwechsellsonde	Erdreich	Ø 60 cm	bis 75 m		kein Frostschutzmittel notwendig (u.a. CO <sub>2</sub> -Sonde), kein extra Solekreislauf notwendig nur für den Heizfall anwendbar genehmigungspflichtig
Erdwärmekörbe	Erdreich (solare Einstrahlung, Niederschlag)	Ø 0,9 - 4,0 m	1 - 5 m	700 - 2.000 W/Korb	keine Überbauung möglich platzsparend, jedoch starken Temperaturschwankungen ausgesetzt
Flächenkollektoren	Erdreich (solare Einstrahlung, Niederschlag)	Verlegeabstand Rohr 0,2 - 0,8 m	1,2 - 3,0 m	10 - 40 W/m <sup>2</sup> (beides)	keine Überbauung / Versiegelung möglich großer Platzbedarf
Energiepfähle	Erdreich	Ø bis 0,6 m und größer	10 - 30 m	40 - 85 W/m 20 - 60 W/m	Synergieeffekte nutzen, wenn statisch bedingt erforderlich Tragfähigkeit der Pfähle muss gewährleistet sein (keine Temperaturen < 5°C)
Abwassertauscher	Abwasser	1,0 m x 0,65 m	im Kanal	350 - 1.800 W/m <sup>2</sup>	Abnehmer mit großem Wärmebedarf sinnvoll (>50 kW) Trockenwetterfluss min. 10 - 15 l/s; mind. DN 400; Anbindung max. 100 - 500 m Redundantes System erforderlich genehmigungspflichtig bei Abwasserwerken
Übertragungssysteme für Seen, Gewässer, etc.	Wasser	Höhe 1,1 m Ø 1,1 m	im Wasser 3 - 30 m tief	6 - 15 kW/Einheit 6 - 26 kW/Einheit	ggf. genehmigungspflichtig bei öffentlichen Gewässern
Brunnen (Grundwasser)	Grundwasser		10 - 200 m	500 - 600 W/m <sup>3</sup> /h	Grundwasserqualität ist zu beachten, eine Analyse des Grundwassers auf pH-Wert, Eisen, Mangan (Verockerungsgefahr) ist erforderlich Pumpversuch erforderlich; Bestimmung der Förderfähigkeit / Ergiebigkeit genehmigungspflichtig
Luftabsorber	Luft (solare Einstrahlung)	2,0 - 4,0 m x 1,0 - 1,5 m	Aufdach / Aufstellung	60 - 100 W/m <sup>2</sup>	keine Bohrung, kein Umweltrisiko Grundwasserschutz, in Kombination z. B. mit Eisspeicher als Regenerationssystem oder als Einzelsystem anwendbar
Eisspeicher	Erdreich (solare Einstrahlung, Niederschlag)	Ø bis 2,7 m und Sonderanfertigungen	bis 10 m tief	4 - 18 kW 3,5 - 7 kW	großer Wärmebedarf -> großer Speicher System zur Regeneration erforderlich (Absorber, Solarthermie) auch Kühlung im Sommerfall möglich
Luftwärmepumpe	Luft				optische Aufstellungskriterium Beachtung des Schallschutzes Luftansaug- bzw. Ausblasseite frei zugänglich

Im Allgemeinen muss für jede Nutzung der Erdwärme ein Gutachten über den spezifischen Wärmertrag erstellt werden.  
 Die Beschaffenheit und Zusammensetzung des Bodens muss dem Planer bekannt sein.

## 5.4 Quervergleich der Wärmeübertrager

Anhand der in Abschnitt 5.3 durchgeführten Marktrecherche erfolgt der Quervergleich der verschiedenen Wärmeübertrager. Dabei handelt es sich um die Wärmeübertragersysteme, nicht um die Wärmepumpentechnologie.

### Marktverteilung geschlossener Systeme

Abbildung 9 zeigt die prozentuale Aufteilung der am Markt vertretenden geschlossenen Systeme. Von den 54 erfassten (geschlossenen Systemen (auch Mehrfachnennungen vorhanden, da z. B. zwei Firmen Erdsonden herstellen) nutzen 74 % der Wärmeübertragersysteme das Erdreich als Wärmequelle (Nutzung von Geothermie und von im Erdreich gespeicherter Sonnenenergie sowie Umgebungswärme). Jeweils 9 % der Systeme nutzen Abwasser oder entziehen der Luft Wärme (Luftabsorber, keine Luft-Wasser-Wärmepumpe). 6 % der aufgenommenen Systeme sind Eisspeicher, die restlichen 2 % verwenden Wärmeübertrager im Wasser (Oberflächenwasser, Seen, Flüsse, keine direkten Wasser-Wasser-Wärmepumpen).

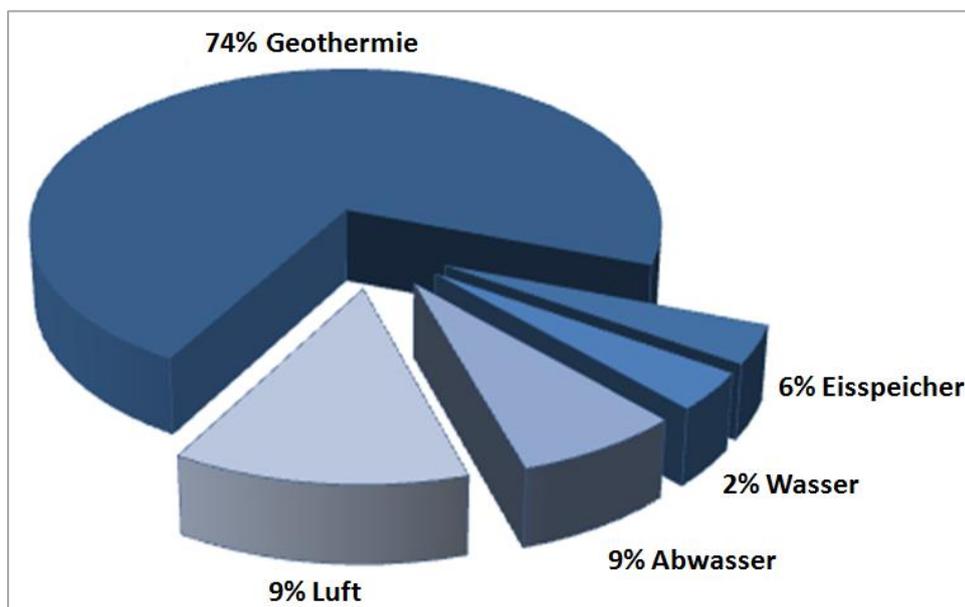


Abbildung 8 Marktverteilung unterschiedlicher geschlossener Wärmeübertragersysteme (Befragung von 24 in Deutschland ansässigen Herstellern und Anbietern mit 54 erfassten Systemen)

### Wärmeentzug und Einbautiefen

Abbildung 9 stellt die spezifische Wärmeentzugsleistung einzelner geothermischer Wärmequellen dar. Die Auswertungen zeigen, dass die Einsatzbereiche der einzelnen erdgekoppelten Wärmeübertrager vielfältig sind und voraussichtlich für viele Anwendungen entsprechende Systeme gefunden werden können. Der Wärmeentzug der einzelnen Systeme liegt bei Bohrungen zwischen ca. 10 W/m bis 100 W/m bzw. 10 W/m<sup>2</sup> bis etwa 200 W/m<sup>2</sup> bei flächigen Erdreichabsorbieren. In den meisten Fällen werden die Wärmeübertrager auf Tiefen von 2 m bis >100 m abgeteuft. Erdwärmekörbe und Spiralsonden weisen eine Entzugsleistung von größer 500 W/Stück auf.

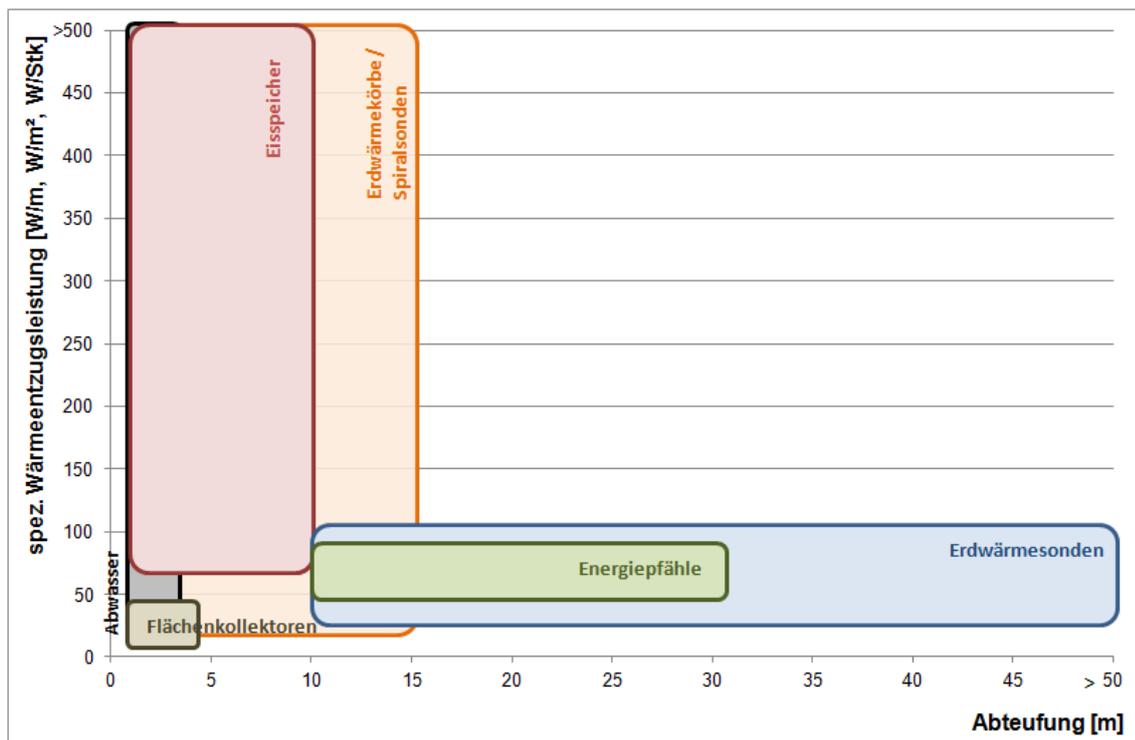


Abbildung 9 Gegenüberstellung verschiedener Wärmeübertrager im geothermischen Wärmequellenbereich – Entzugsleistung über Abteuftiefe nach Herstellerangaben

## Flächenbedarf

Beim Vergleich des Flächenbedarfs muss grundsätzlich darauf geachtet werden, ob die gewählten Systeme überbaubar sind oder nicht. Dies ist jedoch nur bei Neubauvorhaben relevant. Hier können geeignete System unter dem Gebäude installiert werden, was keinen zusätzlichen Platzbedarf auf dem Grundstück ggf. erfordert. In Bezug auf Wartung und Reparatur des Wärmeübertragers sollten jedoch generell alle Systeme nicht überbaut werden und jederzeit frei zugänglich sein.

In der Praxis ist häufig die zur Verfügung stehende Grundstücksfläche das entscheidende Argument. Gleichzeitig dürfen, aufgrund der notwendigen Regeneration des Erdreichs, über die Hälfte der Niedertemperaturquellsysteme sowieso nicht überbaut werden. Hierzu zählen z. B. Flächenkollektoren, Erdwärmekörbe oder Spiralsonden, welche zur Regeneration des Bodens den Niederschlag und die solare Einstrahlung über das Jahr benötigen.

Einige Systeme benötigen Zusatzeinrichtungen und/oder -komponenten, sei es zur Regeneration oder Sicherstellung der Versorgung (Redundanzsystem). Beispielsweise erfordert das System Eisspeicher oder ein eTank zur Regeneration bzw. zur Beladung mit Wärme einen Solar- und Luftabsorber oder eine Solarthermieanlage (z. B. Flach- oder Röhrenkollektor). Anders verhält es sich beim Abwasserwärmeübertrager. Bei der Nutzung von Abwasser als Wärmequelle ist generell ein redundantes Heizsystem erforderlich, dass in Fällen zu geringen Abwasseraufkommens oder einer Kanalreparatur eine Wärmebereitstellung ermöglicht. Abbildung 10 zeigt die daraus entwickelte Übersichtsmatrix zu den Randbedingungen.

Neben technischen Aspekten sind auch Abstände zu Grundstücksgrenzen und anderen Rohrleitungen oder Medien zu beachten. Bei der Luft-Wasser-Wärmepumpe ergeben sich Abstände zu schutzbedürftigen Bereichen, welche im Rahmen der Lärmausbreitung und des Schallschutzes berücksichtigt werden müssen.

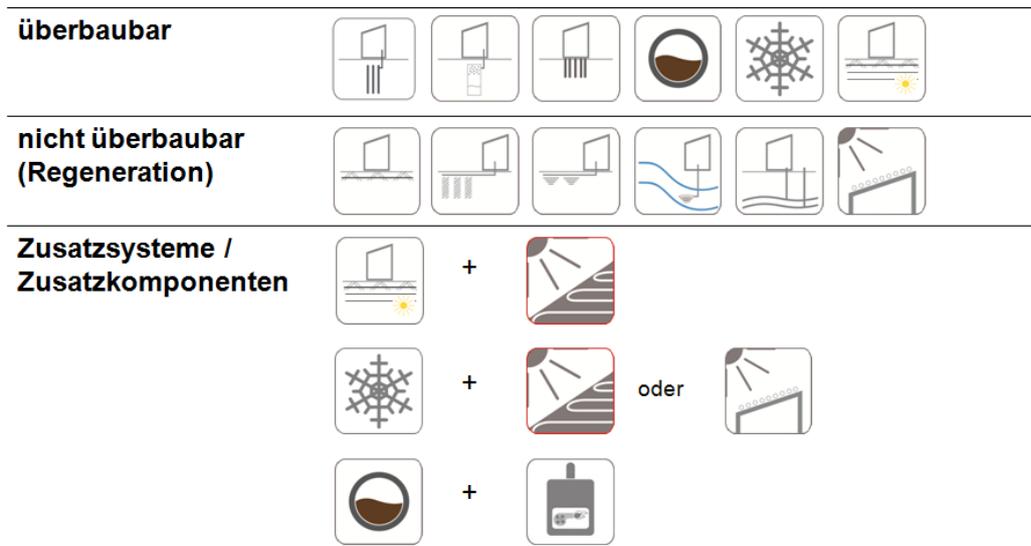


Abbildung 10 Randbedingung, Überbaubarkeit und Zusatzeinrichtung / -komponenten

### Berechnungsbeispiel für den erforderlichen Flächenbedarf

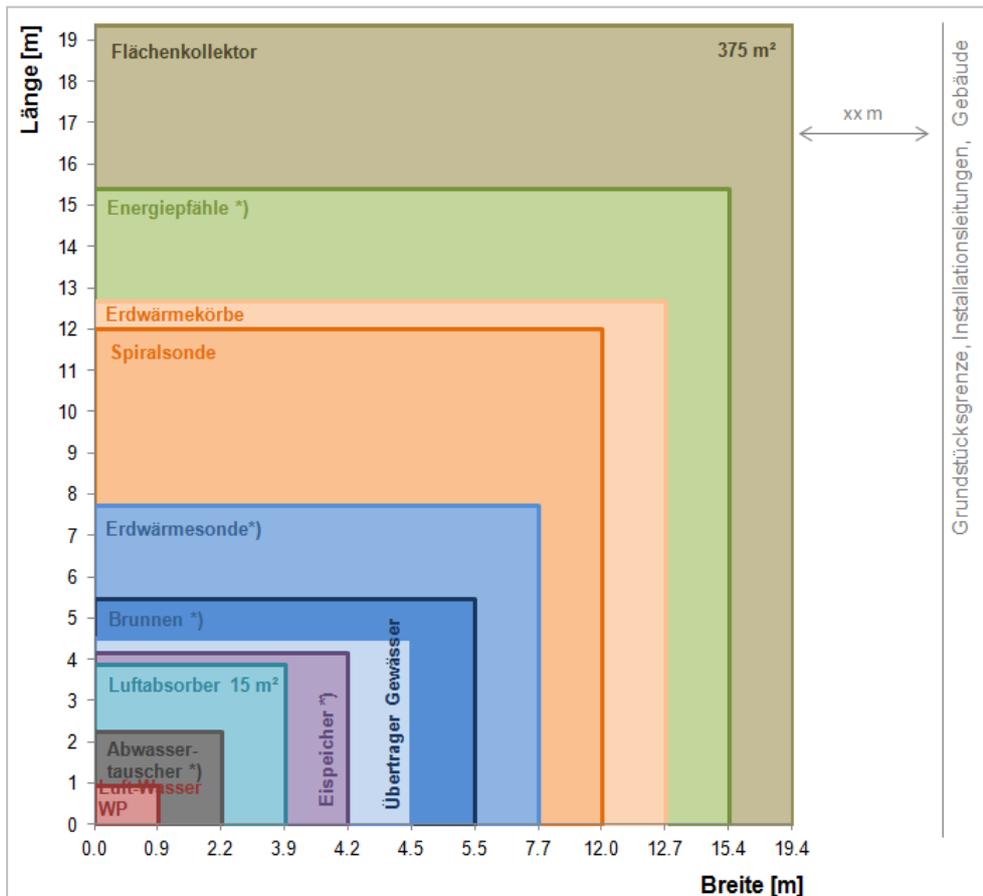
Zum besseren Verständnis wird an einem Beispiel der Flächenbedarf für unterschiedliche Wärmeübertrager berechnet. Ausgangspunkt ist ein Wohngebäude (z. B. Einfamilienhaus) mit einer Heizleistung von 10 kW. Die Jahresarbeitszahl wird mit 4,0 angesetzt. Daraus ergibt sich ungefähr eine elektrische Anschlussleistung von 2,5 kW sowie eine Leistung der Wärmequelle von 7,5 kW. Für die Berechnung werden die nach Tabelle 3 angegebenen Eckdaten der Wärmeübertrager (Entzugsleistungen, Mindestabstände der Wärmeübertrager zueinander, etc.) zu Grunde gelegt. Diese beinhalten auch die gleichen geologischen und klimatischen Randbedingungen. Die gemäß Herstellerangaben zu berücksichtigenden Abstände zwischen den Systemkomponenten werden bei der Flächenermittlung ebenfalls berücksichtigt.

Aus dieser Betrachtung resultiert Abbildung 11. Bei den dort angegebenen Flächen handelt es sich um einen „Mindestflächenbedarf“ der einzelnen Wärmeübertragersysteme. Eine Überbaubarkeit wird dabei nicht berücksichtigt. Dafür erfolgt die Angabe, welche Systeme unterhalb des Gebäudes angeordnet werden können. Anhand der ermittelten Bedarfskennwerte ist zu erkennen, dass oberflächennahe Systeme mit einer Abteuftiefe von bis zu 10 m den größten Flächenbedarf aufweisen. Dies ist damit zu erklären, dass diese Systeme Wärmeübertragerflächen repräsentieren, die im Wesentlichen in horizontaler Ebene wirken. Dabei muss die Eisbildung, durch Anpassung der Abstände der jeweiligen Elemente, dieser vornehmlich horizontal wirkenden Systeme berücksichtigt werden. Im aufgezeigten Fallbeispiel wird nur die Heizperiode (Heizfall) betrachtet. Die Integration einer Gebäudekühlung würde je nach Randbedingungen und Bodeneigenschaften den Flächenbedarf am Standort verringern.

**Tabelle 3 Annahmen für die Flächenbedarfsermittlung der Wärmeübertrager am Beispielgebäude im Heizfall**

Übertragungssystem	Durchmesser Übertrager [m]	Abstände zwischen den Übertragern [m]	angenommene Entzugsleistung	Anzahl	Anmerkung	Flächenbedarf gesamt [m <sup>2</sup> ]
Erdwärmesonden	0.18	6	50 W/m	2	Sondelänge 75 m	60.0
Spiralsonden	0.5	3	500 W/Sonde	15	-	144.3
Erdwärmekörbe	2.4	4	1.500 W/Korb	5	-	160.8
Flächenkollektoren	-	-	20 W/m <sup>2</sup>	-	-	375.0
Energiepfähle	0.5	5	50 W/m	10	Pfahlänge 15 m	237.6
Abwassertauscher	6	-	1.500 W/m <sup>2</sup>	9	Modul 1.0 m x 0.6 m	5.0
Übertragungssysteme Gewässer, etc.	1.1	4	10 kW/Einheit	1	-	20.4
Brunnen (Grundwasser)		30	jeweils 1 Entnahme- und Schluckbrunnen			30.0
Solar- und Luftabsorber	-	-	500 W/m <sup>2</sup>	-	-	15.0
Eisspeicher	2.7	2	7.5 kW	1	10 m <sup>2</sup> Eisspeicher und 20 m <sup>2</sup> Absorber erforderlich	17.3
Luftwärmepumpe	-	-	10 kW	1	nur Gerät H/B/T [mm] 1045 / 1490 / 593	0.88

Annahmen: Heizleistung Gebäude 10 kW  
 JAZ WP 4,0  
 Wärmeentzug Quelle 7.5 kW



**Abbildung 11 Flächenbedarf der einzelnen Wärmeübertrager für das Beispielgebäude im Heizfall ohne Berücksichtigung einer Kühlung – überbaubare Systeme sind mit \*) gekennzeichnet**

## 6 SYSTEMKONFIGURATION (AP2)

Das Hauptziel der Systemkonfiguration ist die Erarbeitung und Festlegung von Referenzanlagen, bestehend aus Wärmepumpen, Niedertemperaturwärmequellen und -übertragern für die Wärmebereitstellung für Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie die Wärme- und Kältebereitstellung von Bürogebäuden. Neben derzeit marktrelevanten Systemen und Komponenten berücksichtigen die Systemkonfigurationen auch innovative Niedertemperaturwärmeübertrager und Konzepte, die sich aktuell in der Entwicklung befinden und zum Teil noch erheblichen Forschungs- und/oder Entwicklungsbedarf aufweisen. Die zu erwartende Zukunftsfähigkeit einzelner Systeme sowie erkennbare Markttendenzen werden bereits im Jahr 2016 in Kooperation mit den Industriepartnern diskutiert und bei der Auswahl der zu analysierenden Systeme und Anlagentypen berücksichtigt.

Für die unterschiedlichen Gebäude werden jeweils sieben Wärmedämmstandards festgelegt, siehe Tabelle 4. Diese Wärmedämmstandards repräsentieren die Bandbreite der für die drei betrachteten Gebäudearten in Deutschland typischen Gebäudebestände. Für das Bürogebäude (Nichtwohngebäude) werden zudem Bedarfswerte für Raumkühlung definiert. In Anlehnung an die gültige Energieeinsparverordnung (EnEV 2014/16) beziehen sich die Bedarfswerte auf die Gebäudenutzflächen  $A_N$  sowie den Gebäudestandort Potsdam.

Tabelle 4 Bedarfswerte für Heizwärme und Raumkühlung der Referenzgebäude

Gebäude	Heizwärmebedarf [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Raumkühlung <sup>1)</sup> [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]
Einfamilienhaus	15; 25; 50; 75; 100; 150 und 200	- keine -
Mehrfamilienhaus		- keine -
Bürogebäude		5; 15; 45; 70 und 100

<sup>1)</sup>ohne Serverkühlung

Als Wärme- bzw. Kältequellen stehen Luft, Wasser oder auch das Erdreich an einem Anlagenstandort oftmals nebeneinander zur Verfügung. Zu Beginn der Detailplanung einer Wärmepumpenanlage muss daher grundsätzlich entschieden werden, auf welche der Quellen (schwerpunktmäßig) zurückgegriffen werden soll. Zur Nutzung von Wärmepumpen für Wohngebäude und im Bereich von Bürobauten, aber auch zur Raumkühlung von Büros, werden in der Regel die in Kapitel 5 diskutierten Niedertemperaturwärme(kälte)quellen herangezogen.

Im Rahmen der Systemkonfigurationen wird eine Vielzahl von unterschiedlichen Wärmeübertragern für verschiedene Wärme- bzw. Kältequellen betrachtet. Dabei werden insbesondere marktrelevante Wärmeübertragungssysteme, für die zudem verifizierte mathematische Grundlagen zur Verfügung stehen, herausgesucht. Ein Gesamtüberblick der zurzeit am Markt angebotenen Niedertemperaturwärmeübertrager ist in Kapitel 5.3 enthalten. Insgesamt werden acht verschiedene Systemkonfigurationen identifiziert, siehe Tabelle 5. Sämtliche für das Pre-Check-Tool erarbeiteten Systemkonfigurationen und Musteranlagen werden auch für die numerischen Simulationen als Referenzsysteme definiert und entsprechend des im Vordimensionierungsprogramm abgebildeten Spektrums der Konfigurationen und Dimensionierungen der einzelnen Anlagenteile variiert. Die Grundlagenermittlung zur Erzeugung einer Datenbasis für das Programm WP<sub>SOURCE</sub> basiert zu wesentlichen Teilen auf den Ergebnissen der durchgeführten numerischen Simulationen, siehe Kapitel 9.

Im Rahmen von WP<sub>SOURCE</sub> und den grundlegenden Berechnungen sowie den numerischen Simulationen werden die Referenzgebäude für alle 15 der für Deutschland definierten Klimaregionen sowie in Fälle, in denen das Erdreich die Wärme- und/oder Kältequelle darstellt, auch für unterschiedliche thermodynamische Eigenschaften des Erdreichs untersucht.

**Tabelle 5** Wärmequelle und Wärmeübertragungssystem für Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie für Bürogebäude

	Wärmequelle/ Wärmeübertragungssystem <sup>1)</sup>	Abkürzung	Ein- familienhaus	Mehr- familienhaus	Bürogebäude
1	Erdwärmesonde	EWS	x	x	x
2	Spiralsonde	SPS	x	x	
3	Phasenwechsellsonde	PWS	im Projekt nicht mittels Simulation untersucht		
4	Erdwärmekorb	EWK	x	x	
5	Flächenkollektor	FK	x	x	
6	Energiepfahl	EP	im Projekt nicht mittels Simulation untersucht		
7	Abwasserwärmeübertrager	AW		x	x
8	Übertragungssysteme für Seen, offene Gewässer etc.	OG	im Projekt nicht mittels Simulation untersucht		
9	Brunnen (Grundwasser)	GW	x	x	x
10	Luft (für Luft-Wasser-WP)	L	x	x	x
11	Eisspeicher mit Solar- und Luftabsorber	EIS	x	x	x
12	eTank + Solarthermie	ET	im Projekt nicht mittels Simulation untersucht		
13	Sonderformen	SF	im Projekt nicht mittels Simulation untersucht		

<sup>1)</sup>Die Raumkühlung von Bürogebäuden wird im Forschungsprojekt future:heatpump II untersucht.

## 7 MONITORINGGEBÄUDE (AP3)

Im Rahmen eines „Low-Level-Monitorings“ werden im Forschungsprojekt verschiedene Gebäudetypen mit unterschiedlichen Niedertemperaturwärmeübertragern messtechnisch untersucht. Bei der Gebäudeauswahl wird darauf geachtet, dass unterschiedliche Niedertemperaturwärmequellen und -übertrager wie Erdwärmesondenfelder, Energiepfahlanlagen und Abwasserübertrager messtechnisch erfasst werden. Des Weiteren erfolgt das Low-Level-Monitoring bei neu errichteten Gebäuden als auch bei sanierten Bestandsgebäuden. Im Bereich der Wohngebäude (Ein- und Mehrfamilienhäuser) wird die Gebäudeheizung und Trinkwassererwärmung untersucht. Bei Nichtwohngebäuden erfolgt die Systembetrachtung für den Heiz- und Kühlfall, siehe Abbildung 12.

	Einfamilienhaus	Mehrfamilienhaus	Nicht-Wohngebäude	Wärmequelle und -übertrager
Neubau	  	  	  	     
Sanierung	  	  	  	

 Heizen   
  Kühlen   
  Trinkwarmwasser

Abbildung 12 Gebäudetypologien und Baustandard

Im Projekt werden 14 unterschiedliche Gebäude erfasst und dokumentiert. Dabei handelt es sich um 11 Neubauten, drei Sanierungen und insgesamt 10 unterschiedliche Wärmeübertragungssysteme für Wärmepumpenanlagen. Die untersuchten Gebäude splitten sich in fünf Ein-, sechs Mehrfamilienhäuser und drei Büro- und Verwaltungsgebäude. Alle Systeme werden zum Heizen mit einer Wärmepumpe und zum Kühlen im freien Kühlbetrieb bzw. über die mechanische Kühlung (reversible/ umschaltbare Wärmepumpe) genutzt. Die entsprechenden Standorte der im Forschungsprojekt untersuchten Gebäude zeigt Abbildung 13.

Innerhalb des Kapitels werden zu Beginn die Grundlagen des Monitorings erläutert. Hierzu gehören auch die Definition der erfassten Messstellen und die Bilanzgrenzen der Wärmepumpe. Im Anschluss erfolgt die Vorstellung der Monitoringergebnisse der 14 erfassten Gebäude sowie ein Quervergleich der Gebäude- und Anlagenkonzepte.

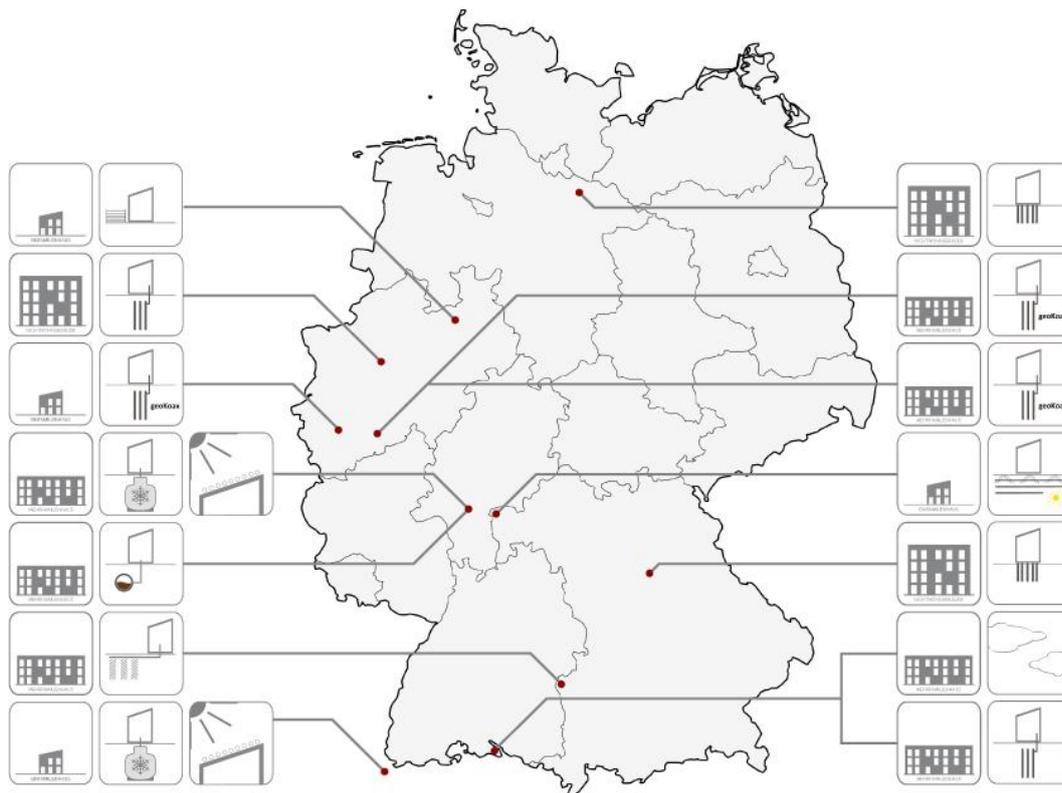


Abbildung 13 Standorte der im Forschungsprojekt untersuchten Gebäude

## Grundlagen Monitoring

Das Monitoring startet jeweils mit einer Bestandsanalyse unter den Aspekten Gebäudekonstruktion, technische Gebäudeausrüstung und Energiekonzept. Die Bestandsaufnahme der Gebäude erfolgt in enger Zusammenarbeit mit den Gebäudeeigentümern, Gebäudetechnikern und Anlagenbetreibern vor Ort. Dabei werden die zur Verfügung gestellten Unterlagen (u. a. Revisionspläne und Schemen, Wärmeschutznachweise, Auslegungsunterlagen zur Anlagentechnik, etc.) gesichtet.

Das Monitoring erstreckt sich je Gebäude über mindestens zwei bis maximal drei Jahre. Mit den damit erfassten Messdaten stehen so zur Auswertung der Leistungsfähigkeit einzelner Anlagenkomponenten und zur Kennwertbildung mindestens zwei Heiz- und Kühlperioden zur Verfügung. Der Hauptfokus des Monitorings liegt auf der Erfassung der Systemkomponenten Wärmeübertrager/Wärmequelle und Wärmepumpe. Das Messkonzept aller Gebäude und Anlagen zeigt beispielhaft Abbildung 14. Neben den Wärme- und Stromverbräuchen werden auch Volumenströme und Temperaturen erfasst und soweit vorhanden ggf. Betriebszustände, Ventilstellungen, Erdreichtemperaturen, etc.

Folgende Messstellen werden im Projekt betrachtet (soweit je Gebäude vorhanden):

- Primärseitig: Niedertemperaturquelle und Wärmeübertrager,
- Sekundärseitig: Gebäude (Heizung und Trinkwarmwasser sowie Kühlung),
- Stromverbrauch: Verdichter der Wärmepumpe und Umwälzpumpen,
- Datenerfassung: Energiemengen und Leistung, Temperaturen und Volumenströme.

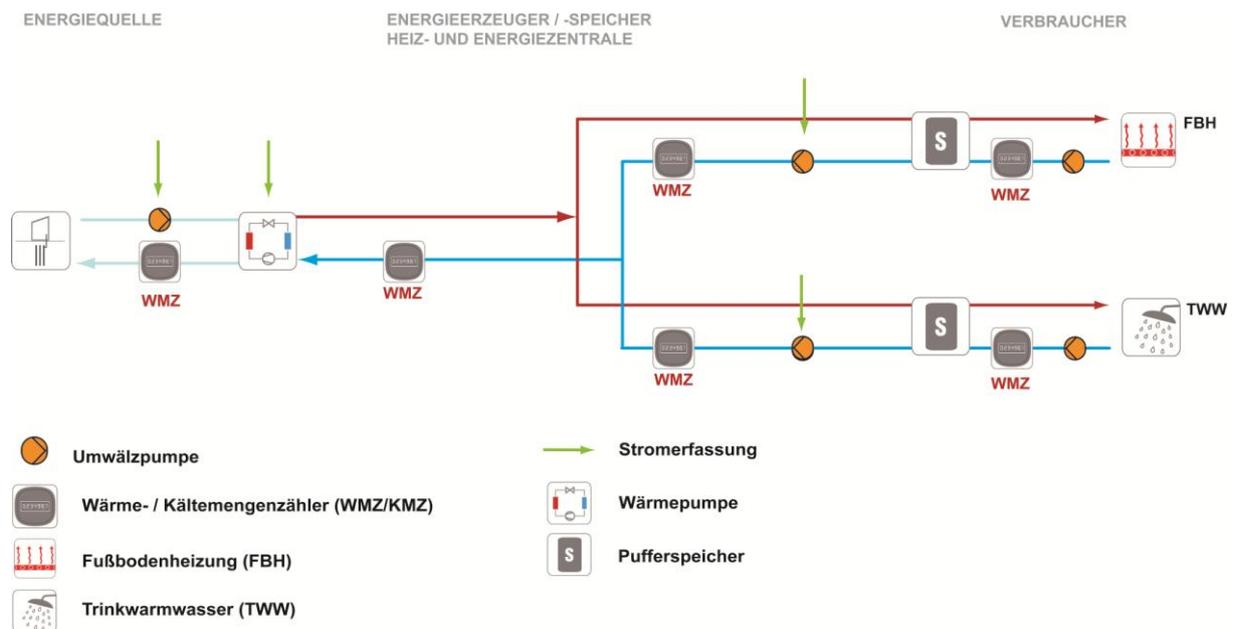


Abbildung 14 Beispiel für ein Messkonzeptschema der Anlagentechnik der jeweiligen Gebäude

### Bilanzgrenzen der Wärmepumpe

Um im Rahmen der Auswertung der Performance der Wärmepumpe eine einheitliche Basis zu gewährleisten, werden im Vorfeld die Bilanzgrenzen für die Bildung der (Jahres-)Arbeitszahl (JAZ) definiert. Die Bilanzgrenzen sind dabei Abbildung 15 zu entnehmen.

Die Grenzen der Bilanzen werden gesetzt zu:

$JAZ_1$  Betrachtung des Stromverbrauchs und der Energiemengen nur in Bezug auf die Wärmepumpe (Verdichter).

$$JAZ_1 = \frac{\text{Wärme – bzw. Kältebereitstellung}}{\text{Strom Verdichter}}$$

$JAZ_2$  Betrachtung des Stromverbrauchs und der Energiemengen in Bezug auf die Wärmepumpe (Verdichter) und die Umwälzarbeit quellenseitig (Erdreich).

$$JAZ_2 = \frac{\text{Wärme – bzw. Kältebereitstellung}}{\text{Strom Verdichter} + \text{Strom UP\_Quelle}}$$

In der Auswertung und Gegenüberstellung der untersuchten Anlagen werden im Rahmen des Forschungsprojektes nur die  $JAZ_1$  und die  $JAZ_2$  näher untersucht und analysiert. Die Analyse der Energieverbräuche auf der Gebäudeseite (Heizung und Trinkwassererwärmung) erfolgt nicht. Des Weiteren werden, je nach vorhandenen Messdaten, der Heiz- und Kühlfall getrennt voneinander betrachtet, so dass eine Jahresarbeitszahl für den Heiz- als auch für den Kühlfall ermittelt wird.

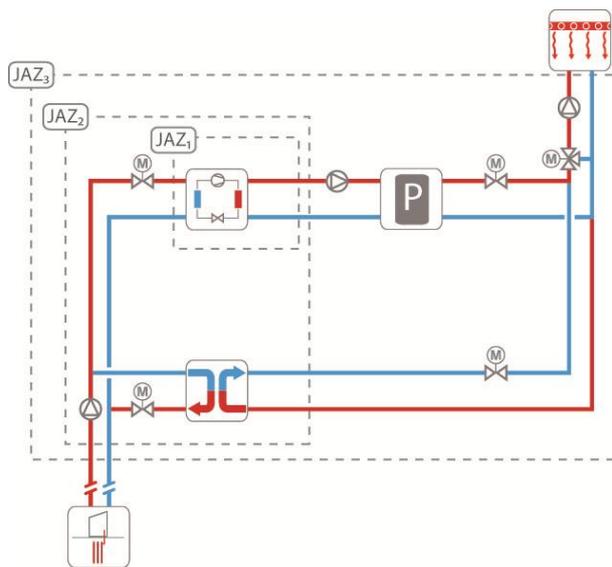


Abbildung 15 Bilanzgrenzen für die Bildung der Arbeitszahl

## 7.1 Monitoringergebnisse Gebäude

Die aus der Gebäude- und Anlagenanalyse ermittelten Kenndaten zeigt Abbildung 17. Dabei werden 11 Wohngebäude und drei Bürogebäude innerhalb des Forschungsprojektes messtechnisch erfasst. Von 2002 bis 2016 erfolgt die Fertigstellung der Gebäude. Dieser Zeitraum beinhaltet auch die Ausführung der Sanierungen. Eine detaillierte Gebäudeübersicht mit Angaben zu den Gebäuden, den Wärmequellen, den Übergabesystemen, etc. befindet sich im Anhang (siehe Kapitel 16.2). Die entsprechenden Kenndaten können den dort hinterlegten Steckbriefen entnommen werden.

Gemäß Energiekonzept verfügen die 14 betrachteten Objekte jeweils unterschiedliche Konzeptansätze in Bezug auf die Beheizung der Gebäude (z. B. Fußbodenheizung, stat. Heizkörper, Lüftungsanlagen). Ca. 65 % der Gebäude sind mit einer Fußbodenheizung ausgestattet (9 der 14 Gebäude), ca. 35 % mit Heizkörpern (5 der 14 Gebäude). Die Wärmepumpe versorgt neben der Raumheizung in neun Gebäuden auch die Trinkwassererwärmung. Bei ca. 30 % (4 der 14 Gebäude) ist eine Lüftungsanlage installiert, deren Luft ebenfalls über die eingebaute Wärmepumpe vorkonditioniert wird. Abbildung 16 zeigt die ermittelten Komponenten der untersuchten Objekte.

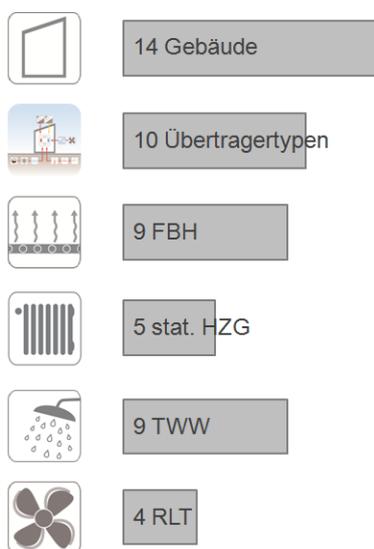


Abbildung 16 Statistische Verteilung der Übergabesysteme in den untersuchten Gebäuden

	Neubau		Sanierung	
<b>Einfamilienhaus</b>	1	 Erdwärmesonden (geoKOAX), 2008 3 x 21 m, WP 7.3 kW <sub>th</sub> NGF 259 m <sup>2</sup>	4	 Erdwärmesonden (geoKOAX), 1968 / k.A. 6 x 24 m, WP 11 kW <sub>th</sub> NGF 130 m <sup>2</sup>
	2	 e-Tank, 2015 8 x 75 m <sub>Rohr</sub> + PVT, WP 10 kW <sub>th</sub> NGF 158 m <sup>2</sup>	5	 Eisspeicher + Luftabsorber, k.A. / 2013 12 m <sup>3</sup> Eisssp. + 19 m <sup>2</sup> Luftabs., WP 13 kW <sub>th</sub> NGF 147 m <sup>2</sup>
	3	 Energiezaun (1/3 Erdreich), 2007 8 m Länge x 2.4 m Höhe, WP 6 kW <sub>th</sub> NGF 208 m <sup>2</sup>		
<b>Mehrfamilienhaus</b>	6	 Erdwärmesonden (geoKOAX), 2013 32 x 30 m, WP 103 kW <sub>th</sub> NGF 2.000 m <sup>2</sup>	11	 Spiralsonden, 1938 / 2015 30 x 4.5 m, WP 20 kW <sub>th</sub> NGF 731 m <sup>2</sup>
	7	 Eisspeicher + Luftabsorber, 2015 98 m <sup>3</sup> Eisssp. + 85 m <sup>2</sup> Luftabs., WP 50 kW <sub>th</sub> NGF 1.600 m <sup>2</sup>		
	8	 Luft-WP, 2016 WP 13.2 kW <sub>th</sub> NGF 1.140 m <sup>2</sup>		
	9	 Erdwärmesonden, 2016 8 x 100 m, WP 57.1 kW <sub>th</sub> NGF 1.140 m <sup>2</sup>		
	10	 Abwasser, 2015 102 m <sup>2</sup> , WP 145 kW <sub>th</sub> NGF 9.828 m <sup>2</sup>		
<b>Nichtwohngebäude</b>	12	 Energiepfähle, 2002 101 x 19.2 m, WP 85 kW <sub>th</sub> NGF 3.957 m <sup>2</sup>	<b>Legende</b> Wärmeübertrager, Baujahr des Gebäude Abmessung / Größe Wärmeübertrager, Wärmepumpe (WP) thermische Leistung (kW <sub>th</sub> ) Nettogrundfläche (NGF)  PVT - Photovoltaisch-Thermischer Kollektor	
	13	 Erdwärmesonden, 2004 36 x 150 m, WP 326 kW <sub>th</sub> NGF 6.189 m <sup>2</sup>		
	14	 Energiepfähle + Agrothermie, 2015 99 x ~10 m EP + 4.400 m <sup>2</sup> Agrothermie, WP 85.6 kW <sub>th</sub> NGF 15.600 m <sup>2</sup>		

Abbildung 17 Gebäude und Wärmeübertragungssysteme im Low-Level-Monitoring innerhalb des Forschungsprojektes

Innerhalb der Analysen liegt der Fokus auf dem Anlagensystem bestehend aus Wärmepumpe und Niedertemperaturwärmequelle/ Wärmeübertragungssystem. Die Ergebnisse werden einander gegenübergestellt und, wo ratsam, Empfehlungen zur Effizienzsteigerung und damit zur Erhöhung der Arbeitszahl und/oder Optimierung des Betriebes ausgesprochen.

Aus den aufgezeichneten Messdaten der Gebäudeanlagen werden

- die Entzugs- und Eintragsenergien sowie
- die Quelltemperaturen der Niedertemperaturwärmequelle (Ein- und Austrittstemperaturen, keine Messstellen in den Wärmeübertragern vorhanden),
- die Arbeitszahl der Wärmepumpe,
- die Betriebsstunden der Wärmepumpe,
- die gebäudeseitige Wärmebereitstellung durch die Wärmepumpe (Heizung und Trinkwarmwasser) sowie
- die Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmepumpe im Gebäude

ermittelt und verglichen.

In Abbildung 18 sind beispielhaft die Monitoringergebnisse in Form der verschiedenen Auswertungen je Gebäude dargestellt. Die Grafiken geben dabei nur einen Überblick. Die eigentlichen Ergebnisse der einzelnen Gebäude sind dem Anhang zu entnehmen, siehe Kapitel 16.4.

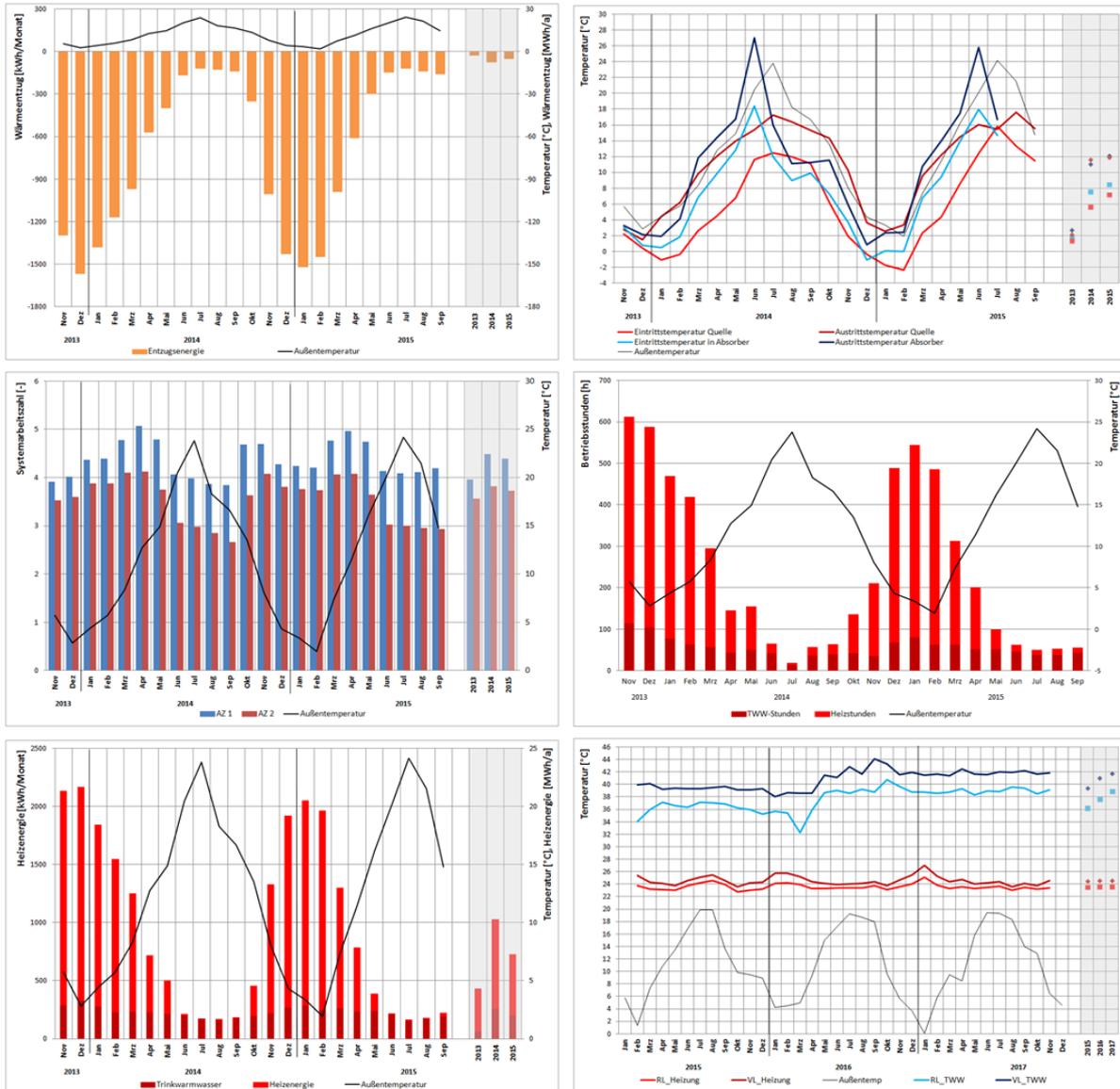


Abbildung 18 Beispielhafte Darstellung der umgesetzten Auswertungen je Monitoringgebäude

## 7.2 Quervergleich der Gebäude- und Anlagenkonzepte

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus dem Monitoring der untersuchten Anlagen ergebnisspezifisch gegenübergestellt. Dabei erfolgt auch der Vergleich mit den Auslegungswert aus der Planung sowie den Richtwerten aus der Literatur bzw. den Hersteller-/ Anbieterangaben. Wesentliche Kriterien sind dabei die Entzugsleistung und die Entzugsenergien sowie der Flächenbedarf und die getätigten Investitionskosten der einzelnen Systeme. Anzumerken bleibt, dass im Quervergleich nur auf den Heizfall eingegangen wird. Der zusätzliche Kühlbedarf der Nichtwohngebäude wird im Rahmen des Vergleichs nicht betrachtet.

Die Auswertung der Gebäude erfolgt im Zeitraum von 2015 bis 2018. Für einige Gebäude liegen die Daten jedoch erst seit 2016 (Inbetriebnahme des Gebäudes oder der Datenübertragung) vor. In diesen Fällen können für das Jahr 2015 keine Kenndaten gebildet werden. Demgegenüber liegen für das Gebäude 3 mit „Energiezaun“ nur Messdaten für die Jahre 2010 bis 2013 und für das Gebäude 5 mit „Eispeicher“ für die Jahre 2013 bis 2015 vor. Die messtechnische Erfassung dieser Anlagen erfolgte nicht im Rahmen des Projektes „future:heatpump“. Die Daten werden jedoch für den Vergleich durch die jeweiligen Eigentümer zur Verfügung gestellt und somit freigegeben.

**Tabelle 6** Monitoringzeiträume der Gebäude und Anlagen im Low-Level-Monitoring des Forschungsprojektes „future:heatpump“ (WP - Wärmepumpe, EWS - Erdwärmesonden, EP - Energiepfähle)

Gebäude	1	2	3	4	5
Wärmeübertrager	EWS	eTank	Energiezaun	EWS	Eisspeicher + Luftabsorber
Monitoringzeitraum	02/15 - 11/17	02/16 - 06/18	09/10 - 09/13	02/15 - 11/17	11/13 - 09/15
Gebäude	6	7	8	9	10
Wärmeübertrager	EWS	Eisspeicher + Luftabsorber	Luft-WP	EWS	Abwasser
Monitoringzeitraum	02/15 - 11/17	11/15 - 07/18	10/16 - 07/18	09/16 - 07/18	09/15 - 06/18
Gebäude	11	12	13	14	
Wärmeübertrager	Spiralsonden	EP	EWS	Agrothermie + EP	
Monitoringzeitraum	10/16 - 07/18	01/15 - 06/18	01/15 - 07/18	04/16 - 07/18	

***Hinweis:** Die im Forschungsprojekt untersuchten Gebäude mit ihren geothermischen Anlagen stellen aufgrund der unterschiedlichen Konstruktionen, Ausstattung und Nutzung jeweils Einzelobjekte dar, deren Kennwerte nicht unmittelbar vergleichbar sind. Durch die Auswertungen und Vergleiche können aber Tendenzen und Richtgrößen ermittelt werden, die hinsichtlich eines Vergleichs der Funktionsweise und Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Systeme anwendbar sind.*

Allgemein ist bei allen Gebäuden anzuführen, dass auf eine Einregulierungsphase und einer stetigen Kontrolle der Eintrags- und Entzugsmengen nicht verzichtet werden sollte. Wie in Vorgängerprojekten und auch bei den aktuell untersuchten Gebäuden festzustellen ist, werden erst im Langzeitmonitoring Fehler und Unstimmigkeiten erkannt, die den Betrieb der Anlagen maßgebend beeinflussen. Eine kontinuierliche Kontrolle, Anpassung und Wartung ist daher notwendig, um den planmäßigen Anlagenbetrieb zu gewährleisten.

## Wärmebereitstellung

Die statistische Verteilung der Wärmebereitstellung der Gebäude auf die Raumheizung und die Trinkwassererwärmung ist an sich kein Anlagenkennwert. Dieser Wert vermittelt jedoch einen ersten Eindruck zur Funktionsweise und Auslastung der Wärmepumpenanlage. Die Deckungsanteile der einzelnen Gebäude und deren Anlagen sind dabei u. a. abhängig vom Dämmstandard, dem Ausstattungsgrad der Sanitärobjekte und den in einer Wohneinheit lebenden Personen. Bei Gebäuden mit einem sehr hohen Dämmstandard (z. B. Neubau KfW Effizienzhaus 40) ist der Anteil an Raumwärme geringer als noch vor 30 Jahren. Der Verteilung von Heizung zu Trinkwarmwasser hat sich daher in den letzten Jahren deutlich geändert. Abbildung 19 zeigt den Vergleich der mittleren Deckungsanteile zwischen Heizung und Trinkwassererwärmung. Anhand des Vergleichs der Deckungsanteile ist festzustellen, dass

- bei den betrachteten Einfamilienhäusern die Wärmebereitstellung für die Raumheizung mit einem Anteil von über 65 bis 90 % der Wärmebereitstellung maßgebend ist,
- bei sehr gut gedämmten Mehrfamilienhäusern (Vergleich Geb. 7) die Trinkwassererwärmung einen deutlich höheren Anteil erreichen kann,
- bei den hier untersuchten Nichtwohngebäuden die Trinkwassererwärmung nicht über das Wärmepumpensystem erfolgt.

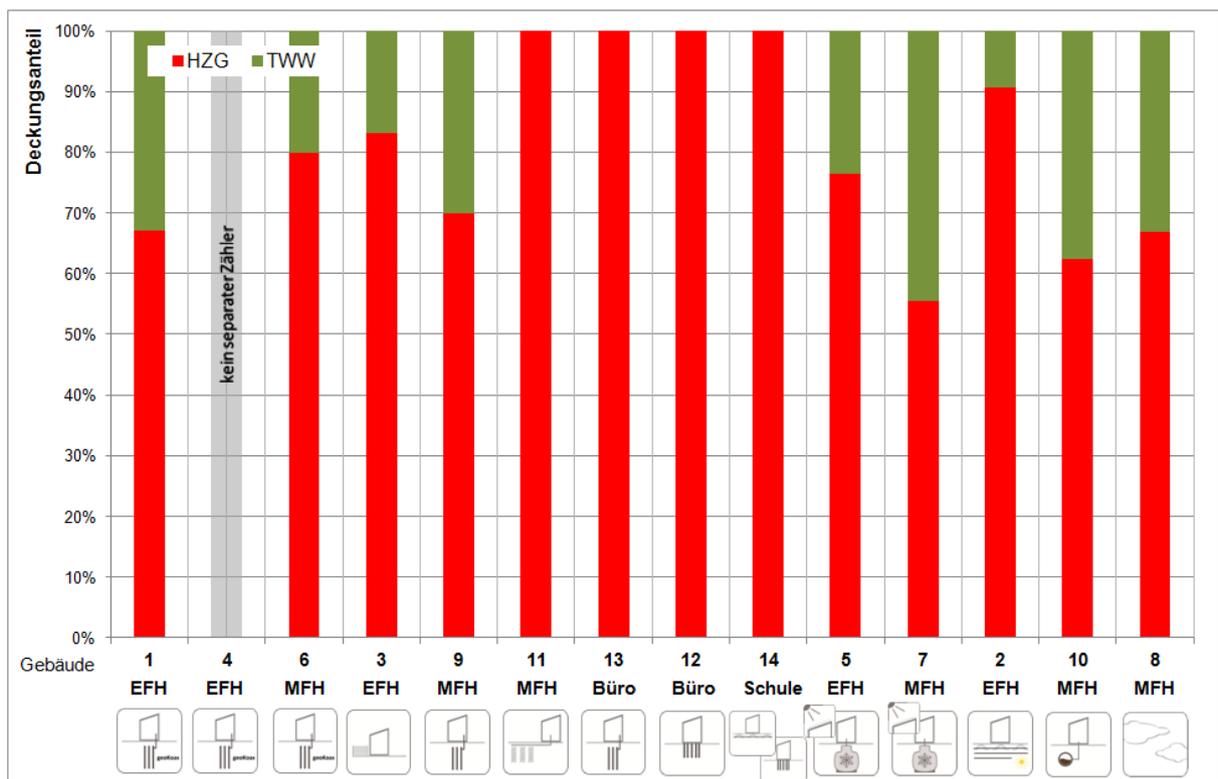


Abbildung 19 Im Rahmen des Monitorings gemessene mittlere Deckungsanteile der Wärmebereitstellung der untersuchten Wärmeübertrager mit zugehörigen Niedertemperaturwärmequellen

## Temperaturniveau Quelle und Senke

Die Betriebsweise der Wärmepumpe und das dazugehörige Temperaturniveau der Quelle als auch der Senke haben einen entscheidenden Einfluss auf die Jahresarbeitszahl. So wirken sich z. B. niedrige Austrittstemperaturen der Quellsysteme oder hohe Vorlauftemperaturen im Gebäude negativ aus. Hinsichtlich der Vorlauftemperaturen der untersuchten Gebäude sollten hier angemessene Temperaturen vorherrschen, da in den betrachteten Gebäuden überwiegend

Fußbodenheizungen oder andere Niedertemperaturübertrager zur Konditionierung der Gebäude verwendet werden.

In Abbildung 20 sind die Temperaturspanne sowie der Mittelwert der gemessenen Ein- und Austrittstemperaturen der unterschiedlichen Niedertemperaturwärmequellen sowie die im Gebäude an die Raumheizung und das Trinkwarmwasser bereitgestellten Vorlauftemperaturen aufgetragen. Anhand der ausgewerteten Temperaturniveaus ist festzustellen, dass

- die Austrittstemperaturen aus den Wärmeübertragern immer größer als 0 °C ist. Nur in Geb. 11 werden Austrittstemperaturen < 0 °C gemessen.
- die Austrittstemperaturen kurzzeitig auch bis auf 35 °C ansteigen. Dies ist vor allem in den Sommermonaten der Fall.
- die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt Quelle zwischen 2 bis 4 K liegt.
- generell die Quelltemperaturen den Randbedingungen der Quelle folgen. So haben die erdgekoppelten Systeme meist geringere Temperaturen als z. B. der Abwasserwärmeübertrager.
- obwohl in den Gebäuden Niedertemperaturheizsysteme für die Raumheizung installiert sind, kurzzeitig Vorlauftemperaturen > 55 °C erfasst werden. Im Mittel liegen die Vorlauftemperaturen für die Raumheizung jedoch gemäß Planung zwischen 25 und 45 °C.
- für die Trinkwassererwärmung Vorlauftemperaturen von > 70 °C gemessen werden, was auf die Legionellschaltung bei zentralen Systemen zurückzuführen ist. Die Vorlauftemperaturen pendeln im Mittel bei den Gebäuden zwischen 35 und 50 °C.

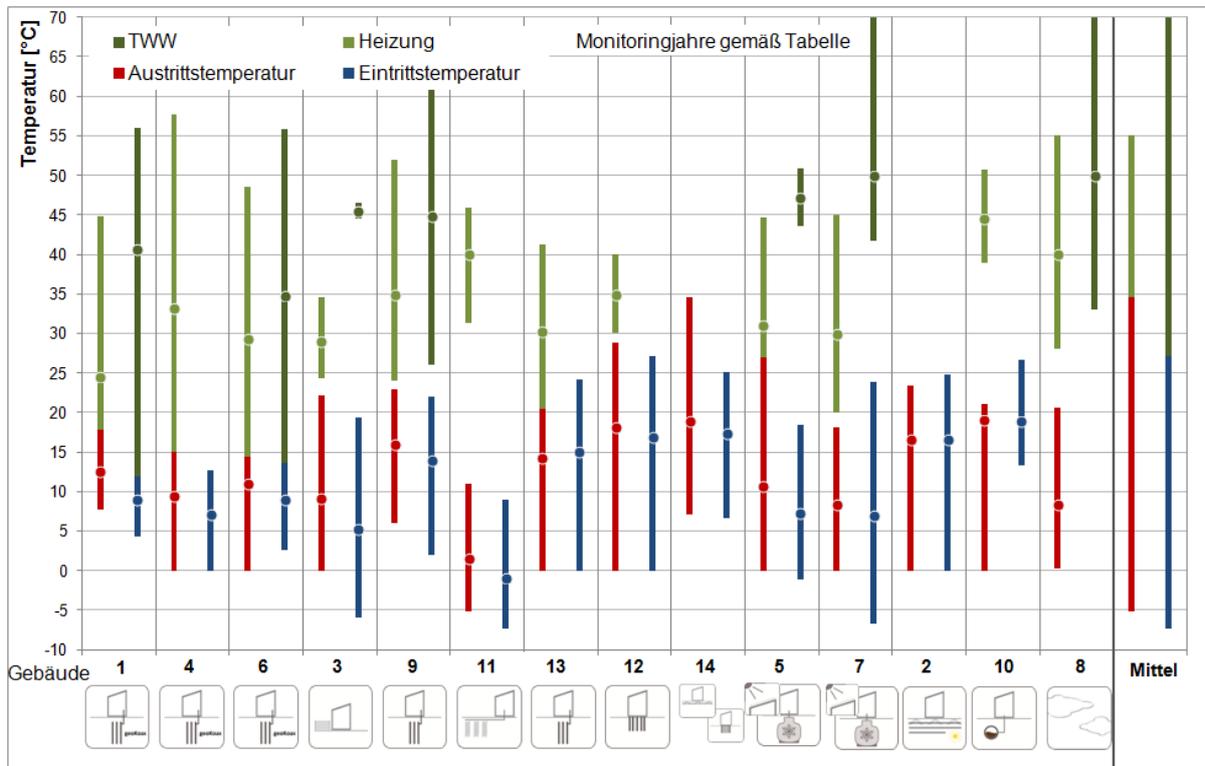


Abbildung 20 Im Rahmen des Monitorings gemessene Ein- und Austrittstemperaturen der untersuchten Wärmeübertrager mit zugehörigen Niedertemperaturwärmequellen und Vorlauftemperaturen der Wärmeübergabesysteme

### Wärmeentzug Niedertemperaturwärmeübertrager

Die im Rahmen des Monitorings in den einzelnen Jahren erfassten Energieentzugsmengen aus den Niedertemperaturwärmequellen schwanken u. a. infolge des Wittereinflusses und des daraus resultierenden variierenden Bedarfs (die Daten sind nicht witterungsbereinigt) an Heizwärme sowie durch Änderungen in der Betriebsführung der Anlage oder verändertem Bedarf an erwärmtem Trinkwarmwasser.

Für verschiedene Wärmequellen und -übertragersysteme sind die spezifischen Jahresenergieerträge bezogen auf einen Meter Erdwärmesonde oder Energiepfahl bzw. je Quadratmeter Flächenkollektor in Abbildung 21 dargestellt.

*Hinweis:* Es ist anzumerken, dass ein direkter Vergleich über alle Systeme infolge der unterschiedlichen Bezugseinheiten nicht direkt geführt werden kann.

Aus dem Vergleich ist aber abzuleiten, dass

- der größte spezifische Energieentzug bei den Gebäuden 3 und 10 vorliegt. In einem Jahr entziehen der „Energiezaun“ und der Abwasserwärmeübertrager der Quelle mehr als 1.800 kWh/(m·a) bzw. kWh/(m<sup>2</sup>·a).
- die restlichen Systeme im Wesentlichen einen Wärmeentzug zwischen 100 und 700 kWh/(m·a) bzw. kWh/(m<sup>2</sup>·a) aufweisen, wobei die jeweiligen Bauformen und davon abhängigen Einheiten zu beachten sind.

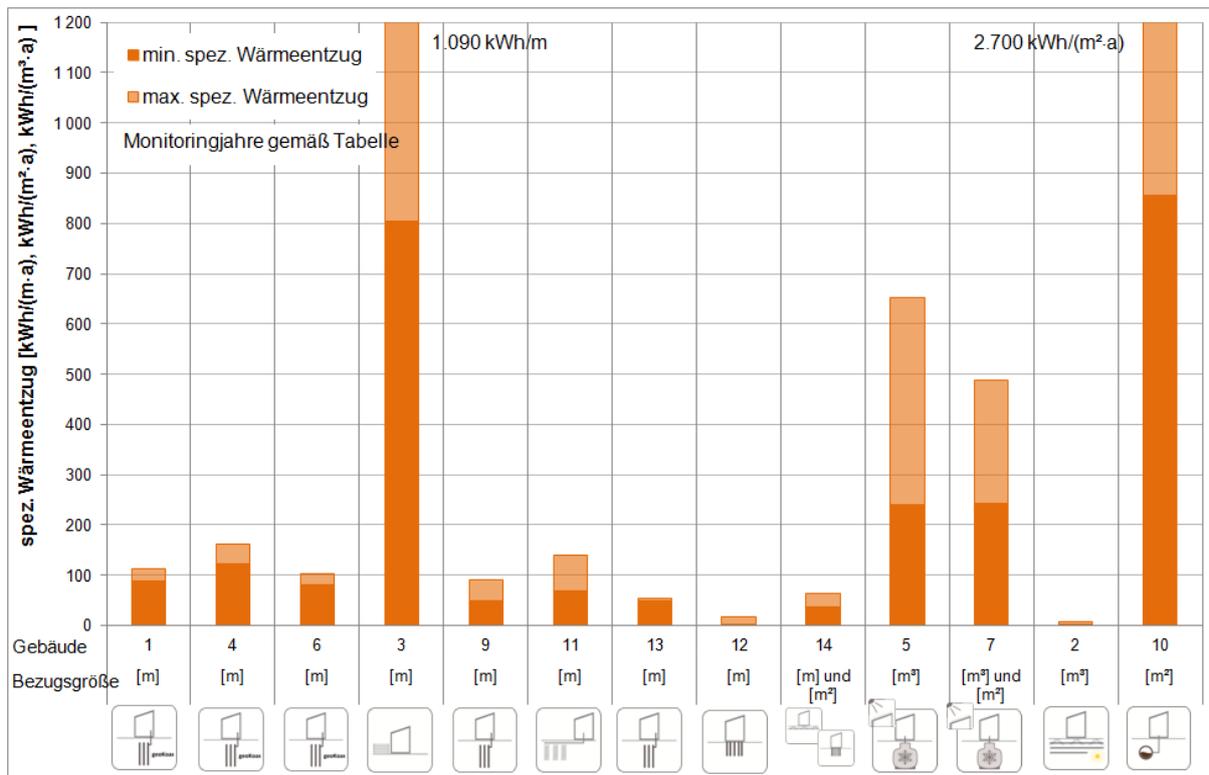


Abbildung 21 Im Rahmen des Monitorings ermittelter spezifischer Wärmeentzug der untersuchten Wärmeübertrager mit zugehörigen Niedertemperaturwärmequellen (nicht witterungsbereinigt), 2015 - 2017

In Abbildung 22 sind neben den aus Messwerten ermittelten maximalen spezifischen Entzugsleistungen die Entzugsleistungsbereiche dargestellt, wie sie in der Literatur oder von Herstellern der Wärmeübertragern angegeben werden. Ein Vergleich dieser Werte zeigt, dass die

gemessenen Entzugsleistungen zum Teil die Literaturwerte oder Herstellerangaben widerspiegeln und teilweise die Literaturwerte sogar übertreffen. Beim Vergleich von Messdaten mit Hersteller- und/oder Literaturangaben ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass letztere zumeist die Spanne der maximal möglichen Entzugsleistungen wiedergeben. Die Angaben basieren dabei jedoch auf unterschiedlichen Randbedingungen wie Bodenkennwerten, Betriebsweisen, usw.

Beim Vergleich der Messwerte mit den Auslegungsdaten aus der Planung kann festgestellt werden, dass die Messungen im Bereich der Planungswerte liegen.

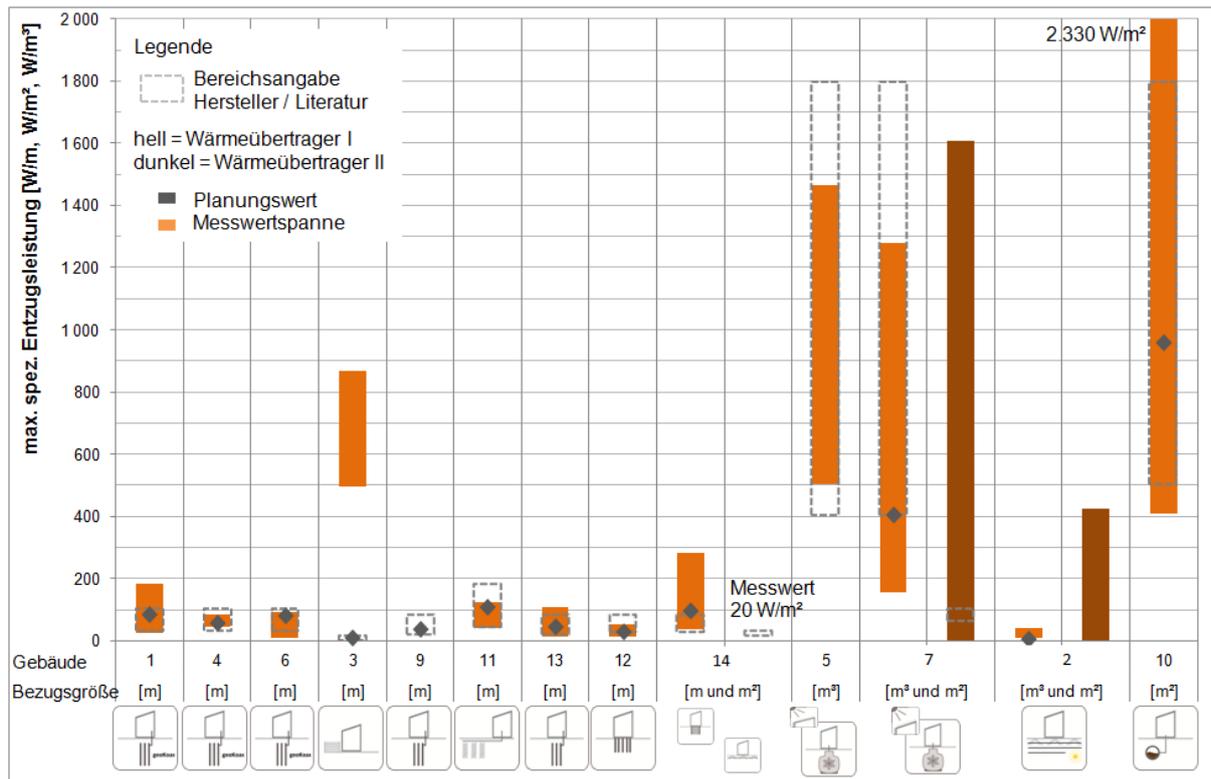


Abbildung 22 Im Rahmen des Monitorings ermittelte spezifische maximale Entzugsleistung der untersuchten Wärmeübertrager mit zugehörigen Niedertemperaturwärmequellen; Planungs-, Hersteller- oder Literaturangaben gegenüber gemessenen Werten

### Anlageneffizienz - Jahresarbeitszahl

Im Rahmen des Forschungsprojektes wird nur die  $JAZ_1$  für die Auswertung der Leistungsfähigkeit berechnet und verglichen. Da der Stromverbrauch der primärseitigen Umwälzpumpe nicht im Rahmen des Monitorings bei allen Gebäuden und Wärmeübertragern erfasst werden kann, wird auf die Analyse der  $JAZ_2$  verzichtet.

In Bezug auf die Nichtwohngebäude wird bei Gebäude 12 „Energiepfähle“ und Gebäude 13 „Erdwärmesonden“ der Seasonal Performance Faktor (SPF) gebildet. Dieser beinhaltet die Wärme- und Kältebereitstellung im Verhältnis zum Strom des Verdichters. Beim Gebäude 5 kann messtechnisch keine Unterteilung zwischen Heiz- und Kühlfall erfolgen.

Auf Grundlage der Auswertungen der Gebäude und Wärmepumpenanlagen kann zusammenfassend festgestellt werden, dass

- der Großteil der Gebäude den Planungen entsprechende Verbräuche aufweist,
- die Wärmepumpenanlagen im Allgemeinen zuverlässig und effizient arbeiten,

- die Jahresarbeitszahl  $JAZ_1$  weitgehend unabhängig vom Wärmeübertragungssystem ist. Anhand der Monitoringergebnisse ist nicht festzustellen, dass z. B. oberflächennahe Systeme gegenüber üblichen Erdwärmesonden zwangsläufig geringere Jahresarbeitszahlen aufzeigen.
- Schwankungen in der JAZ ausschließlich infolge geänderter Betriebsführungen zu beobachten sowie durch die verwendete Wärmepumpentechnologie bedingt sind.
- Luft-Wasser-Wärmepumpen grundsätzlich schlechter abschneiden als Sole-Wasser-Geräte.
- bei den meisten Anlagen Jahresarbeitszahlen  $JAZ_1$  über 3,0 erreicht werden. Für drei Anlagen wurden Jahresarbeitszahlen  $JAZ_1$  über 5,0 ermittelt. Bei drei Gebäuden liegt die Jahresarbeitszahl gemäß den Messungen unter 3,0.

Als Ursachen für die niedrigen Arbeitszahlen konnten bisher u. a.

- der Betriebsführung,
- dem Dauerbetrieb der Anlage,
- zu niedrigen Quelltemperaturen und
- fehlerhafter Messtechnik

zugeordnet werden.

- die Trinkwassererwärmung, die in einigen Wohngebäuden erfolgt, nur einen geringen Einfluss auf die Jahresarbeitszahl nimmt. Eine deutliche Absenkung der Jahresarbeitszahl ist nicht festzustellen. Abminderungen bzw. Änderungen der Arbeitszahl (AZ) aufgrund der Trinkwassererwärmung sind nur im monatlichen Verlauf zu erkennen. Hier nehmen die AZ in den Sommermonaten ab, da der Anteil und somit das Temperaturniveau durch die Trinkwassererwärmung zunimmt.

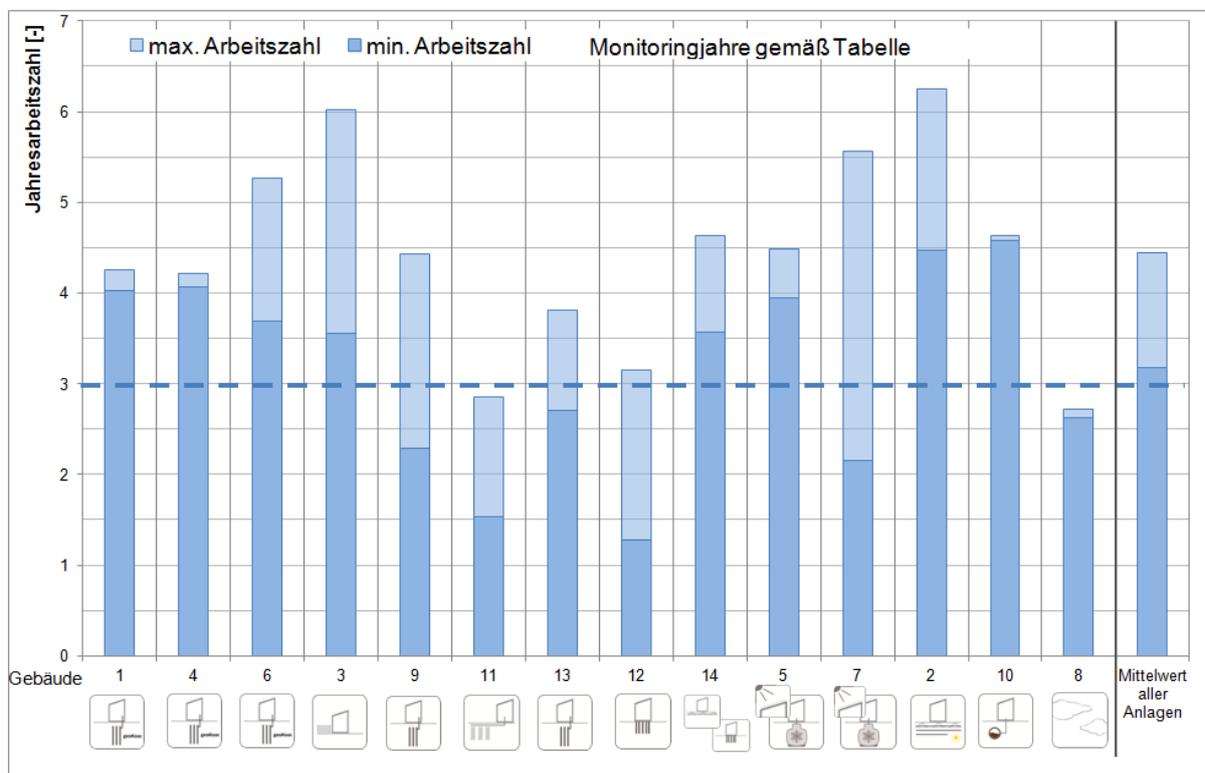


Abbildung 23 Im Rahmen des Monitorings ermittelte Jahresarbeitszahlen ( $JAZ_1$ ) der am Monitoring beteiligten Gebäuden (mit unterschiedlichen Niedertemperaturwärmequellen und –wärmeübertragern)

## Flächenbedarf Niedertemperaturwärmeübertrager

Bei der Ermittlung und Analyse des Flächenbedarfs muss berücksichtigt werden, ob die gewählten Systeme überbaubar sind oder nicht. Überbaubarkeit kann insbesondere bei Neubauten eine interessante Option sein, da einige Systeme unter dem Gebäude installiert werden können und somit kein zusätzlicher Platzbedarf entsteht.

Im Rahmen des Monitorings und der Bewertung der untersuchten Anlagen wird berücksichtigt, dass einige Systeme unterhalb der Gebäude oder auf deren Dach installiert sind (oder werden können) und somit keine Freifläche in Anspruch genommen wurde bzw. würde.

Im Einzelnen handelt es sich um

- Energiepfähle als Gründungspfähle des Gebäudes (zusätzlich Synergie einer zweifachen Nutzung),
- Luftabsorber als Installation auf dem Dach des Gebäudes,
- Abwasserwärmeübertrager im Abwasserkanal, damit kein Flächenbedarf auf dem Grundstück,
- eTank als mögliche Platzierung unterhalb des Gebäudes.

Bei der Flächenermittlung werden Verlege-, Bohrpläne und Dimensionierungen der einzelnen Übertragungssysteme herangezogen. Wenn es sich um zwei Übertragungssysteme innerhalb eines Anlagenkonzeptes handelt, wie z. B. ein Eisspeicher in Verbindung mit einem Luftabsorber (Gebäude 5), wird deren Platzbedarf addiert. In jedem Fall wird der Platzbedarf unter dem Kriterium gekennzeichnet, ob es sich um überbaubare oder nicht überbaubare Systeme handelt.

Abbildung 24 zeigt den Flächenbedarf der untersuchten Niedertemperaturquellsysteme. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die benötigten Flächen auf die thermische Leistung der Wärmepumpe bezogen.

Es ist festzustellen, dass

- Flächensysteme und andere Systeme die oberflächennah installiert werden, wie etwa der eTank, Agrothermie und Spiralsonden, den größten Flächenbedarf aufweisen. Die untersuchten „oberflächennahen“ Systeme haben einen Flächenbedarf von 3 m<sup>2</sup> bis zu 52 m<sup>2</sup> je kW thermische Leistung der Wärmepumpe.
- Für „klassische“ Systeme, wie Erdwärmesonden oder Energiepfähle, im Rahmen des Monitorings ein Flächenbedarf von 1,5 m<sup>2</sup> bis 12 m<sup>2</sup> je kW thermische Leistung der Wärmepumpe ermittelt wurde.
- Für die Niedertemperaturquellsysteme „Eisspeicher“ und „Abwasser“ ein Flächenbedarf von 0,5 m<sup>2</sup> bis 2,5 m<sup>2</sup> je kW thermische Leistung der Wärmepumpe ausgemacht werden kann. Der in Verbindung mit dem Eisspeicher erforderliche Luftabsorber ist hinzuzurechnen.
- Wenn die Überbaubarkeit der Quellsysteme Berücksichtigung findet, einige Niedertemperaturwärmequellen und zugehörige -wärmeübertrager in der Praxis keinen Flächenbedarf aufweisen.

Beim Vergleich der Flächen ist zu beachten, dass aufgrund der vorhandenen Abteuftiefen oder Tiefenbegrenzungen es zu einem größeren Flächenbedarf kommen kann. So sind z. B. die Längen der Energiepfähle nicht identisch, so dass es dazu kommt, dass ggf. weitere Pfähle aktiviert werden müssen und somit mehr Fläche benötigt wird.

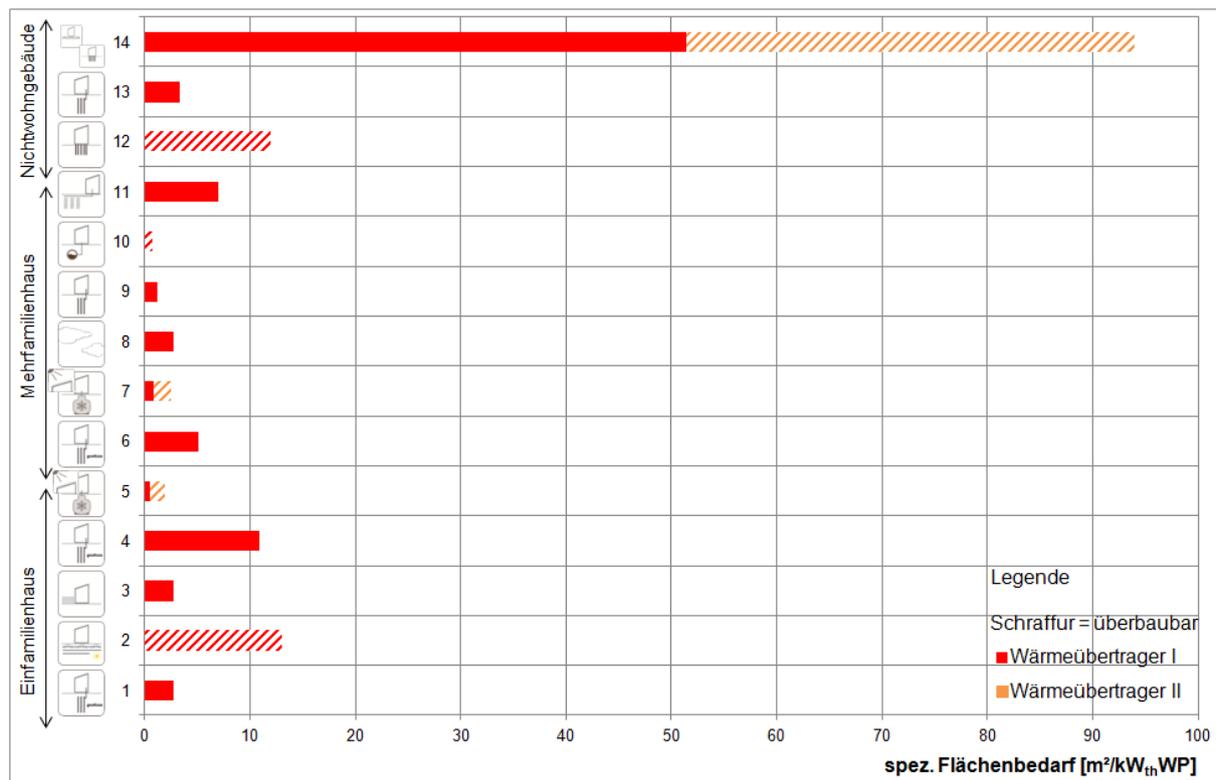


Abbildung 24 Im Rahmen des Monitorings ermittelter spezifischer Flächenbedarf bezogen auf ein kW thermische Leistung der Wärmepumpe

### Investitionskosten Niedertemperaturwärmeübertrager

Zur Ermittlung der Investitionskosten werden Leistungsverzeichnisse, Angebote sowie Abrechnungen der Systeme zu den jeweiligen Bauvorhaben herangezogen. Neben der Wärmepumpe werden die Investitionen der Wärmeübertragersysteme inkl. allen zugehörigen Materials, des Einbaus und/oder der Verlegung abgebildet. Die relevanten Kosten liegen nicht für alle Gebäude vor und werden an den offenen Stellen als Annahmen ausgewiesen.

Wie beim spezifischen Flächenbedarf wird auch bei den Investitionskosten der Vergleich der Systeme in Bezug auf die thermische Leistung der Wärmepumpe vorgenommen, siehe Abbildung 25. Bezogen auf die thermische Leistung der Wärmepumpe ergeben sich als Richtgrößen für die spezifischen Netto-Investitionskosten etwa 1.000 €/kW<sub>th</sub> bis 4.200 €/kW<sub>th</sub>. Die Investitionen für Erdwärmesonden, dass zurzeit gängigste System, belaufen sich auf etwa 1.500 €/kW<sub>th</sub> bis 2.000 € je kW<sub>th</sub>.

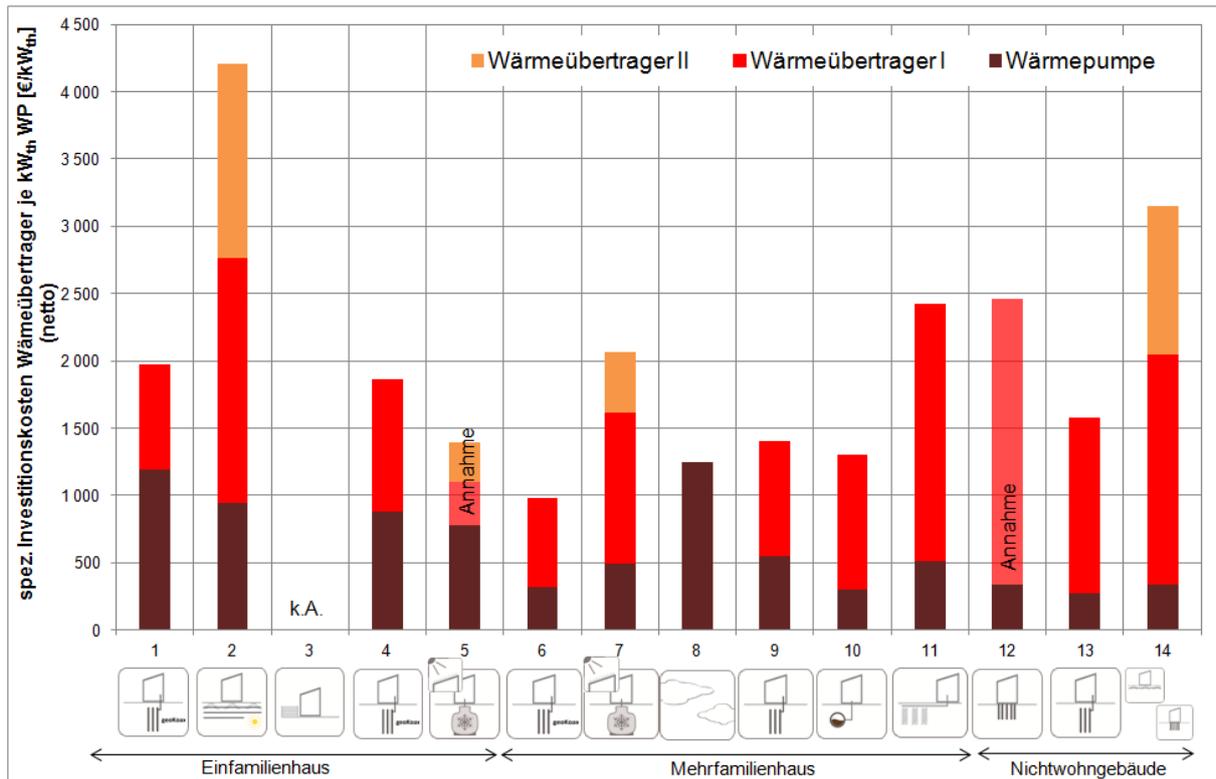


Abbildung 25 Im Rahmen des Monitorings ermittelte spezifische Netto-Investitionskosten bezogen auf ein kW thermische Leistung der Wärmepumpe

## Ökologische Auswertung

Für die ökologische Bewertung der Gebäude und deren Anlagenbetrieb werden innerhalb des Projektes zwei Bewertungskriterien näher untersucht. Für die betrachteten Gebäude wird zum einen der Primärenergieverbrauch  $Q_p$  sowie die ausgestoßene Menge des Treibhausgases Kohlendioxid ( $CO_2$ ) pro Jahr ermittelt.

Als Systemgrenze für die Ermittlung des Primärenergieverbrauchs wird der Anlagenbetrieb der Wärmepumpe inklusive primärseitiger Umwälzpumpe definiert. Regenerative Energieerzeugungssysteme im Gebäude z. B. Photovoltaik-Anlagen zur Eigenstromversorgung werden nicht berücksichtigt und gegengerechnet. Die Stromverbrauchsmengen werden aus den aufgezeichneten Zählerständen ermittelt. Die Berechnungen erfolgen auf nicht witterungsbereinigten Verbrauchswerten.

Zur Berechnung des Primärenergieverbrauchs werden die derzeit gültigen Faktoren nach DIN V 4701-10 für Strom von 1,8 angewendet. Als einheitliche Bezugsfläche für die Auswertung der einzelnen Gebäude wird die Nettogrundfläche ( $NGF$ ) zugrunde gelegt. Unterschiedliche Nutzungsprofile und Randbedingungen der Gebäude und Anlagen werden nicht berücksichtigt. So können z. B. die Betriebs- und Nutzungszeiten variieren.

Abbildung 26 zeigt die spezifischen Jahres-Primärenergieverbrauchswerte der Vergleichsgebäude. Die Spanne der Kennwerte reicht von  $< 10$  bis  $> 100 \text{ kWh}_{PE}/(\text{m}^2_{NGF} \cdot \text{a})$ . Der Mittelwert aller aufgeführten Gebäude liegt für den spezifischen Primärenergieverbrauch bei  $\sim 30 \text{ kWh}_{PE}/(\text{m}^2_{NGF} \cdot \text{a})$ .

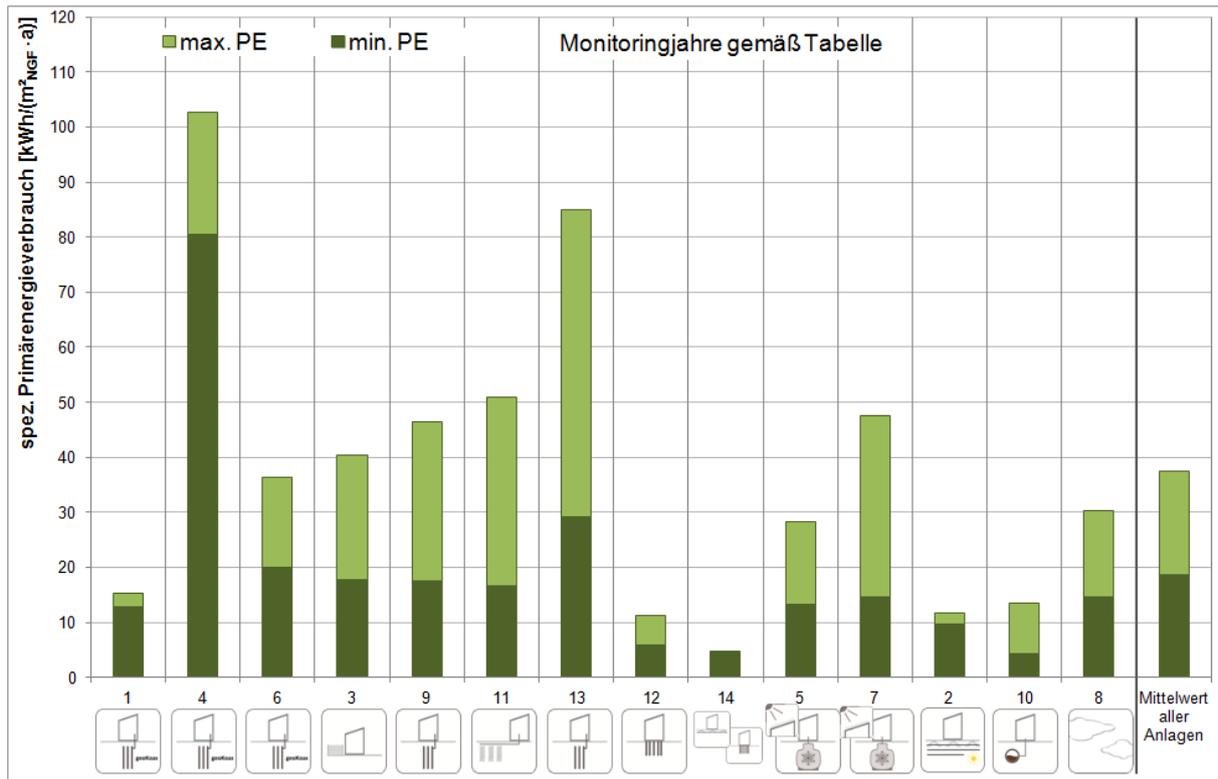


Abbildung 26 Im Rahmen des Monitorings ermittelte spezifische Primärenergiebedarfe durch den Betrieb der Wärmepumpen (nur Wärmepumpenstromverbrauch)

Als Indikator für die Umweltbelastung wird der Stromverbrauch in das CO<sub>2</sub>-Äquivalent umgerechnet. Die Kohlendioxid-Emissionen werden mit Hilfe von CO<sub>2</sub>-Äquivalentkennzahlen und dem Endenergieverbrauch ermittelt. Damit werden auch die anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen für die vorgelagerten Prozessketten wie beispielsweise die Förderung, die Verarbeitung und der Transport erfasst. Für die Berechnungen wird ein Treibhausgase CO<sub>2</sub>-Äquivalent für Strom von 527 g/kWh<sub>EE</sub> angesetzt. Für den Vergleichsfall werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Autos für 100 km Fahrstrecke herangezogen.

Die für das Projekt ermittelten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind im Wesentlichen abhängig von der Anlagen- und Betriebseffizienz. Abbildung 27 zeigt die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Vergleichsgebäude. Die Spanne der Kennwerte reicht von < 2 bis 30 kg CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>·a). Der Mittelwert aller aufgeführten Gebäude liegt für die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei ~8 CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>·a).

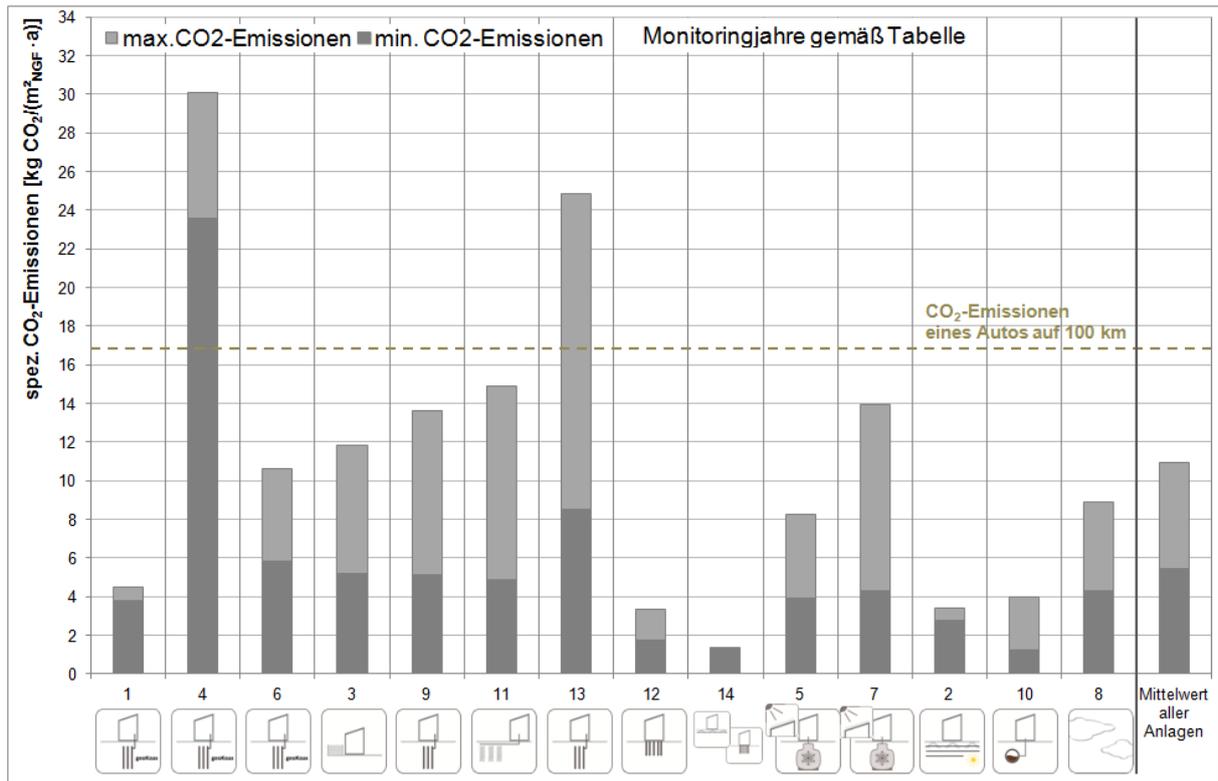


Abbildung 27 Im Rahmen des Monitorings ermittelte spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Betrieb der Wärmepumpen (nur Wärmepumpenstromverbrauch)

## 8 WETTERDATEN

Im Zusammenhang mit numerischen Simulationen zum Wärmebedarf von Gebäuden repräsentieren Wetterdaten als eine wichtige Bezugsgröße wesentliche Rand- und Referenzbedingungen für das thermische Verhalten der betreffenden Bauwerke. Sind die simulierten Gebäude zudem mit Haustechnik ausgestattet, die in direkter Verbindung mit den örtlichen Witterungsbedingungen steht, z. B. thermische oder photovoltaische Solaranlagen oder auch Wärmepumpen, die als Niedertemperaturwärmequelle die Umgebungsluft, solare Einstrahlung oder das umliegende Erdreich nutzen, haben die Wetterdaten einen entsprechend großen bis entscheidenden Einfluss auf die Energieströme des Gesamtsystems.

Zur Bearbeitung klimaabhängiger Fragestellungen ist die Bundesrepublik Deutschland in 15 Klimaregionen eingeteilt, siehe Abbildung 28. Die typischen Klimaverhältnisse jeder Klimaregion werden durch zugehörige Repräsentanzstationen mit eindeutig definierten Standortdaten repräsentiert, z. B. Potsdam. Für thermische Gebäudesimulationen, bei denen die Einflüsse des Gebäudestandorts auf das thermische Verhalten des Bauwerks berücksichtigt werden sollen, werden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) seit 1986 sogenannte Testreferenzjahre für die unterschiedlichen Klimaregionen zur Verfügung gestellt.

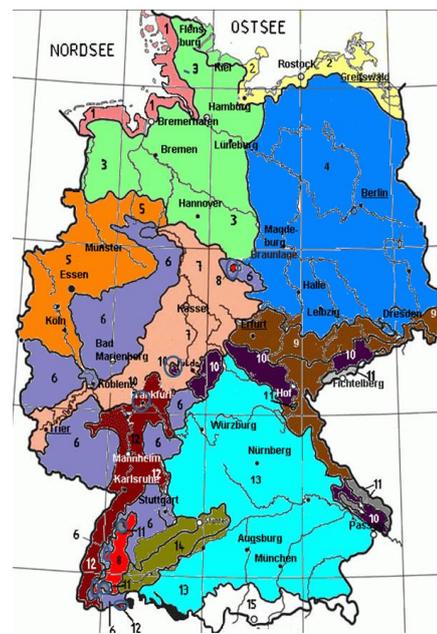


Abbildung 28 Karten der Bundesrepublik Deutschland (links) und Referenzklimaregionen in Deutschland (rechts)

Zur verbindlichen Definition und Festlegung der klimatischen Bedingungen und Wetterdaten für die Simulationen und zur Verwendung im Vordimensionierungsprogramm WP<sub>SOURCE</sub> wurden in einem ersten Ansatz die vom Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die 15 für Deutschland definierten Klimaregionen herausgegebenen Testreferenzjahre gewählt. Die Verwendung von Testreferenzjahren bei klima- und wetterabhängigen Fragestellungen ist in der Wissenschaft und Forschung, aber auch im Bereich der Normung und Wirtschaft, ein über Deutschland hinaus übliches Vorgehen.

Im Rahmen der Vorabsimulationen zur Erstellung einer Wetterdatenbank für das Programm WP<sub>SOURCE</sub> wurde deutlich, dass die zunächst als Grundlage gewählten Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die Testreferenzjahre 2011 (Datenbezeichnung TRY2010\_xx), infolge von Inkonsistenzen bei den Strahlungsdaten für das Projekt future:heatpump nicht uneingeschränkt brauchbar sind. Beispielsweise kommt es durch die Vermischung von Stundenmittelwerten und

Momentanwerten sowie uneinheitlichen Bezugszeiten der Wetterdaten (MEZ und/oder WOZ), zu physikalisch unsinnigen und vielfach widersprüchlichen Strahlungsdaten. Bei dem zur Verwendung der Simulationen verwendeten Programm TRNSYS (**TRaNsient SYstem Simulation Program**) [7] sind uneinheitliche Bezugszeiten kaum zu berücksichtigen. Die diesbezüglichen Aussagen im zugehörigen Handbuch des DWD sind zudem nicht eindeutig und unklar formuliert. Darüber hinaus sind die Wetterdaten gemäß Handbuch (Ausgabe September 2014) für „...die Berechnung solarer Gewinne mittels solarthermischer Kollektorsimulationen“ nicht geeignet. Diese für eine Nutzung der Wetterdaten des DWD entscheidenden Zusammenhänge wurden auch im Rahmen des Forschungsprojektes *DEZENTRAL - Dezentrale Einspeisung in Nah- und Fernwärmesysteme unter besonderer Berücksichtigung der Solarthermie* (FKZ 03ET1039C) vom Büro Solites festgestellt und im zugehörigen Forschungsbericht dokumentiert.

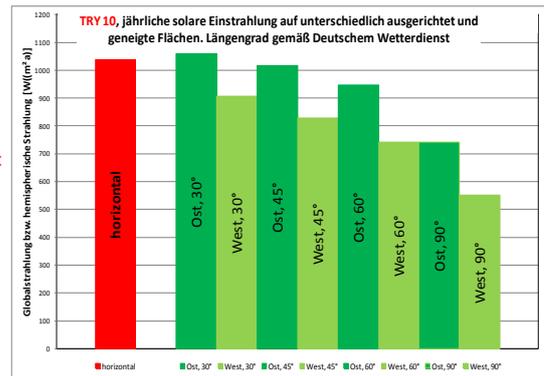
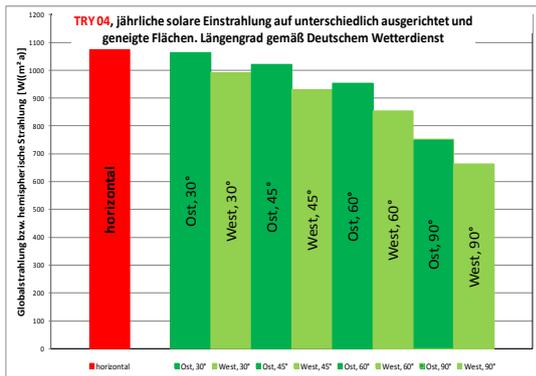
Für die Fortführung des Projektes future:heatpump ergab sich daraus die Notwendigkeit, von den vorgesehenen Testreferenzjahren des Deutschen Wetterdienstes auf eine alternative Datenbasis zu wechseln. Diese Datenbasis sollte bezüglich Reputation und wissenschaftlicher Akzeptanz den Testreferenzjahren des DWD nicht nachsteht. Da die grundsätzliche Aufteilung Deutschlands in 15 Klimaregionen sowie die zugehörigen Repräsentanzstationen beibehalten werden sollten, wurden in einem neuen Ansatz für die jeweiligen Repräsentanzstationen Testreferenzjahre mittels *Meteonorm*® 7.1.10 [8] generiert und diese zur direkten Übernahme der Daten in die Simulationen in das Format der DWD-Testreferenzjahre konvertiert. Zur Generierung von Wetterdaten gilt das Programm *Meteonorm*® im Rahmen von Forschungsprojekten, aber auch im Bereich Normung und bei der Erstellung von Richtlinien sowie für kommerzielle Anwendungen, als anerkannter Standard. Die meteorologischen Größen und der Aufbau der *neuen Testreferenzjahre* orientieren sich an den Testreferenzjahren des Deutschen Wetterdienstes.

Die mittels *Meteonorm*® für die Repräsentanzstationen erstellten Testreferenzjahre zeigen im Bereich der Strahlungsdaten nur marginale Unterschiede zu den fehlerhaften Testreferenzjahren des DWD, siehe Abbildung 29. Die entscheidende Ursache ist, dass *Meteonorm*® auf die Daten des Deutschen Wetterdienstes zurückgreift.

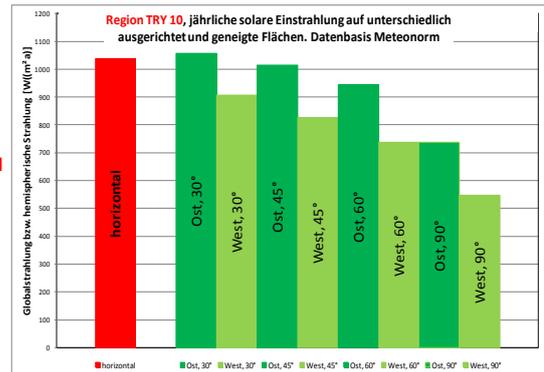
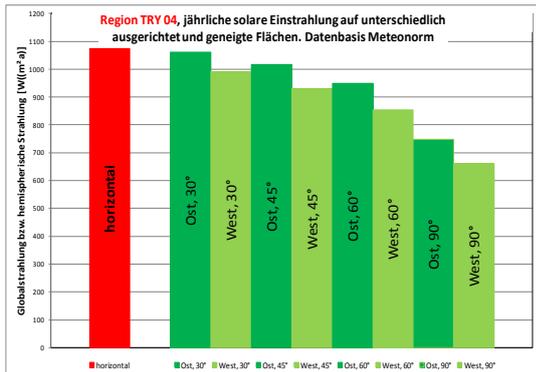
Aus diesem Grund wurden in einem weiteren Ansatz mittels *Meteonorm*® Wetterdaten für die geographischen Standorte der Repräsentanzstationen der 15 Testreferenzjahr-Klimaregionen des Deutschen Wetterdienstes generiert und anstelle der Testreferenzjahre den Klimaregionen als Referenzwetter zugewiesen. Die Strahlungssummen, Temperaturverläufe und Jahresmittelwert der Außentemperaturen dieser Wetterdaten entsprechen in etwa denen der *Testreferenzjahre 2010* des Deutschen Wetterdienstes. Die Inkonsistenzen in den Strahlungsdaten der Testreferenzjahre bestehen nun nicht mehr. Die Solarstrahlung und Strahlungsverteilung können als realistisch angesehen werden (Abbildung 30). Im Projekt future:heatpump werden die für die geographischen Standorte der 15 Repräsentanzstationen des DWD erzeugten Wetterdaten als *Referenzklimaregionen* bezeichnet (Tabelle 7).

Aus den stündlich vorliegenden Rohdaten der meteorologischen Größen wurden für die Verwendung in  $WP_{SOURCE}$  Monatsmittelwerte sowie Minimal- und Maximalwerte berechnet. Diese Daten sind in dem Vordimensionierungsprogramm hinterlegt.

Die mittels *Meteonorm*® generierten Wetterdaten zu den 15 Klimaregionen werden bei den Simulationen der unterschiedlichen Gebäude und Niedertemperaturwärmequellen mit den jeweiligen Wärmeübertragern sowie zur weiteren Nutzung im Vorauslegungsprogramm  $WP_{SOURCE}$  eingesetzt.

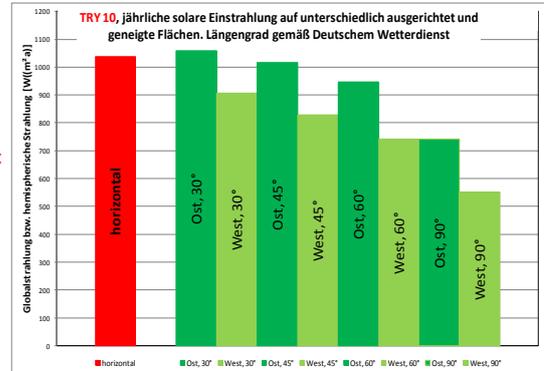
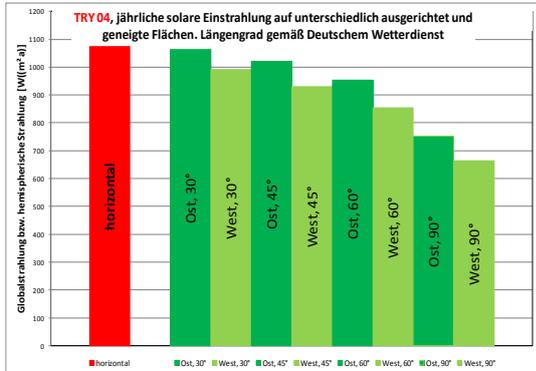


TRY  
 Deutscher  
 Wetterdienst

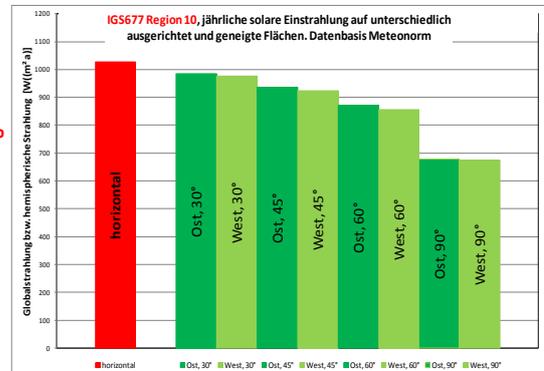
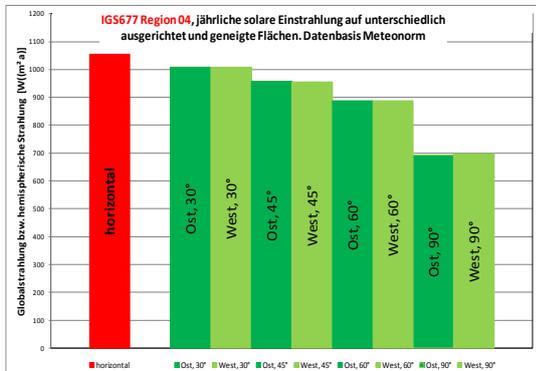


TRY  
 METEONORM

Abbildung 29 Globalstrahlung der Testreferenzjahre TRY 04 und TRY 10 des Deutschen Wetterdienstes (oben) und Globalstrahlung der mittels Meteonorm® für dieselben Klimaregionen generierten Testreferenzjahre (unten)



TRY  
 Deutscher  
 Wetterdienst



future:heatpump  
 Klimaregionen  
 (METEONORM)

Abbildung 30 Globalstrahlung der Testreferenzjahre TRY 04 und TRY 10 des Deutschen Wetterdienstes (oben) und Globalstrahlung der mittels Meteonorm® für die Repräsentanzstationen generierten Wetterdaten, in future:heatpump gekennzeichnet als Referenzklimaregionen (unten)

Tabelle 7 In future:heatpump und WP<sub>SOURCE</sub> umgesetzte Referenzklimaregionen und Repräsentanzstationen

future:heatpump und WP <sub>SOURCE</sub> Referenz- klimaregion	Repräsentanzstation	substituiertes Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes (2010) (TRY)	
01	Bremerhaven	01	Nordseeküste, Nordseeinseln, ...
02	Rostock-Warnemünde	02	Ostseeküste, Ostseeinseln, ...
03	Hamburg-Fuhlsbüttel	03	Nordwestdeutsches Tiefland, ...
04	Potsdam	04	Nordostdeutsches Tiefland, ...
05	Essen	05	Niederrheinisch-westfälische Bucht und Emsland, ...
06	Bad Marienberg	06	Nördl. und westl. Mittelgebirge, Randgebiete, ...
07	Kassel	07	Nördl. und westl. Mittelgebirge, zentrale Bereiche, ...
08	Braunlage	08	Oberharz und Schwarzwald (mittlere Lagen), ...
09	Chemnitz	09	Thüringer Becken und Sächsisches Hügelland, ...
10	Hof (Hof-Hohensaas)	10	Südöstliche Mittelgebirge bis 1000 m, ...
11	Fichtelberg	11	Erzgebirge, Böhmer- und Schwarzwald über 1000 m, ...
12	Mannheim	12	Oberrheingraben und unteres Neckartal, ...
13	Mühldorf-am-Inn	13	Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland, ...
14	Stötten	14	Schwäbische Alb und Baar
15	Garmisch- Partenkirchen	15	Alpenrand und -täler, Alpenvorland, ...

Im Rahmen von Systemsimulationen werden die mittels Meteornorm<sup>®</sup> generierten Wetterdaten der Referenzklimaregionen in unterschiedlicher Weise verwendet. Die nachfolgend aufgeführten Punkte werden im Allgemeinen in Verbindung mit Gebäudesimulationen erarbeitet.

- Datengrundlage zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Klima- und Witterungsbedingungen innerhalb Deutschlands.
- Berechnungsmöglichkeit und Grundlage für Vergleiche von Zusammenhängen und Ergebnissen für unterschiedliche Systeme an beliebigen Standorten in Deutschland.
- Erzeugung einer in WP<sub>SOURCE</sub> implementierten Wetterdatenbank mit Einstrahlungswerten für unterschiedlich ausgerichtete und geneigte Flächen (z. B. für solarthermische Anwendungen und Photovoltaikanlagen).
- Generierung idealisierter Verläufe der Umgebungstemperatur.
- Ermittlung der Heiz- und Kühlgrenztemperaturen für die verschiedenen Gebäude- und Wärmedämmstandards.
- Berechnung der Heiz- und Kühlgradtage.
- Ermittlung des Raumheiz- und Raumkühlaufwandes für die betrachteten Gebäude.
- Identifikation von standortspezifischen Besonderheiten, Kennwerten und thermodynamischen Zusammenhängen, auch des Erdreichs
- Berechnung von Regenerationsmöglichkeiten von Niedertemperaturwärmequellen durch direkte meteorologische Einflüsse, wie die Umgebungstemperatur und solare Einstrahlung oder aktive Einrichtungen, wie thermische Sonnenkollektoren oder Solar- und Luftabsorber.
- Berechnung instantaner Nutzungspotentiale von Energie aus meteorologischen Bedingungen, z. B. Erträge von Energiezäunen oder Solar- und Luftabsorbern sowie der direkten Nutzung der Umgebungsluft.

Auch im Zusammenhang mit der Entwicklung und Anwendung des Vordimensionierungsprogramms WP<sub>SOURCE</sub> bilden die Wetterdaten der Referenzklimaregionen über ihre Nutzung im Rahmen der Systemsimulationen hinaus entscheidende Berechnungsgrundlagen. Beispiele sind

- die statistische Auswertung und Dokumentation der Wetterdaten der Referenzklimaregionen als Grundlage der Programmausgaben durch Algorithmen innerhalb von WP<sub>SOURCE</sub> und
- die Erstellung eines Formel- und Kennwertesystems zu standortspezifischen Berechnungen in WP<sub>SOURCE</sub>, z. B. zur Abschätzung von standortbezogenen (*ungestörten*) *Erdreichtemperaturen* in Abhängigkeit von der jeweiligen Bodenart.

Im Zusammenhang mit der Erstellung von Referenzwetterdaten mittels Meteonorm® wurden sämtliche von dem Programm angebotenen Optionen und Grundlagen zur Generierung von Wetterdaten geprüft. Einen Vergleich von generierten Daten mit den entsprechenden Werten der verworfenen Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes zeigt exemplarisch für die Klimaregion 4, Repräsentanzstation Potsdam und für die Klimaregion 10, Repräsentanzstation Hof (Hof-Hohensaas), die Abbildung 31. Grundsätzlich bietet Meteonorm® nicht für jeden Standort die gleichen Alternativen. So stehen für den Standort Potsdam (Region 04) vier und für den Standort Hof-Hohensaas (Region 10) lediglich zwei Wetterdatensätze mit unterschiedlichen Grundlagen zur Verfügung. Die Farbe Blau repräsentiert die im Rahmen des Projektes verwendeten Referenzwetterdaten. Die blauen Säulen (IGS677\_Region\_xx) zeigen die Einstrahlung auf eine horizontale Ebene in kWh/m<sup>2</sup> und die blauen Linien (Tamb\_IGS677) die Umgebungstemperatur (Außentemperatur) in °C.

In Tabelle 8 sind die Abweichungen der aus den mittels Meteonorm® generierten Wetterdaten berechneten jährlichen Globalstrahlungen und der Jahresmittel der Umgebungstemperaturen bezogen auf die entsprechenden Werte der verworfenen Testreferenzjahre für die betrachteten Klimaregionen zusammengestellt. Die fett markierten Klimaregionen (TRY 04 und TRY 10) stellen typische Klimabedingungen in Deutschland dar. Mit Ausnahme der Referenzklimaregion 11 (TRY 11), Repräsentanzstation Fichtelberg, kann das Klima der Bundesrepublik im Wesentlichen mit den Klimaregionen TRY 04 und TRY 10 repräsentiert werden.

**Tabelle 8** Abweichungen der Referenzwetterdaten (Meteonorm®) bezogen auf die ersetzten Testreferenzjahre (TRY) des Deutschen Wetterdienstes

Deutscher Wetterdienst	Repräsentanzstation	Referenzwetterdaten (Meteonorm®)	
		jährliche Globalstrahlung [%]	Jahresmittel der Umgebungstemperatur [°C]
TRY 01	Bremerhaven	1,48	-0,19
TRY 02	Rostock-Warnemünde	-2,03	0,32
TRY 03	Hamburg-Fuhlsbüttel	5,62	0,32
<b>TRY 04</b>	<b>Potsdam</b>	<b>-1,75</b>	<b>0,34</b>
TRY 05	Essen	1,19	0,59
TRY 06	Bad Marienberg	0,15	0,82
TRY 07	Kassel	-1,59	0,66
TRY 08	Braunlage	-2,30	1,83
TRY 09	Chemnitz	6,74	0,64
<b>TRY 10</b>	<b>Hof (Hof-Hohensaas)</b>	<b>1,18</b>	<b>0,40</b>
TRY 11	Fichtelberg	4,80	0,27
TRY 12	Mannheim	-1,44	-0,24
TRY 13	Mühdorf-am-Inn	9,22	0,79
TRY 14	Stötten	4,56	0,55
TRY 15	Garmisch-Partenkirchen	3,83	1,22

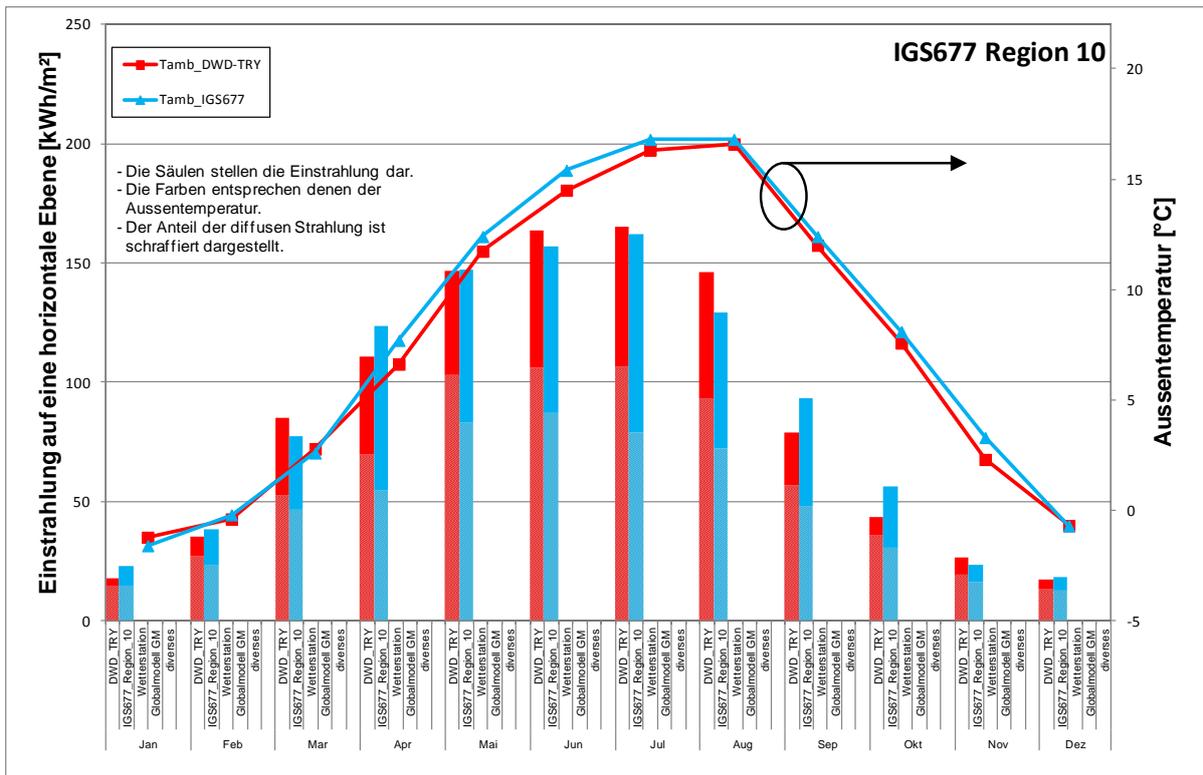
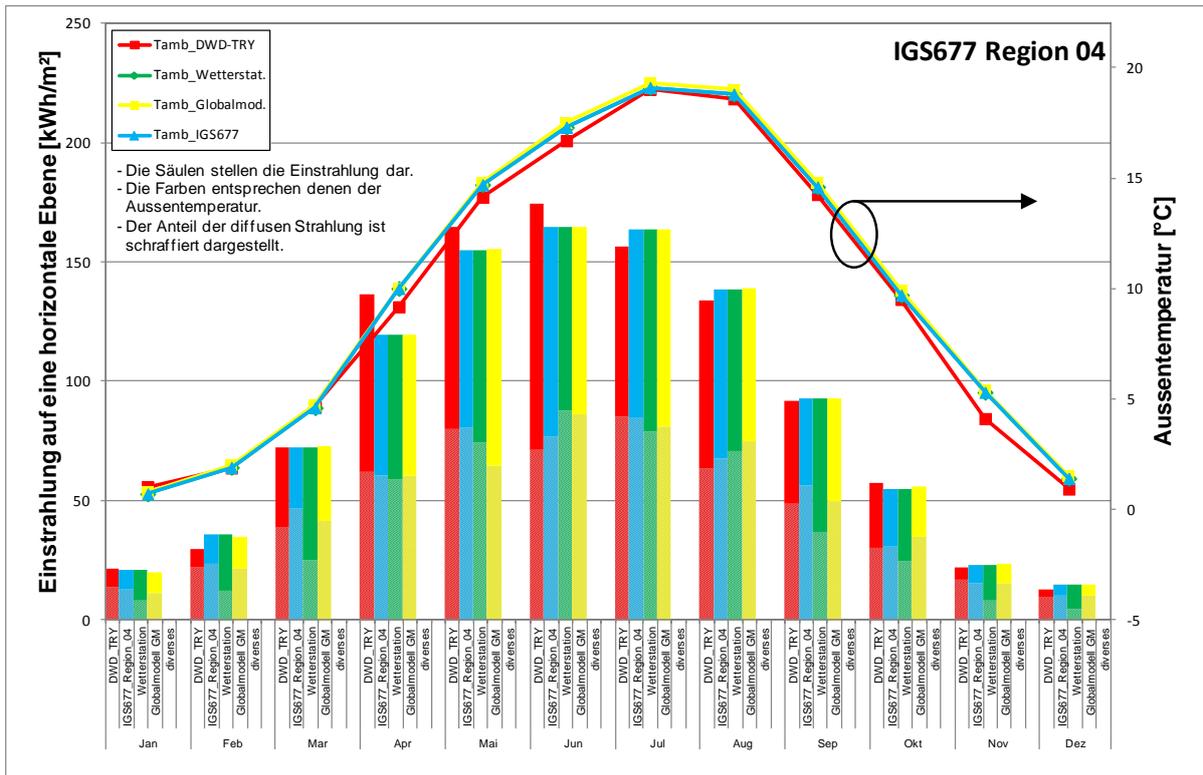


Abbildung 31 Monatssummen der solaren Einstrahlung auf eine horizontale Ebene und Mittelwerte der Außentemperaturen von mittels Meteonorm® in Stundenwerten generierten Wetterdaten; Klimaregionen 04 (oben) und 10 (unten)

## 9 SIMULATIONEN (AP4)

Im Rahmen der Systemsimulationen werden numerische Berechnungen von Energieversorgungssystemen mit Wärmepumpen und Niedertemperaturwärmequellen sowie verschiedenen dafür vorgesehene Niedertemperaturwärmeübertragern mit unterschiedlichen Gebäudetypologien durchgeführt. Die Simulationen erfolgen über die Modellierung und Verknüpfung wesentlicher Anlagenkomponenten und die Abbildung der Gebäude in einem Mehrzonenmodell.

Mit Hilfe der Simulationsumgebung TRNSYS [7] werden die drei Gebäudetypen Ein- und Mehrfamilienhaus sowie Bürogebäude in einem integralen Gebäude- und Anlagenmodell mit ihren bauwerks- und komponentenspezifischen Konfigurationen abgebildet. Die Räumlichkeiten der Gebäude werden entsprechend ihrer thermischen Randbedingungen und Konditionen in sog. Zonen zusammengefasst und entsprechend ihrer bauphysikalischen Eigenschaften in das Modell eingepflegt. Wichtige Randbedingungen zur Heizung, Kühlung und Lüftung sowie internen Lasten etc. werden in den Gebäudemodellen oder den Spezifikationen der Haustechnik hinterlegt.

Im Rahmen der Simulationen werden sechs über Rohrleitungen mit einer Wärmepumpe verbundene Wärmeübertragersysteme detailliert untersucht. Für die simulationstechnischen und auch für andere theoretische Untersuchungen werden die unterschiedlichen Gebäude mit einer auf den jeweiligen Bedarf angepassten Wärmepumpe ausgestattet und mit den verschiedenen Wärmequellen/Wärmeübertragersystemen simuliert. Um den Einfluss des Systems aus Niedertemperaturwärmequelle und -wärmeübertrager auf die Gesamtanlage isoliert bewerten zu können, bleiben die jeweiligen Gebäude und die gesamte Anlagentechnik -mit Ausnahme der untersuchten Wärmequellen/Wärmeübertragersysteme und ihrer Dimensionen unverändert. Neben den Dimensionen der Bauteile werden bei erdgekoppelten Systemen auch die thermodynamischen Eigenschaften des die Wärmeübertrager umgebenden Erdreichs in einem für deutsche Bodenverhältnisse üblichen Umfang variiert.

Zu Beginn der umfangreichen Simulationen werden bezüglich der Anlagenkonfigurationen grundlegende Festlegungen getroffen, die nach Möglichkeit auch nach einer Änderung der Untersuchungsschwerpunkt oder Erweiterung der Projektinhalte Gültigkeit behalten. Im Einzelnen sind dies:

- Festlegung der grundsätzlichen Anlagenkonfiguration(en)
- Definition der innerhalb der Simulationen veränderlichen Komponenten, variierbarer Parameter und Variablen sowie der Betrachtungsbereiche und -grenzen
- Festlegung der Ziel- und Bewertungsgrößen sowie Ausgaben zur Weiterverwendung im Vordimensionierungsprogramm WP<sub>SOURCE</sub>
- Festlegung der Validitätskriterien zur Ermittlung der Zielgrößen
- Definition der Rand- und Referenzbedingungen sowie der Rahmendaten zur Beschreibung der technischen Komponenten
- Wahl geeigneter Rechenmodelle für die Komponenten und Grundeinstellung der Simulationsumgebung
- Festlegung eine Methodik zur Plausibilisierung der Ergebnisse

### 9.1 Simulationsprogramm TRNSYS 17

Die simulationstechnischen Modellierungen und die Durchführung der Simulationen werden in der Programmumgebung von TRNSYS, Programmversion 17 für Microsoft Windows realisiert. TRNSYS wurde an der Universität von Wisconsin am Solar Energy Laboratory zunächst für die dynamische Simulation von aktiven Solarsystemen entwickelt und ist seit 1975 kommerziell verfügbar [7]. Seit seiner Einführung wird das Programmpaket stetig um Rechenmodelle zur Simulation von

Anlagenkomponenten aus der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik sowie weiteren Komponenten aus dem Bereich der Energietechnik (z. B. Brennstoffzellen, Photovoltaik und Windkraft) erweitert. Auch das im Programmpaket enthaltene detaillierte Gebäudemodell (Type 56) wird regelmäßig aktualisiert und neuen (bauphysikalischen) Erkenntnissen angepasst. Das in der Programmiersprache Fortran erstellte Simulationsprogramm ist ein anerkanntes und vor allem im wissenschaftlichen Bereich verbreitetes Instrument zur dynamischen Simulation von Energieversorgungssystemen für Gebäude und industrielle Anwendungen. Aus dieser Quelle speist sich die beträchtliche Zahl sogenannter „Non-Standard-Types“, die neben den im Programmumfang enthaltenen Modellen (Types) spezielle Rechenmodelle darstellen, die zur Simulation nicht im Programmumfang von TRNSYS enthaltener Komponenten, als Routinen zur Anpassung der Simulationen an individuelle Nutzervorgaben oder als Alternative zu Standardmodellen – meist mit höherem Detaillierungsgrad – Verwendung finden.

Abbildung 32 stellt beispielhaft eines der umgesetzten Decks in TRNSYS mit allen angewendeten Types und Equations, etc. dar.

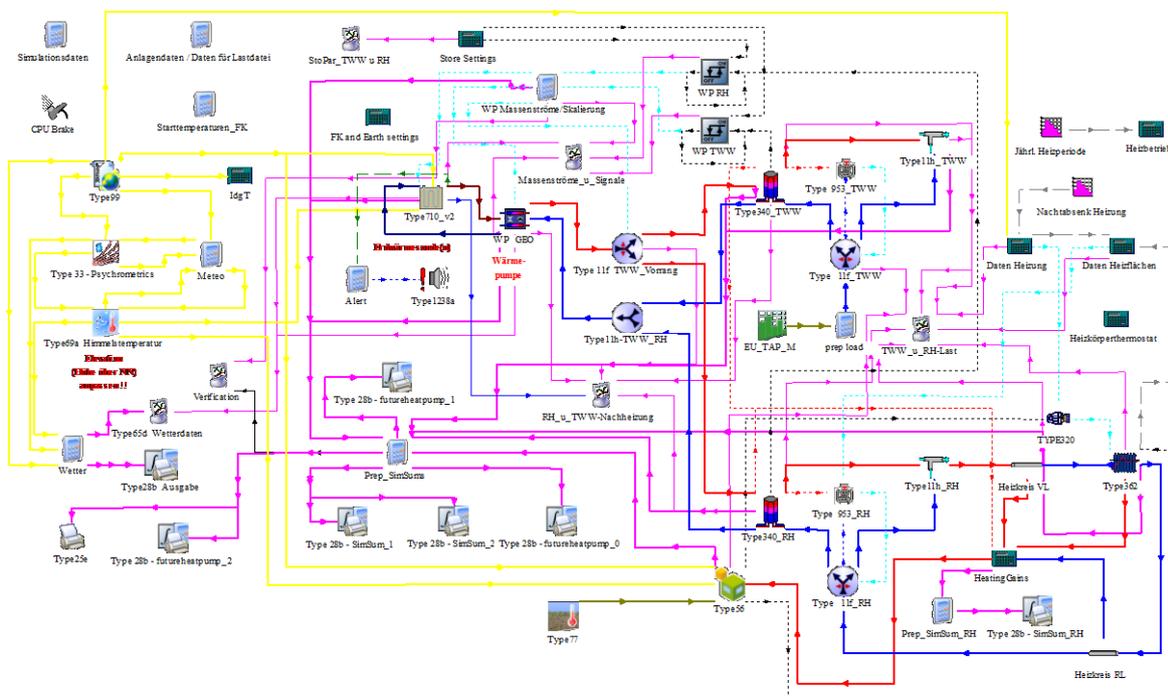


Abbildung 32 Graphische Darstellung einer im Simulation Studio erstellten Anlagenkonfiguration mit Flächenkollektor und Wärmepumpe zur Erzeugung einer TRNSYS-Steuerdatei

## 9.2 Gebäude- und Anlagenmodell

Für die Systemsimulationen und zur Bereitstellung der für das Vorauslegungsprogramm benötigten Daten wurden drei Mustergebäude definiert, die bezüglich einer Wärme- und Kälteversorgung mittels Wärmepumpe für Deutschland repräsentative Gebäudetypen darstellen.

- Einfamilienhaus,
- Mehrfamilienhaus und
- Nichtwohngebäude (Bürogebäude)

Die Orientierung der Gebäude ist so gewählt, dass beim Einfamilienhaus das Satteldach (Dachneigung gegen die Horizontale 30°) und beim Mehrfamilienhaus sowie beim Bürogebäude die Flachdachflächen problemlos mit thermischen Sonnenkollektoren oder Photovoltaikanlagen

ausgerüstet werden können. Zu diesem Zweck ist das Einfamilienhaus ebenso nach Süden ausgerichtet (der Giebel verläuft in Ost-West-Richtung) wie die längere Gebäudefront des Mehrfamilienhauses und des Bürogebäudes.

In Bezug auf die gewählten Kubaturen spiegeln die Gebäude in Deutschland übliche Bauweisen wider und ist in allen Varianten unverändert beibehalten. Anlagentechnisch werden die Wohngebäude mit Raumwärme und erwärmtem Trinkwasser, das Bürogebäude mit Raumwärme sowie Serverkälte versorgt. Zur Berücksichtigung der in Deutschland vorzufindenden Wärmedämmstandards, wurden die Bauwerke mit unterschiedlichen Wärmeschutzmaßnahmen ausgestattet. Einzelne Anpassungen wurden hinsichtlich der Gebäudeundichtigkeiten (Infiltration) und der Lüftung in Abhängigkeit des benötigten Heizenergiebedarfs vorgenommen.

Mit der Wahl der thermischen Gebäudestandards werden die wesentlichen in Frage kommenden Wärmebedarfswerte vom Passivhaus bis zum Altbau abgedeckt. Höhere Wärmebedarfswerte, die im Gebäudebestand durchaus anzutreffen sind, werden nicht berücksichtigt. Gebäude mit einem Heizwärmebedarf über 200 kWh/(m<sup>2</sup>·a) sollten zunächst einer (umfangreichen) wärmedämmtechnischen Sanierung unterzogen werden. In Bezug auf die Wärmebedarfe wurden für die Wohn- und Bürogebäude die entsprechend Tabelle 9 auf den Standort Potsdam aufgeführten Heizwärmebedarfe angewendet. Zur Weiterverarbeitung der Daten in WP<sub>SOURCE</sub> wurden für diese generischen Gebäude sowohl die jeweiligen Heizgrenztemperaturen und die maximal benötigten Heizleistungen ermittelt.

Eine Kälteversorgung ist nur bei Nichtwohngebäuden vorgesehen. Dabei soll für die Raumkühlung ausschließlich passive Kühlung, z. B. über die vorhandene Erdsondenanlage erfolgen. Eine ggf. vorhandene Serverkühlung wird konventionell gedeckt und nur mit Blick auf den dafür notwendigen Strombezug bilanziell erfasst. Der für die Bürogebäude definierte Bedarf an Raumkühlung reicht von einem sehr geringen Bedarf (5 kWh/(m<sup>2</sup>·a)) bis zu sehr hohen Bedarfswerten (100 kWh/(m<sup>2</sup>·a)). Er deckt damit das Spektrum der in Deutschland üblicherweise anzutreffenden Bedarfswerte ab.

**Tabelle 9 Bedarfswerte für Heizwärme und Raumkühlung der Referenzgebäude**

Gebäude	Heizwärmebedarf [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Raumkühlung <sup>1)</sup> [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]
Einfamilienhaus	15; 25; 50; 75; 100; 150 und 200	- keine -
Mehrfamilienhaus		- keine -
Bürogebäude		5; 15; 45; 70 und 100

<sup>1)</sup> ohne Serverkühlung

Neben den Heizwärmebedarfen werden noch folgende Randbedingungen für die Simulationen festgelegt:

- Die Wärmeerzeugung erfolgt grundsätzlich monovalent durch eine elektrische Wärmepumpe, deren Verdampfer über einen der zu untersuchenden Niedertemperaturwärmeübertrager mit der Wärmequelle verbunden ist. Die Luft-Wasser-Wärmepumpen werden für jeden Lastfall und für die unterschiedlichen Standorte mit einer einfachen An/Aus-Steuerung sowie als Geräte mit Inverter (leistungsgeregt) simuliert.
- Die Raumtemperaturen werden bei allen Gebäuden einheitlich auf 21 °C festgelegt.
- Die Gebäude sind sowohl für die Raumheizung als auch für die Trinkwassererwärmung mit einer sogenannten *Bedarfsregelung* ausgestattet. Das bedeutet, dass die Raumheizung stets und unabhängig von der Jahres- oder Tageszeit in Betrieb geht, wenn die Solltemperatur in den Gebäuden unterschritten wird. Gleiches gilt für die Trinkwassererwärmung, die auch unabhängig von der Jahres- oder Tageszeit in Betrieb geht, wann immer die minimale Solltemperatur im Speicher unterschritten ist.

- Die Betriebsweise der Gebäude und Anlagentechnik wird hinsichtlich interner Wärmegevinne oder abgesenkte Raumtemperaturen, grundsätzlich konservativ umgesetzt. Insbesondere in Bezug auf die Datenbasis und physikalische Beschreibung der Niedertemperaturwärmeübertrager, aber auch die bei realen Projekten vielfach anzutreffenden Unsicherheiten bezüglich der Randbedingungen und Rahmendaten, wie etwa der Güte der Wärmepumpe oder, z. B. im Fall von erdgebundenen Systemen, die Erdreichparameter, begründen einen konservativen Ansatz. Um die Wahrscheinlichkeit einer Fehlauslegung oder sogar Unterdimensionierung durch eine getroffene Auswahl und Auslegungsempfehlungen für einen Niedertemperaturwärmeübertrager zu minimieren, wird bei allen Berechnungen von einem uneingeschränkten Betrieb der Raumheizung und Trinkwassererwärmung sowie keinen den Energiebedarf reduzierenden, internen Wärmegevinnen ausgegangen.
- Auch wenn die Gebäude zur Simulation entsprechend ihrer Nutzung in thermische Zonen unterteilt sind, nimmt die thermische Zonierung auf den Betrieb der Wärmepumpe im Allgemeinen keinen signifikanten Einfluss. Der Grund ist, dass die Wärmepumpe entsprechend der Systemkonfigurationen und auch entsprechend der Praxis meist auf ein Puffervolumen arbeitet, das auf die maximal im Heizsystem benötigte Temperatur zu erwärmen ist. Hat das System mehr als einen Heizkreis, so handelt es sich zumindest bei dem Heizkreis, der mit der niedrigeren Vorlauftemperatur gefahren wird, um einen gemischten Kreis. In der Praxis findet man, vor allem bei älteren Wärmepumpenanlagen oft den Zustand, dass alle Heizkreise gemischt und das Puffervolumen von der Wärmepumpe auf einer konstanten Temperatur gehalten wird. Wenn auch diese Betriebsweise energetisch nicht günstig ist, wird sie doch -um dem konservativen Ansatz des Programms WP<sub>SOURCE</sub> zu genügen- in den Systemkonfigurationen berücksichtigt und in die Simulationen implementiert.
- Um moderne Bauwerke mit Fußbodenheizung aber auch Gebäude mit Radiatoren abzubilden, werden im Rahmen der Systemsimulationen alle Gebäudetypen mit denselben zwei Heiztemperaturniveaus simuliert. Diese sind:
  - Vorlauftemperatur Heizkreis 35°C / Rücklauftemperatur Heizkreis 28 °C und
  - Vorlauftemperatur Heizkreis 55°C / Rücklauftemperatur Heizkreis 45 °C
- Für den Energiebedarf zur Erwärmung von Trinkwasser wird im Rahmen der Simulationen den spezifischen Bedarfswerten für die Raumheizung im Fall der Einfamilienhäuser 2.680 kWh/a und im Fall der Mehrfamilienhäuser 13.400 kWh/a hinzugerechnet. Bei Nichtwohngebäuden (Büros) wird zur Erwärmung von Trinkwasser im Allgemeinen nicht die zur Raumheizung installierte Heiztechnik genutzt. Häufig finden elektrisch beheizte Boiler oder sog. Untertischgeräte Verwendung.
- Die bei der Erwärmung und Bereithaltung von Trinkwarmwasser sowie durch Heizungspufferspeicher entstehenden thermischen Verluste, werden als thermische Gewinne der Gebäude bei der insgesamt durch die Wärmepumpe zur Verfügung zu stellenden Wärmemenge berücksichtigt. Die wärmetechnische Güte der Warmwasserspeicher entspricht den aktuellen Mindestanforderungen der europäischen Normenreihe DIN EN 12977.

Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der Niedertemperaturwärmequellen/-wärmeübertrager-Kombinationen wurden die Simulationsmodelle, insbesondere in Bezug auf die implementierten Heizungsanlagen und Anlagenvarianten, möglichst konstant gehalten und nur für die Untersuchungen relevante Parameter und Eingabewerte variiert. Auch die Verteilung der Raumwärme wurde im Rahmen der Simulationen nicht verändert. Die Wärmeverteilung erfolgt über gemischte Heizkreise. Die Trinkwassererwärmung, bzw. im Fall des Mehrfamilienhauses die Erwärmung des Pufferspeichers zur Erwärmung des Trinkwassers mittels Frischwasserstation, erfolgte im Vorrang. Bei der Versorgung der Wohngebäude mit erwärmtem Trinkwasser wurde in

den Simulationen das in der Praxis vielfach bei Einfamilienhäusern anzutreffende Konzept mit separatem Trinkwasserspeicher sowie für die Mehrfamilienhäuser ein Konzept mit Frischwasserstation realisiert, siehe Abbildung 34 und Abbildung 36.

### 9.2.1 Einfamilienhaus

Das virtuelle Gebäude mit einer Nutzfläche  $A_N$  von 152 m<sup>2</sup> (Abbildung 33) wird von 4 Personen mit einem Nutzenergiebedarf in Form von erwärmtem Trinkwasser von 670 kWh je Person und Jahr bewohnt. Das Zapfprofil für die Entnahmen von erwärmtem Trinkwasser basiert auf dem Trinkwasserzapfprofil *European Tapping Cycle Typ M*, gemäß Mandat 324 der Council Directive 92/75/EEC an CEN und CENELEC [9]. Die Zapfmengen werden dabei auf den aktuellen Bedarf (4 Personen) skaliert.

Abbildung 33 zeigt das simulierte Einfamilienhaus inkl. wesentlicher Daten.

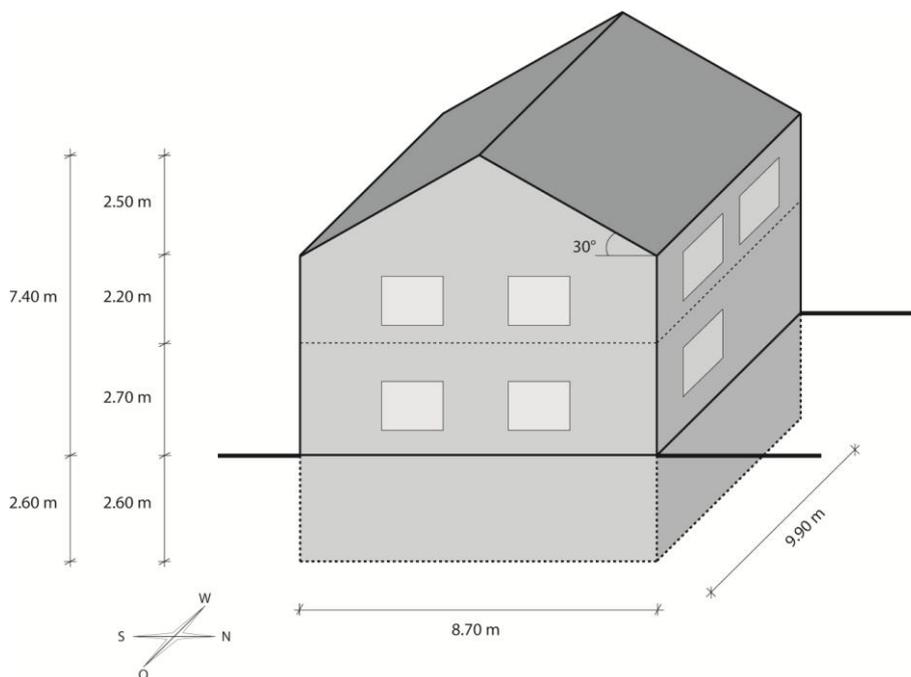


Abbildung 33 Abmessung und Kubatur des Einfamilienhauses

Die Tabelle 10 beinhaltet wesentliche Eckdaten des Einfamilienhauses

Tabelle 10 Wesentliche Eckdaten des Einfamilienhauses

	Außenwand [m <sup>2</sup> ]	Fensterfläche [m <sup>2</sup> ]	AW/Fensterfläche [%]
<b>Nord</b>	48,51	3,78	7,79
<b>Ost</b>	53,51	7,98	14,92
<b>Süd</b>	48,51	11,48	23,65
<b>West</b>	53,51	5,39	10,08

In Tabelle 11 sind die Heizwärmebedarfswerte für die unterschiedlichen Wärmedämmstandards des Einfamilienhauses, bezogen auf die Nutzfläche  $A_N$  und den Standort Potsdam zusammengestellt.

Tabelle 11 Heizwärmebedarfe des Einfamilienhauses

Heizwärmebedarf [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Heizwärmebedarf des Einfamilienhauses [kWh/a]
15	2.280
25	3.800
50	7.600
75	11.400
100	15.200
150	22.800
200	30.400

In Abbildung 34 ist der grundsätzliche Aufbau der Wärmeversorgung für die Raumheizung und die Erwärmung von Trinkwasser in den simulierten Einfamilienhäusern dargestellt.

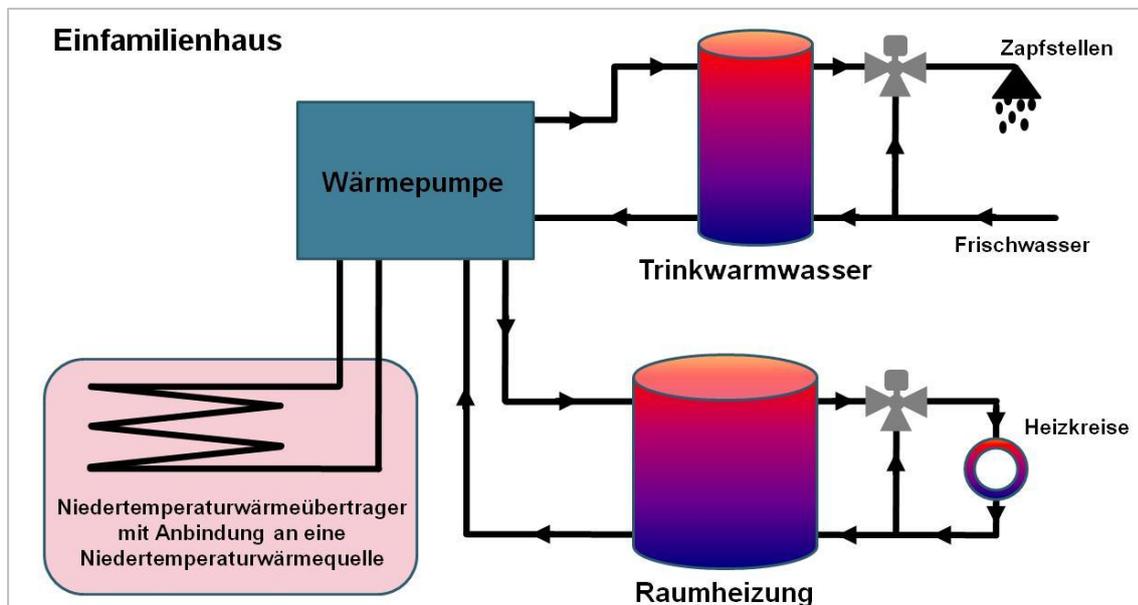


Abbildung 34 Schema der Raumwärme- und Trinkwarmwasserversorgung der Einfamilienhäuser

## 9.2.2 Mehrfamilienhaus

Das aus zwei Gebäudeteilen bestehende Mehrfamilienhaus mit einer Nutzfläche  $A_N$  von 1.056 m<sup>2</sup> stellt bezüglich seiner Nutzfläche ein eher kleines Gebäudeensemble dar. Das Haus besteht aus zwei identischen Gebäudeteilen, die ohne sich zu beeinflussen nebeneinander positioniert sind (Abbildung 35). Der gesamte Komplex wird von 20 Personen mit einem Nutzenergiebedarf in Form von erwärmtem Trinkwasser von 670 kWh je Person und Jahr bewohnt. Wie im Abschnitt 9.2.1 diskutierten Einfamilienhaus basiert das Zapfprofil für die Entnahmen von erwärmtem Trinkwasser auf dem Trinkwasserzapfprofil *European Tapping Cycle Typ M*, gemäß Mandat 324 der Council Directive 92/75/EEC an CEN und CENELEC [9]. Im Fall des Mehrfamilienhauses wird die Zapfmenge auf den aktuellen Bedarf (20 Personen) skaliert. Um durch einen konservativen Ansatz die Versorgungssicherheit zu erhöhen, wird wie bei der Betriebsweise der gesamten Heizungsanlagen nutzungsabhängige Gleichzeitigkeiten der Wasserentnahmen, die bei der Dimensionierung von Trinkwasserversorgungsanlagen üblicherweise berücksichtigt werden, nicht in Anrechnung gebracht.

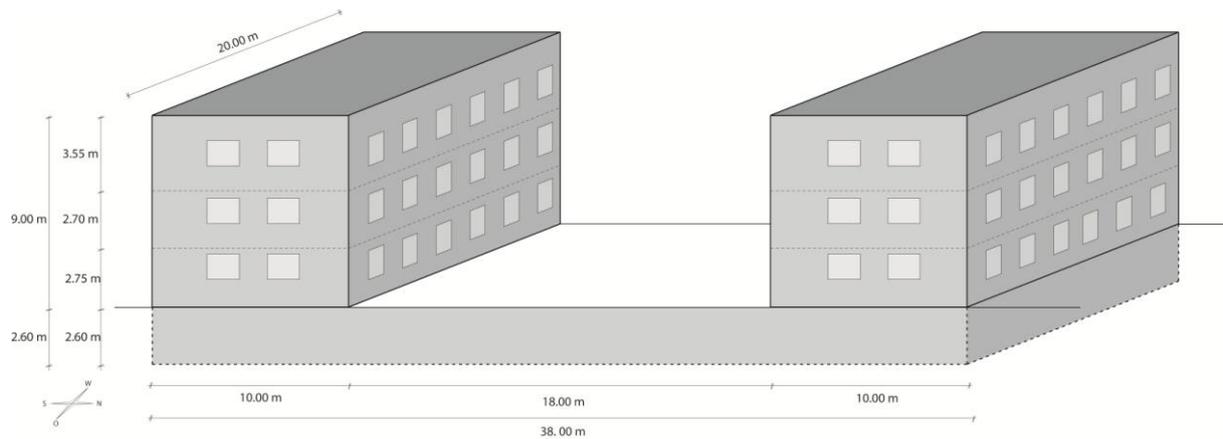


Abbildung 35 Abmessung und Kubatur des Mehrfamilienhauses, bestehend aus zwei identischen Gebäudeteilen

Tabelle 12 zeigt wesentliche Eckdaten eines Teiles des Mehrfamilienhauses

Tabelle 12 Wesentliche Eckdaten eines Teils des Mehrfamilienhauses

je Gebäudeteil	Außenwand [m <sup>2</sup> ]	Fensterfläche [m <sup>2</sup> ]	AW/Fensterfläche [%]
Nord	180,0	4,70	2,35
Ost	90,0	5,29	5,87
Süd	180,0	25,22	12,61
West	90,0	5,29	5,87

In Tabelle 13 sind der Heizwärmebedarfswerte für die unterschiedlichen Wärmedämmstandards des gesamten Mehrfamilienhauses, bezogen auf die Nutzfläche  $A_N$  und den Standort Potsdam zusammengestellt.

Tabelle 13 Heizwärmebedarfe des Mehrfamilienhauses, beide Gebäudeteile

Heizwärmebedarf [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Heizwärmebedarf des Einfamilienhauses [kWh/a]
15	15.840
25	26.400
50	52.800
75	79.200
100	105.600
150	158.400
200	211.200

In Abbildung 36 ist der grundsätzliche Aufbau der Wärmeversorgung für die Raumheizung und die Erwärmung von Trinkwasser in den simulierten Mehrfamilienhäusern dargestellt.

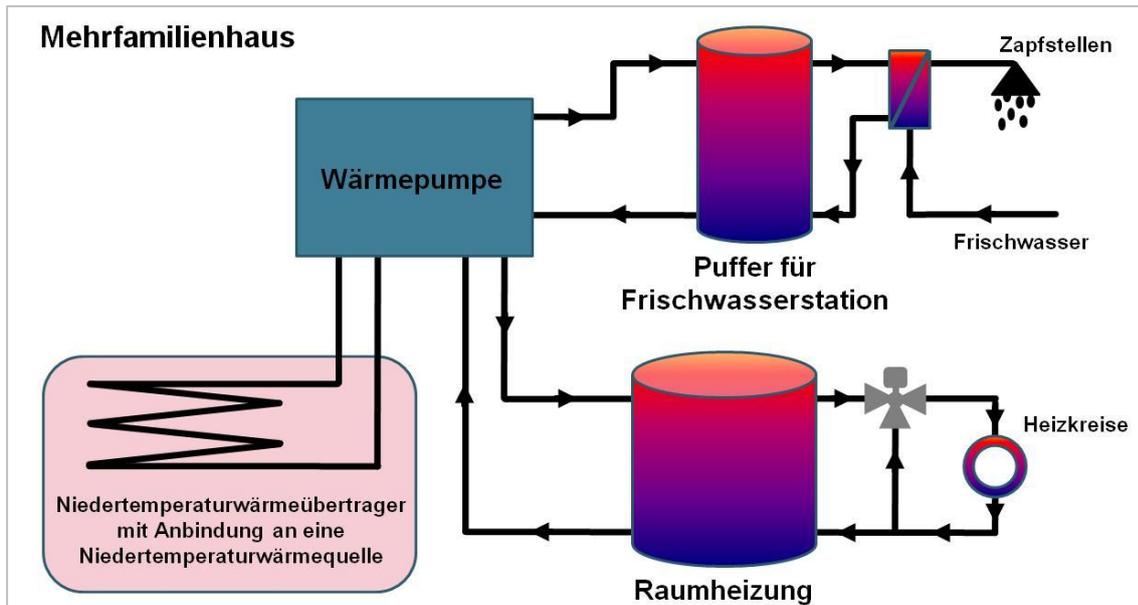


Abbildung 36 Schema der Raumwärme- und Trinkwarmwasserversorgung der Mehrfamilienhäuser

### 9.2.3 Bürogebäude

Mit einer Nutzfläche  $A_N$  von  $1.691 \text{ m}^2$  repräsentiert das Bürogebäude ein eher kleines Bauwerk (Abbildung 37). Gleichwohl können die Ergebnisse zu diesem Bürogebäude tendenziell auf größere Gebäude mit gleicher Nutzung übertragen werden. Das Bürogebäude bietet 56 Angestellten Platz. Die Trinkwassererwärmung erfolgt dezentral in einzelnen Bürotrakten mittels elektrischer Untertischgeräte. Eine Wärmebereitstellung zur Erwärmung von Trinkwasser durch die installierte Wärmepumpe erfolgt nicht.

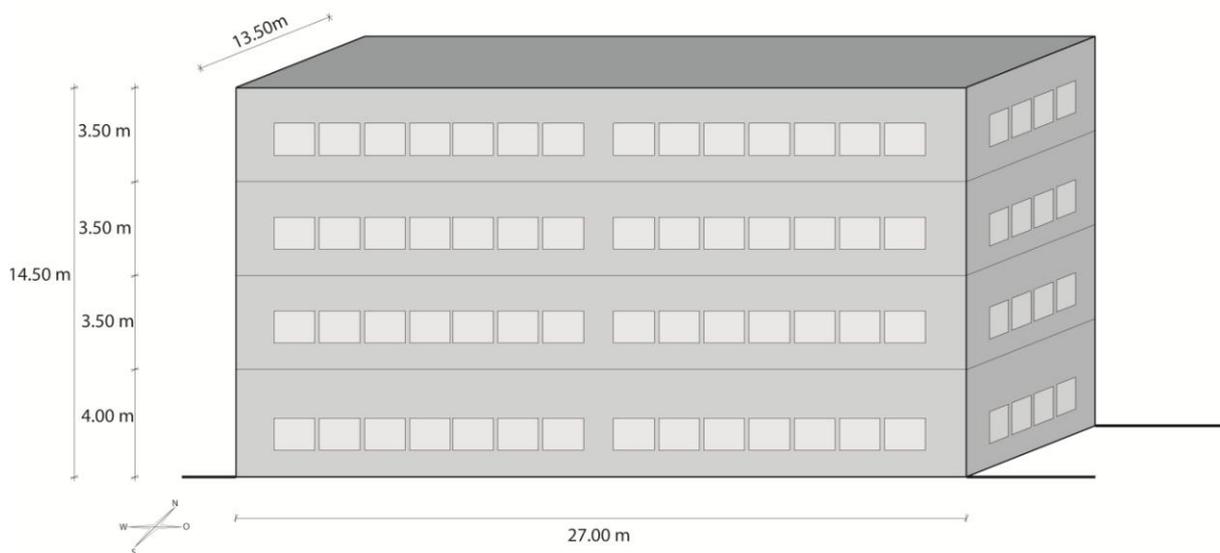


Abbildung 37 Abmessung und Kubatur des Bürogebäudes

Tabelle 14 Wesentliche Eckdaten des Bürogebäudes

	Außenwand [m <sup>2</sup> ]	Fensterfläche [m <sup>2</sup> ]	AW/Fensterfläche [%]
Nord	391,50	205,20	53,35
Ost	195,75	85,30	43,50
Süd	391,50	205,20	53,35
West	195,75	77,00	39,27

In Tabelle 15 sind der Heizwärmebedarfswerte für die unterschiedlichen Wärmedämmstandards des Bürogebäudes, bezogen auf die Nutzfläche  $A_N$  und den Standort Potsdam zusammengestellt.

Tabelle 15 Heizwärmebedarfe des Bürogebäudes

Heizwärmebedarf [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Heizwärmebedarf des Einfamilienhauses [kWh/a]
15	25.365
25	42.275
50	84.550
75	126.825
100	169.100
150	253.650
200	338.200

In Abbildung 38 ist der grundsätzliche Aufbau der Wärmeversorgung für die Raumheizung und die Erwärmung von Trinkwasser in den simulierten Bürogebäuden dargestellt.

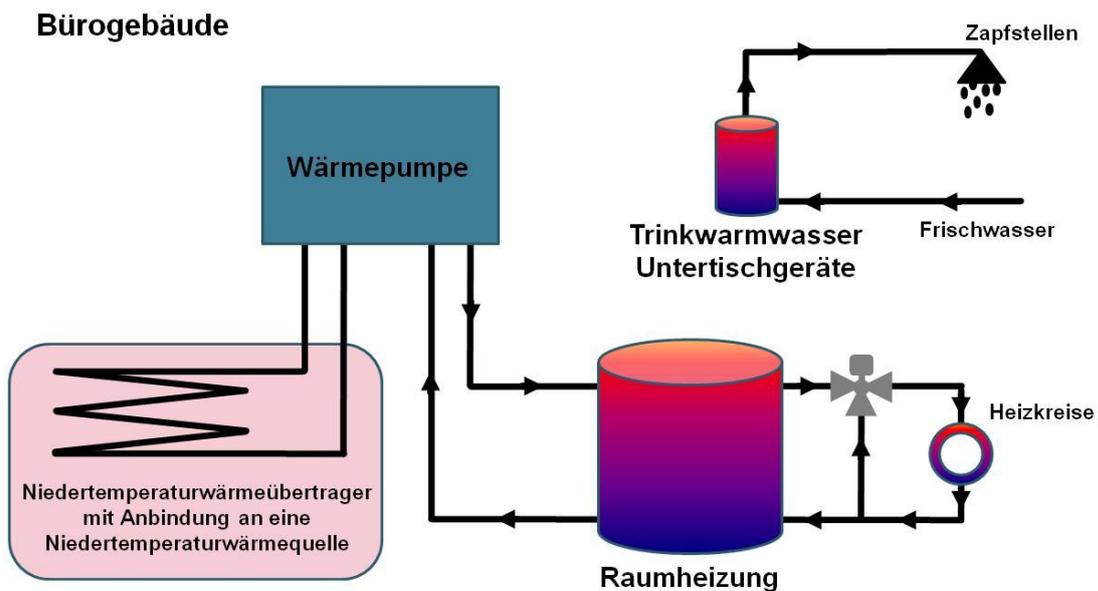


Abbildung 38 Schema der Raumwärme- und Trinkwarmwasserversorgung der Bürogebäude

### 9.3 Heizlastermittlung

In Abbildung 39 ist beispielhaft die Verteilung des jährlichen Wärmebedarfs in Abhängigkeit von den Heizgrenztemperaturen unterschiedlicher Gebäude für die Referenzklimaregion 04, Nordostdeutsches Tiefland mit dem Referenzstandort Potsdam, dargestellt. Die Graphik basiert auf einem idealisierten jährlichen Verlauf der Umgebungstemperatur, der mittels Regression aus den Monatsmittelwerten der Umgebungstemperatur für die Referenzklimaregion 04 ermittelt wurde. Auf der Grundlage der mittleren Tagestemperaturen der Umgebung, die sich aus dem idealisierten jährlichen Verlauf der Umgebungstemperatur ergeben, wurden die Heizgradtage für Heizgrenztemperaturen im Bereich von 8 °C bis 18 °C ermittelt. Aus den Monatssummen der Heizgradtage wurde der relative, monatliche Raumheizaufwand berechnet und prozentual dargestellt. Auf dieser Grundlage stellt die Graphik die Verteilung des jährlichen Wärmebedarfes über die Monate dar.

Berechnung der Heizgradtage:

$$\text{Heizgradtage}_{(M,HG)} = \sum_{k=1}^{n_M} (\vartheta_{\text{Heizgrenze}} - \vartheta_{\text{Umgebung}}) \quad [\text{Kd}]$$

Heizgradtage<sub>(M,HG)</sub>-

Heizgradtage für den jeweiligen Monat (M) und die..... [Kd]  
 jeweilige Heizgrenze (HG)

$n_{(M)}$  Anzahl der Heiztage im jeweiligen Monat (M) ..... [-]

$\vartheta_{\text{Heizgrenze}}$  Umgebungstemperatur unterhalb der (Raum)Heizbedarf ..... [°C]  
 besteht (hier 8 °C bis 18 °C)

$\vartheta_{\text{Umgebung}}$  mittlere Umgebungstemperatur des jeweiligen Heiztages ..... [°C]

Zusammen mit einer vergleichbaren Abschätzung des relativen monatlichen Kühlaufwandes für Klimakälte, dienen auch diese Daten als Grundlage für die Berechnungen im Programm WP<sub>SOURCE</sub>. Eine ggf. vorhandene Serverkühlung oder ähnlicher Kältebedarf innerhalb eines Gebäudes, stellt im Wesentlichen einen Sockelbetrag dar und ist in der die Raumkühlung (Klimakälte) betreffenden Abbildung 40 nicht enthalten.

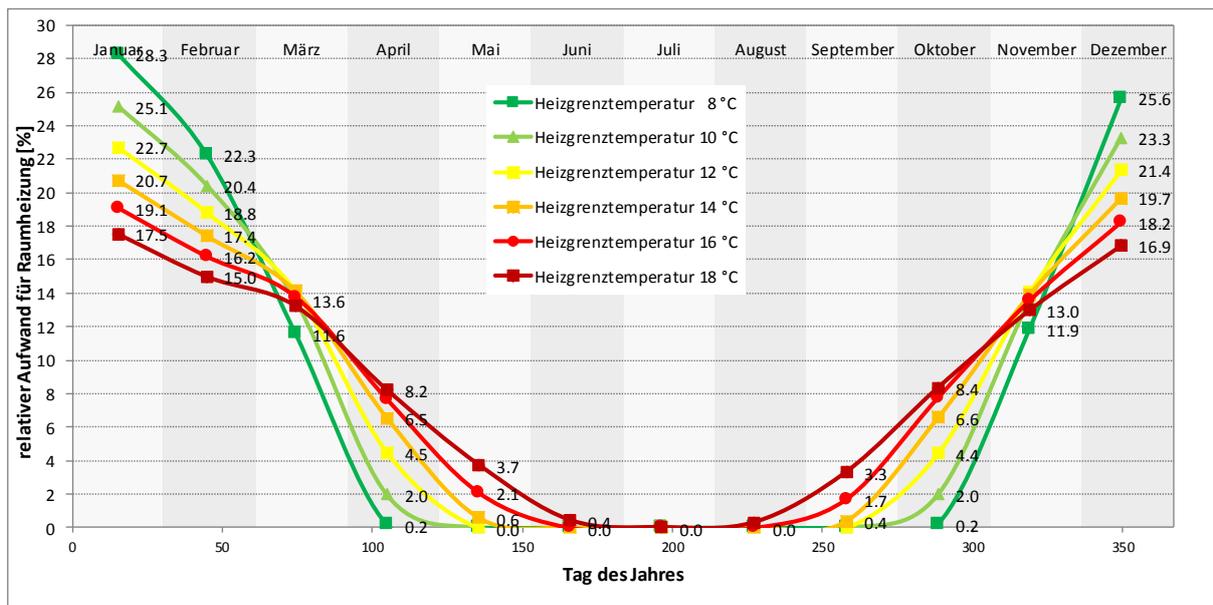


Abbildung 39 Wärmebedarfsverteilung in Abhängigkeit der Heizgrenztemperatur am Beispiel der Referenzklimaregion 04, Nordostdeutsches Tiefland, Repräsentanzstation Potsdam

In Tabelle 16 sind die Heiztage der Referenzklimaregionen zusammengestellt. Auch hier zeigt sich die Sonderstellung der Referenzklimaregion 11, Repräsentanzstation Fichtelberg. Oberhalb einer Heizgrenztemperatur von 12 °C muss in dieser Klimaregion ganzjährig geheizt werden. Neben dem wärmedämmtechnischen Standard eines Gebäudes, wird die Heizgrenztemperatur maßgeblich durch die Fensterflächenanteile und die solaren Wärmegewinne eines Bauwerks beeinflusst. Für eine Raumtemperatur um die 20 °C entspricht die Heizgrenze von 12 °C einem typischen Wert für Gebäude mit mittlerem bis gutem Wärmedämmstandard und signifikanten solaren Wärmegewinnen.

Tabelle 16 Heiztage in Abhängigkeit der Heizgrenztemperatur

	Heizgrenze										
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Reg_01	158	172	186	200	215	230	246	265	285	312	365
Reg_02	162	176	189	202	215	230	244	260	277	299	328
Reg_03	159	174	188	201	215	229	245	262	281	305	349
Reg_04	160	171	184	196	208	221	235	249	265	282	304
Reg_05	141	155	169	183	197	212	227	243	260	280	306
Reg_06	174	188	203	217	232	248	266	287	314	365	365
Reg_07	156	170	183	196	209	223	237	253	270	289	315
Reg_08	176	188	202	215	229	245	261	280	302	340	365
Reg_09	165	177	189	201	213	225	239	253	268	286	308
Reg_10	185	197	209	222	236	250	266	284	307	347	365
Reg_11	238	253	271	291	318	365	365	365	365	365	365
Reg_12	146	159	172	185	198	211	225	239	254	271	289
Reg_13	164	176	188	200	212	224	238	252	267	285	308
Reg_14	178	190	203	216	229	243	259	276	296	324	365
Reg_15	171	183	196	208	222	236	250	267	285	311	365

Analog zu Abbildung 39 zeigt Abbildung 40 die Kältebedarfsverteilung in Abhängigkeit der Kühlgrenztemperatur am Beispiel der Referenzklimaregion 04. Auch diese Graphik basiert auf einem idealisierten jährlichen Verlauf der Umgebungstemperatur, der mittels Regression aus den Monatsmittelwerten der Umgebungstemperatur für diese Klimaregion ermittelt wurde.

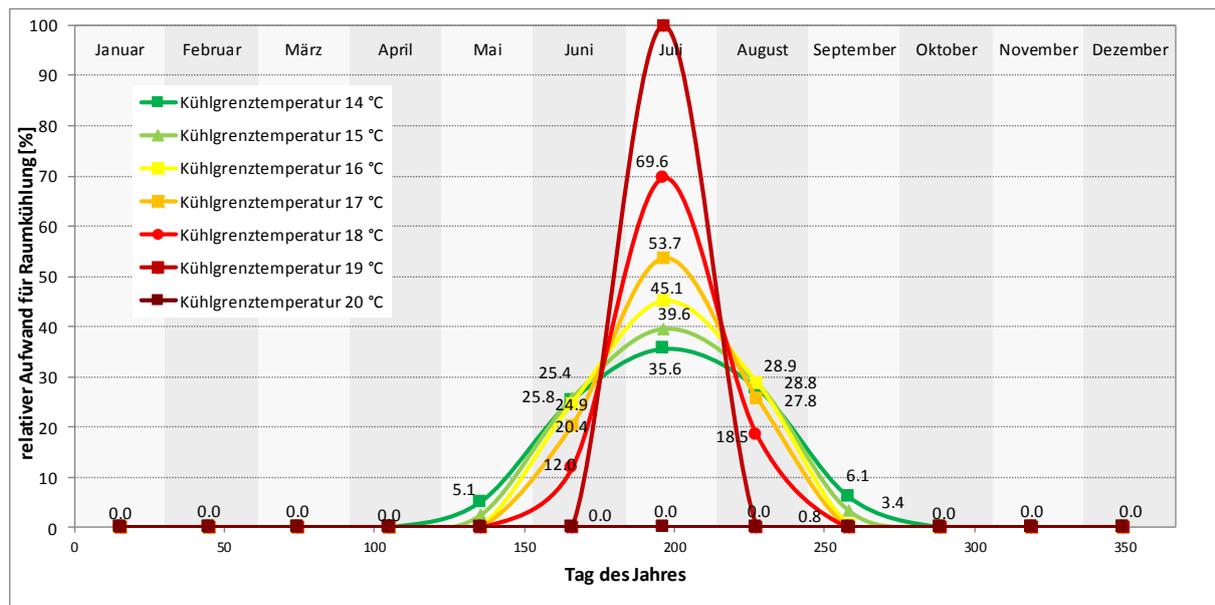


Abbildung 40 Kältebedarfsverteilung in Abhängigkeit der Kühlgrenztemperatur am Beispiel der Referenzklimaregion 04, Nordostdeutsches Tiefland, Repräsentanzstation Potsdam

In Tabelle 17 sind die Kühltage der Referenzklimaregionen zusammengestellt. Wie bei den Heiztagen nimmt auch hier die Referenzklimaregion 11 eine Sonderstellung ein. Im betrachteten Temperaturbereich für die Kühlgrenze von 14 °C bis 20 °C besteht kein Kühlbedarf. Gleichwohl kann durch entsprechende interne Wärmelasten, z. B. in einem Bürogebäude, auch in der Klimaregion 11 ein Raumkühlungsbedarf bestehen. Ein Kältebedarf für Serverkühlung oder ähnliche Einrichtungen mit regelmäßigem und im Wesentlichen von den Außenbedingungen abgekoppelten Kältebedarfen, ist in dieser Betrachtung nicht enthalten.

Tabelle 17 Kühltage in Abhängigkeit der Kühlgrenztemperatur

	Kühlgrenze												
	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5	20
Reg_01	119	110	100	90	80	68	53	33	0	0	0	0	0
Reg_02	121	113	105	97	88	78	66	54	37	0	0	0	0
Reg_03	120	111	103	93	83	72	59	43	14	0	0	0	0
Reg_04	130	124	116	108	100	92	83	73	61	47	26	0	0
Reg_05	138	130	122	113	105	95	85	73	59	43	10	0	0
Reg_06	99	89	78	66	51	31	0	0	0	0	0	0	0
Reg_07	128	120	112	104	95	86	76	64	50	30	0	0	0
Reg_08	104	95	85	75	63	47	25	0	0	0	0	0	0
Reg_09	126	119	112	105	97	89	79	69	57	42	18	0	0
Reg_10	99	90	81	70	58	42	18	0	0	0	0	0	0
Reg_11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reg_12	140	134	126	119	111	103	94	86	76	64	51	34	0
Reg_13	127	120	113	106	98	88	80	70	57	42	17	0	0
Reg_14	106	98	89	79	69	57	41	12	0	0	0	0	0
Reg_15	115	107	98	89	80	68	54	38	0	0	0	0	0

Für eine Wärmepumpenanlage, ihre Niedertemperaturwärmequelle und den/die zugehörigen Wärmeübertrager ist neben der bis hierher diskutierten Heizlast auch die **maximale Heizleistung** von entscheidender Bedeutung. Im Zusammenhang mit der Erstellung der Gebäudemodelle für die Systemsimulationen, wurden auch Vorabsimulationen zur Bestimmung der maximalen Heizleistungen der unterschiedlichen Gebäude durchgeführt.

Neben anderen Randbedingungen wurden in den Berechnungen folgende Größen zugrunde gelegt:

- Raumsolltemperatur 21 °C
- die minimale Außentemperatur der Referenzklimaregion und
- der energetisch relevante Luftwechsel  
(Berücksichtigung einer ggf. vorhandenen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung)

## 9.4 Niedertemperaturwärmeübertrager

Für die Simulation und Analysen der Wärmeübertrager für Niedertemperaturwärmequellen sowie Parameterstudien ausgewählter Aspekte dieser Technologie, wurden acht derzeit am Markt verfügbare und häufig umgesetzte Wärmeübertragersysteme ausgewählt. Vorab wurden in einer Recherche vorhandene und validierte Rechenmodelle ermittelt.

In futur:heatpump wurden folgende Systeme bzw. Wärmeübertrager simulativ abgebildet.

Tabelle 18 Wärmeübertragersysteme und im Rahmen des Projektes umgesetzte Simulationsmodelle

Wärmeübertragersystem	numerisches Rechenmodell
Erdwärmesonde	TRNSYS-Types verschiedener Autoren
Erdwärmekorb	Anwendung in Matlab/Simulink
Spiralsonden	Anwendung in Matlab/Simulink
Flächenkollektor	TRNSYS-Type entwickelt am Institut für Solarenergieforschung, Hameln (ISFH)
Luft-Wasser-Wärmeübertrager in Verbindung mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe	TRNSYS-Type verschiedener Autoren
Eisspeicher; Solar- und Luftabsorber	Für beide Komponenten als TRNSYS-Type, verschiedene Autoren
Wärmeübertragersystem	Analytische Berechnung
Brunnen	Berechnungen nach analytischen und empirischen Korrelationen
Abwasserwärmeübertrager	Analytische Berechnungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Geometrien und Betriebsweisen der Wärmeübertrager

Da für Erdwärmekörbe und Spiralsonden keine geeigneten TRNSYS®-Modelle vorlagen, wurden diese Wärmeübertrager mit Rechenmodellen auf der Basis von Matlab/Simulink simuliert. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denen der mit TRNSYS® durchgeführten Simulationen zu gewährleisten, wurden sämtliche Simulationen mit Matlab/Simulink-Modellen auf der Grundlage von mittels oder für TRNSYS® definierte(n) Eingabegrößen und Parametrierungen durchgeführt. So wurden zum Beispiel die Raumheizungs- und Trinkwarmwasserlasten, die Wetterdaten und die Kennwerte für die berücksichtigten Erdreichqualitäten aber auch Besonderheiten der Anlagentechnik und die Formate der Ausgabedateien identisch zu den Simulationen mittels TRNSYS 17® den Matlab/Simulink-Modellen aufgeprägt bzw. in diese implementiert.

## 9.5 Erdreichtemperaturen und -parameter

Vor dem Hintergrund statistischer Auswertungen der Umgebungstemperaturen und Strahlungsdaten der 15 Referenzklimaregionen wurde im Rahmen von Vorabsimulationen ein Modell zur Ermittlung der theoretischen Erdreichtemperaturen erstellt. Das Modell berechnet die Temperaturschwankung des oberflächennahen Erdreiches in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen. Zur Berechnung der theoretischen Erdreichtemperatur wurden im vorliegenden Fall

- a) die Umgebungstemperatur sowie
- b) die Umgebungstemperatur und die Globalstrahlung

berücksichtigt. Neben diesen beiden wesentlichen Einflussgrößen hat auch die Himmelstemperatur durch Strahlungsaustausch mit der Erdoberfläche einen Einfluss auf die Erdreichtemperatur. Da die

Himmelstemperatur jedoch weder Bestandteil der Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes noch der mittels Meteororm<sup>®</sup> generierten Wetterdaten für die Referenzklimaregionen ist und die durch ein TRNSYS-Modell (Type 69) mittels Korrelationen aus der Umgebungstemperatur, dem Taupunkt sowie der diffusen und direkten Strahlung berechneten Werte nicht mit den Daten der Referenzklimaregionen vermischt werden sollen, wird die Himmelstemperatur bei der Bestimmung der theoretischen Erdreichtemperaturen nicht berücksichtigt. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass auch ggf. relevante Beeinflussungen des Strahlungsaustausches durch Überbauung oder Bewuchs an den verschiedenen Standorten nicht bekannt sind.

Das Modell lässt die Berechnung der theoretischen Erdreichtemperaturen in unterschiedlichen Tiefen und für unterschiedliche Bodenbeschaffenheiten (Erdreichparameter) zu. Um einen speziellen Fall abzubilden, muss das als „Black-Box“ konzipierte Modell mittels Messdaten kalibriert werden. Die für die Referenzklimaregionen ermittelten Erdreichtemperaturen wurden mit Berechnungen der Erdreichtemperaturen von TRNSYS-Modellen verglichen und verifiziert. Abschließend wurden mit dem Modell die theoretischen für ungestörtes Erdreich zugrunde gelegten Erdreichtemperaturen für die meteorologischen Bedingungen der 15 Testreferenzjahre berechnet.

Im Rahmen der Parametrierung der Simulationsmodelle der Erdreichwärmeübertrager werden vier Erdreichkennwerte spezifiziert und während der Parameterstudien variiert. Dabei handelt es sich um

- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  W/(m·K)
- Spezifische Wärmekapazität  $c_p$  J/(kg·K) oder J/(m<sup>3</sup>·K)
- Dichte  $\rho$  kg/m<sup>3</sup>
- Schmelzenthalpie  $h_{Sch}$  J/kg  
 (im Fall eines Gefrieren und Auftauens)

Die in Tabelle 19 aufgeführten Parameterkombinationen für die Erdreichtypen schlecht, mäßig, mittel und gut wurden für jeden Standort in Deutschland betrachtet.

**Tabelle 19 Kennwerte der berücksichtigten Erdreichqualitäten**

Kennwerte der Erdreichqualitäten			
schlecht	mäßig	mittel	gut
<b>Wärmeleitfähigkeit <math>\lambda</math></b>			
1 W/(m·K)	2 W/(m·K)	3 W/(m·K)	4 W/(m·K)
<b>Spezifische Wärmekapazität <math>c_p</math></b>			
1000 J/(kg·K)	1333 J/(kg·K)	1333 J/(kg·K)	1333 J/(kg·K)
<b>Dichte <math>\rho</math></b>			
1500 kg/m <sup>3</sup>	1800 kg/m <sup>3</sup>	1800 kg/m <sup>3</sup>	1800 kg/m <sup>3</sup>
<b>Schmelzenthalpie <math>h_{Sch}</math><sup>1)</sup></b>			
40.0 kJ/kg			

<sup>1)</sup> Die Schmelzenthalpie  $h_{Sch}$  hängt stark vom Wassergehalt des Erdbodens ab. Die Literatur nennt Werte im Bereich von 15 kJ/kg bis 65 kJ/kg. Da die Werte zudem sehr ortsabhängig sind und auch nicht mit den Klimaregionen korrelieren, wurde für die Simulationen ein mittlerer Wert von 40 kJ/kg als konstant angesetzt.

## 9.6 Wärmepumpe

Im Rahmen der Systemsimulationen werden die Wärmepumpen mit dem Type 401 abgebildet. Dabei handelt es sich um ein Modell zur Beschreibung einer Kompressionswärmepumpe inklusive Frost- und Taktverlusten bei dem die Verdampfer- und Kondensatoreintrittstemperatur sowie der Verdampfer- und Kondensatormassestrom die Eingangsgrößen sind. Diese Größen können aus den Kennlinienfeldern der Herstellern entnommen werden (Vergleich Abbildung 41). Die von den Wärmepumpenherstellern angegebenen Kennlinienfelder zeigen die Kondensatorleistung und die elektrische Leistungsaufnahme als Funktion der Verdampfereintrittstemperatur (Vorlauf-temperatur der Niedertemperaturwärmequelle) sowie der Kondensatoraustrittstemperatur (Vorlauf-temperatur Heizkreis) auf.

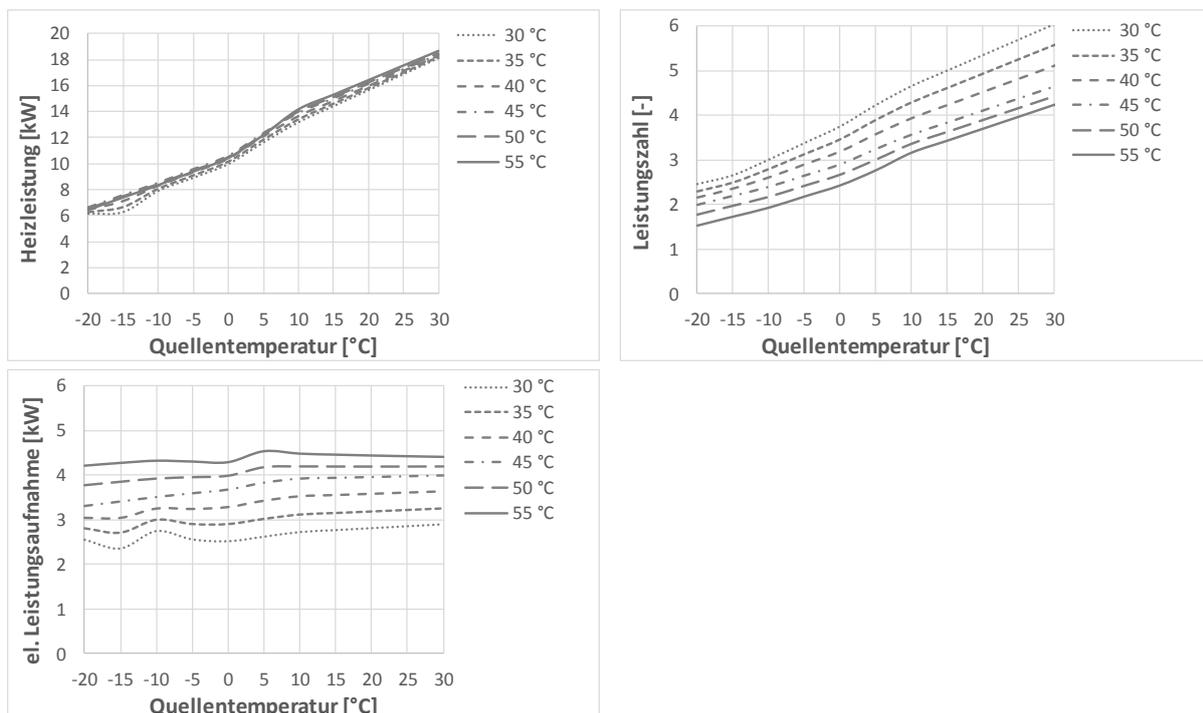


Abbildung 41 Beispiel eines Kennlinienfeldes einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (An/Aus-Betriebsweise)

Hinsichtlich der zu wählenden Vorgaben der Kenndaten für die Wärmepumpen soll im Rahmen von future:heatpump nicht auf einen Hersteller und ein Fabrikat zurückgegriffen werden, sondern eine Referenzwärmepumpe „mittlerer Güte“ ermittelt werden, die den Durchschnitt der am Markt verfügbaren Wärmepumpen widerspiegelt.

Hierzu werden Produktunterlagen von drei großen am deutschen Markt etablierten Wärmepumpenanbietern ausgewertet und entsprechend den Gerätetypen zugeordnet:

- Luft-Wasser-Wärmepumpe (An/Aus-Betriebsweise)
- Sole-Wasser-Wärmepumpe (An/Aus-Betriebsweise)
- Wasser-Wasser-Wärmepumpe (An/Aus-Betriebsweise)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe (Inverter Gerät, leistungsgeregelt).

Die erstellte Datenbank weist eine Anzahl von 60 verschiedenen Wärmepumpen auf, welche in fünf verschiedene Leistungsklassen eingeteilt sind (6 kW, 12 kW, 30 kW, 70 kW, 100 kW). Für die oben aufgelisteten vier Gerätetypen werden dann „mittlere Kennlinien“ generiert, siehe Abbildung 42.

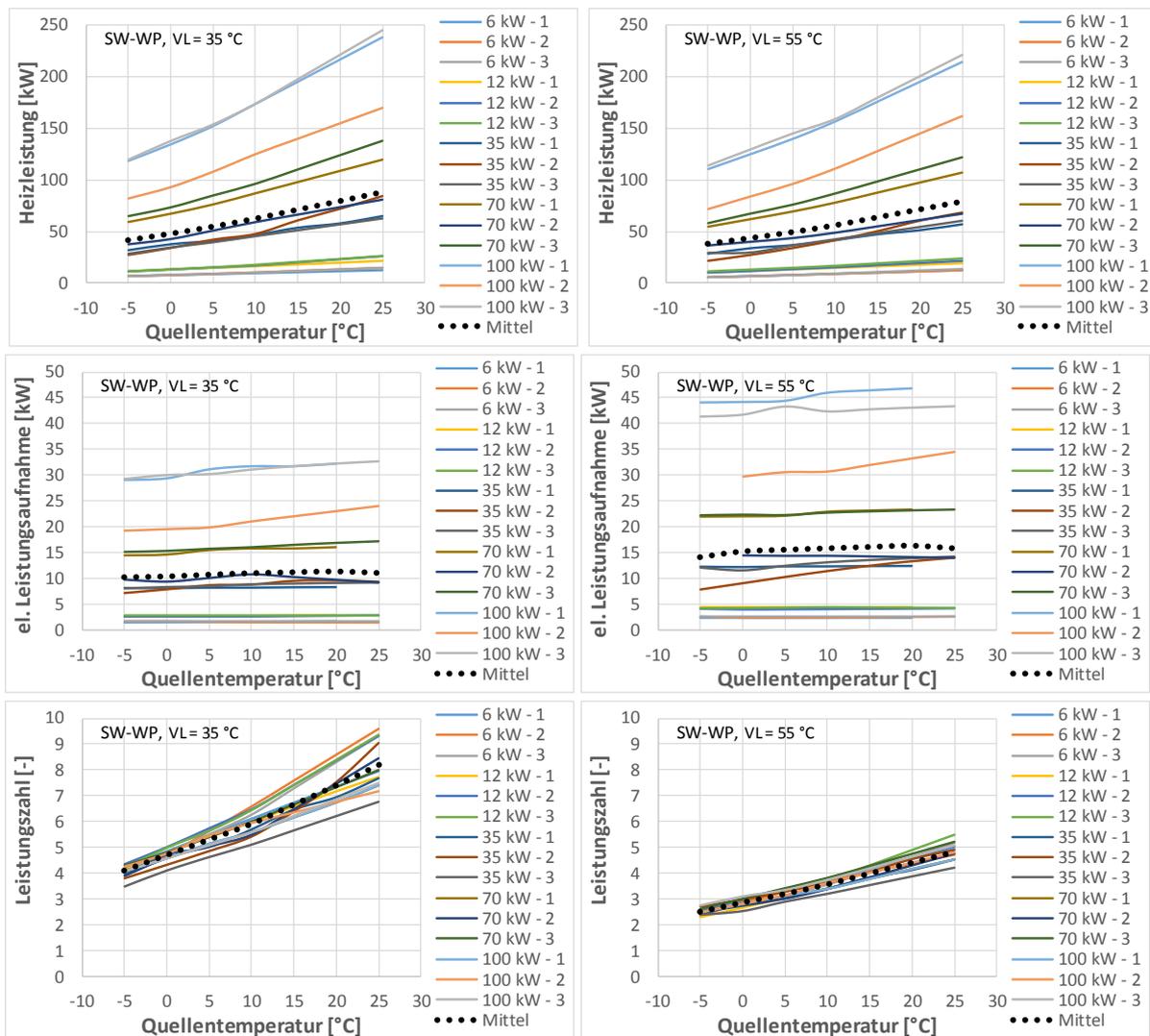


Abbildung 42 Ermittlung idealisierter Kennlinienfelder – Beispiel Sole-Wasser-Wärmepumpe für Kondensatoraustrittstemperatur 35 °C und 55 °C

Für die Anwendung in TRNSYS werden aus den Kennlinien biquadratische Polynome abgeleitet bzw. berechnet. Es gelten dazu folgende Gleichungen für die Kondensatorleistung und die elektrische Leistungsaufnahme:

$$Q_{\text{Kond.}} = a_1 + a_2 \cdot T_{\text{Verd.,ein}} + a_3 \cdot T_{\text{Kond.,aus}} + a_4 \cdot T_{\text{Verd.,ein}} \cdot T_{\text{Kond.,aus}} + a_5 \cdot T_{\text{Verd.,ein}}^2 + a_6 \cdot T_{\text{Kond.,aus}}^2$$

$$P_{\text{elekt.}} = b_1 + b_2 \cdot T_{\text{Verd.,ein}} + b_3 \cdot T_{\text{Kond.,aus}} + b_4 \cdot T_{\text{Verd.,ein}} \cdot T_{\text{Kond.,aus}} + b_5 \cdot T_{\text{Verd.,ein}}^2 + b_6 \cdot T_{\text{Kond.,aus}}^2.$$

Die Berechnung muss an dieser Stelle über normalisierte Temperaturen erfolgen:

$$T_{\text{norm}} = T [°C] / 273,15 + 1.$$

Die einzelnen Polynomkoeffizienten werden mit Hilfe eines Gleichungslösers (Solver) im Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel® berechnet.

Der Vergleich der erzeugten Regressionen mit den Kennlinien der Wärmepumpen ergibt bei drei Gerätetypen eine sehr gute Übereinstimmung. Nur bei den Invertergeräten (Luft-Wasser-Wärmepumpe) müssen die Kurvenverläufe mit dem nachfolgenden Korrekturterm angepasst werden, siehe Abbildung 43:

$$Y_i = C_0 + C_1 \cdot X_i + C_2 \cdot X_i^2 + C_3 \cdot X_i^3 + C_4 \cdot X_i^4 + C_5 \cdot X_i^5 + C_6 \cdot X_i^6.$$

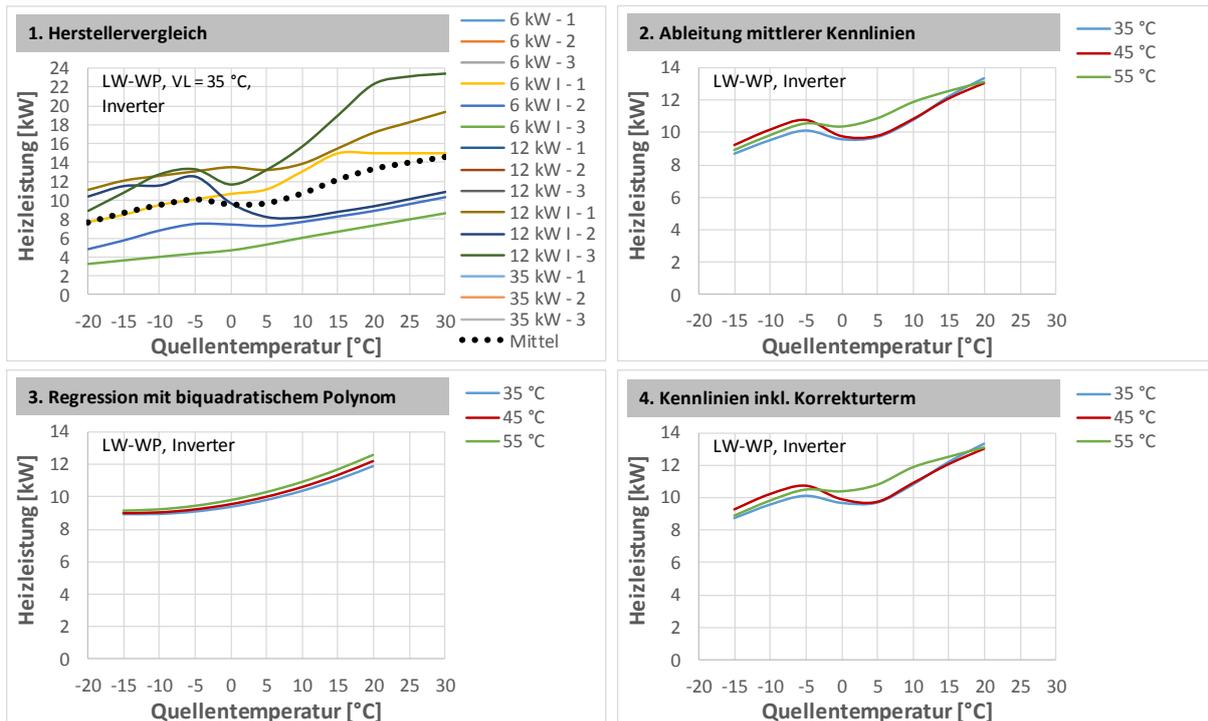


Abbildung 43 Darstellung der notwendigen Umformschritte bei Luft-Wasser-Wärmepumpen mit der Spezifikation Inverter

Die ermittelten idealisierten Kennlinienfelder werden innerhalb der TRNSYS-Simulationen als auch im Pre-Check-Tool zur Ermittlung der monatlichen Arbeitszahl eingesetzt, siehe Abbildung 44. Die Skalierung der Kennlinienfelder auf den jeweils gewünschten Auslegungspunkt (Heizleistung der Wärmepumpe) erfolgt durch die Einführung eines Korrekturfaktors. So können die Kennlinienfelder beliebig kleine und große Wärmepumpen abbilden.

Abhängig vom Raumheizbedarf der unterschiedlichen Gebäude an den verschiedenen Standorten und dem Bedarf an erwärmtem Trinkwasser, werden für die Einfamilienhäuser Wärmepumpen mit Leistungen von 8 kW bis 23 kW, für die Mehrfamilienhäuser solche im Leistungsbereich von 29 kW bis 131 kW und für die Bürogebäude Geräte von 22 kW bis 186 kW in die TRNSYS Simulationen implementiert. Ab einer Leistung von 100 kW wird die benötigte Leistung auf zwei Geräte aufgeteilt.

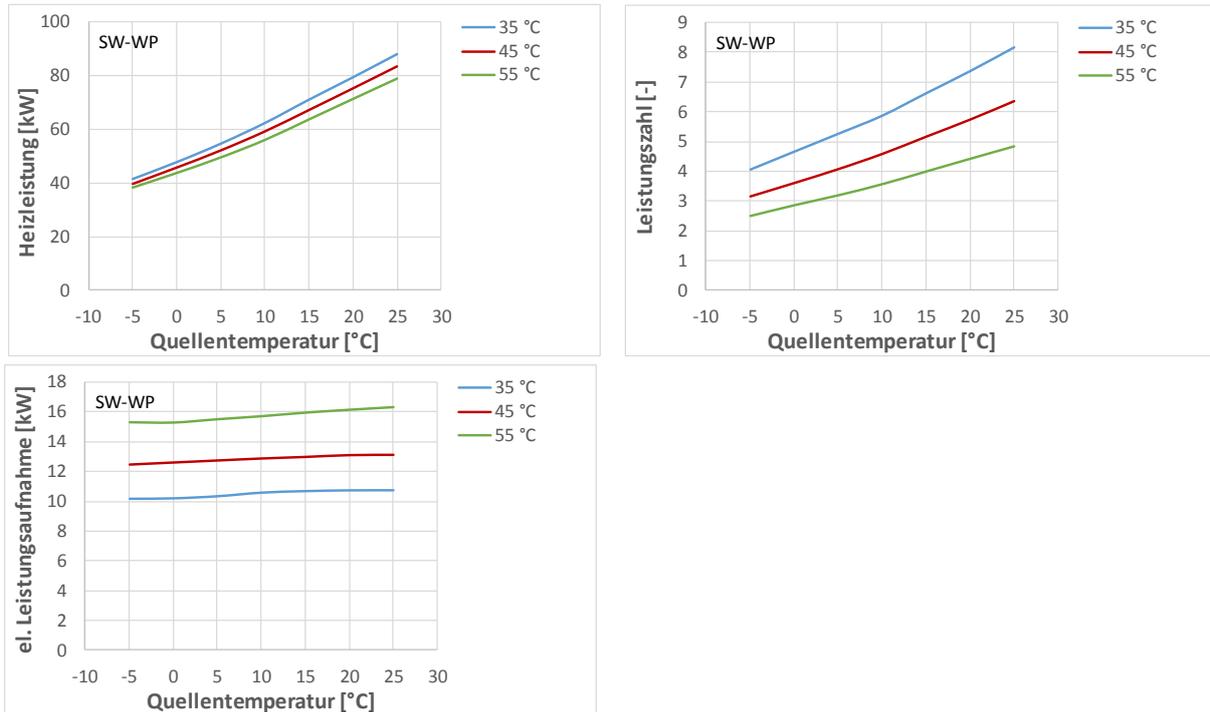


Abbildung 44 Darstellung der generierten idealisierten Kennlinienfelder am Beispiel der Sole-Wasser-Wärmepumpe

## 9.7 Referenzwetterdaten

Die Systemsimulationen wurden vorrangig mit den Wetterdaten für die Referenzklimaregionen 04 und 10 durchgeführt (Repräsentanzstation Potsdam bzw. Hof-Hohensaas). Anhand von zu Beginn vollzogenen detaillierten statistischen Auswertungen der Wetterdaten für die 15 für Deutschland definierten Klimaregionen, wurden die Referenzklimaregionen 04 und 10 als für Deutschland typisch identifiziert. Die übrigen Klimaregionen können diesen zugeordnet werden. Eine Ausnahme bildet die Referenzklimaregion 11, Erzgebirge, Böhmer- und Schwarzwald über 1.000 m, Repräsentanzstation Fichtelberg. Diese Klimaregion nimmt eine Sonderstellung ein, da eine sinnvolle Nutzung der untersuchten Technologien in der Region 11 grundsätzlich fraglich und zudem die flächenmäßige Ausdehnung der Region gering ist. Aus diesem Grund wird die Referenzklimaregion 11 zurückgestellt und nicht behandelt.

## 9.8 Validitätskriterien der Niedertemperaturwärmequellen und –wärmeübertrager

Um aus dem Zusammenwirken der Betriebsbedingungen der jeweiligen Wärmequelle, der thermischen Last der Gebäude und auch mit Blick auf ökologische und ökonomische Aspekte eine empfehlenswerte Dimensionierung für die einzelnen Wärmeübertragersysteme ableiten zu können, wurden Kriterien für einen *bestimmungsgemäßen Anlagenbetrieb* in Bezug auf die Niedertemperaturwärmequelle definiert. Werden diese Betriebsbedingungen nicht eingehalten, muss der Niedertemperaturwärmeübertrager vergrößert werden. Unter Einhaltung der bestimmungsgemäßen Betriebsbedingungen ist es das Ziel, mit möglichst wenig Wärmeübertragern und/oder möglichst geringem Flächenaufwand bzw. kleinstmöglichem Eisspeichervolumen und Solar- und Luftabsorbern den geforderten Energiebedarf zu decken.

Um Dimensionierungsregeln und Korrelationen zwischen den einzelnen Wärmeübertragertypen in Kombination mit der Art und Beschaffenheit der Niedertemperaturquellen und bestimmten Gebäuden und Heiztemperaturniveaus sowie ggf. vorhandenen Wärmebedarfen zur Trinkwassererwärmung ableiten zu können, wurden für jeden Wärmeübertrager Validitätskriterien

definiert. Die sich aus diesen Kriterien für die einzelnen Wärmeübertrager, Standorte, Gebäude und Anlagenkonfigurationen ergebenden Dimensionierungen für die Wärmeübertrager oder die Anzahl der Einzelkomponenten sind wesentliche Grundlagen für das Programm WP<sub>SOURCE</sub>.

Eine Niedertemperaturwärmequelle bzw. ein Niedertemperaturwärmeübertrager gilt als ausreichend dimensioniert und gewährleistet einen bestimmungsgemäßen Anlagenbetrieb, wenn gilt:

### **Erdwärmesonden**

- **Kriterium 1:** Die Eintrittstemperatur in die Erdwärmesonde(n) muss oberhalb von 0 °C liegen; Ausnahmen, siehe Kriterium 2.
- **Kriterium 2:** Während der Erwärmung von Trinkwasser durch die Wärmepumpe darf die Eintrittstemperatur in die Erdwärmesonde(n) pro Monat (30 x 6 Minuten) in nicht mehr als 30 Simulationszeitschritte unterhalb von -0,2 °C liegen.

Werden diese Kriterien nicht eingehalten, erfolgt die Erhöhung der Erdwärmesondenanzahl um eine Erdwärmesonde. Die Sondenlänge liegt konstant bei 100 m.

Ein wesentliches Ergebnis der Simulationen ist die Mindestanzahl von Erdwärmesonden, die einen bestimmungsgemäßen Anlagenbetrieb gewährleisten.

### **Erdwärmekörbe und Spiralsonden**

Die Berechnungen/Simulationen wurden für zwei Kriterien, bzw. für zwei Szenarios, durchgeführt:

- **Kriterium/Szenario 1:** Die Eintrittstemperatur in einen Erdwärmekorb oder mehrere Erdwärmekörbe, bzw. eine oder mehrere Spiralsonde(n), muss oberhalb von -5,0 °C liegen

Werden diese Kriterien nicht eingehalten, erfolgt die Erhöhung der Anzahl der Erdwärmekörbe oder Spiralsonden um jeweils einen Erdwärmekorb oder eine Spiralsonde.

Ein wesentliches Ergebnis der Simulationen ist die Mindestanzahl von Erdwärmekörben oder Spiralsonden, die einen bestimmungsgemäßen Anlagenbetrieb gewährleisten.

### **Flächenkollektor**

Für die Simulationen zu den Flächenkollektoren wurden die wesentlichen Kriterien für einen bestimmungsgemäßen Betrieb dieser Wärmeübertragerart mittels Vorabsimulationen und einer Literaturrecherche bestimmt. Entgegen den zulässigen Betriebsbedingungen für Erdwärmesonden, bei denen eine Eisbildung durch Wärmeentzug im Bereich der Sonden vermieden werden muss, um Frost und somit einen dauerhaft reduzierten Wärmeübergang zwischen Wärmeträgerrohr und Umfüllung, aber auch zwischen Umfüllung und Erdreich zu vermeiden, ist eine Eisbildung bei Flächenkollektoren im einem gewissen Umfang zu akzeptieren, in manchen Fällen sogar erwünscht. Würden jedoch das gesamte Kollektorfeld oder Teile mit Eisbildung um die einzelnen Wärmeübertragerrohre zu einem geschlossenen Eisfeld zusammenwachsen, wäre jedem von oben kommendem Wasser der Abfluss versperrt. Um eine ausreichende Versickerung von Wasser zu gewährleisten, sollte die durch einen Flächenkollektor verursachte Eisbildung nicht mehr als einen gewissen Anteil der Gesamtfläche des Flächenkollektors betragen. Im Rahmen der Simulationen wurde eine Eisbildung durch den Flächenkollektor bis zu einem maximalen Flächenanteil von 80 % definiert. Werden diese 80 % überschritten, wird der Flächenkollektor vergrößert und damit die entzogene Wärme auf ein größeres Erdsegment verteilt – und einer Eisbildung entgegengewirkt. Durch dieses Vorgehen dient der Grad der Eisbildung als Dimensionierungskriterium für Flächenkollektoren.

- **Kriterium 1:** Die Austrittstemperatur aus dem Flächenkollektor muss stets  $\geq -5$  °C sein.

- Kriterium 2: Der Anteil der Vereisung auf der Ebene des Flächenkollektors darf maximal 80 % betragen.
- Kriterium 3: Die maximale Fläche des Flächenkollektors darf eine Fläche von  $4 \times A_N$  nicht übersteigen.
  - Einfamilienhaus: max. Fläche des Flächenkollektors: 600 m<sup>2</sup> (gerundet)
  - Mehrfamilienhaus: max. Fläche des Flächenkollektors: 4.224 m<sup>2</sup>

Werden diese Kriterien nicht eingehalten, erfolgt eine Vergrößerung des Flächenkollektors in Schritten von 25 Quadratmetern.

Ein wesentliches Ergebnis der Simulationen ist die Mindestgröße eines Flächenkollektors, die einen bestimmungsgemäßen Anlagenbetrieb gewährleisten.

### Abwasserwärmeübertrager

- Kriterium: maximal zulässige Abkühlung des Abwassers  
Hinweis: die maximal zulässige Abkühlung des Abwassers infolge des Wärmeentzugs durch eine Wärmepumpe ist beim Abwasserentsorger oder der zuständigen Einrichtung/Behörde zu erfragen.

Kann die für einen bestimmungsgemäßen Betrieb der Wärmepumpe dem Abwasser zu entziehende Energie nicht entzogen werden, ohne das Abwasser mehr als maximal zulässig abzukühlen, kann das Konzept in der geplanten Form nicht verwirklicht werden. In diesem Fall kann z. B. der ohnehin im Rahmen der Abwassernutzung als Redundanz benötigte Wärmeerzeuger als zusätzliche Wärmequelle eingebunden und damit die Wärmeversorgung bivalent realisiert werden.

### Brunnen (Grundwasser)

- Kriterium 1: maximal zulässige Abkühlung des Grundwassers
- Kriterium 2: maximal zulässige Fördermenge an Grundwasser  
Hinweis: die maximal zulässige Abkühlung des Grundwassers und die maximal zulässige Fördermenge sind bei der/ den zuständigen Behörde(n), im Allgemeinen der Unteren Wasserbehörde, zu erfragen.

Kann die für einen bestimmungsgemäßen Betrieb der Wärmepumpenanlage dem Grundwasser zu entziehende Energie nicht entzogen werden, ohne dieses mehr als maximal zulässig abzukühlen oder reicht die maximal zulässige Fördermenge nicht aus, um das Konzept in der geplanten Form zu realisieren, ist die Anlage z. B. -wenn möglich- um benötigte Brunnen zu erweitern oder eine zusätzliche Wärmequelle, z. B. ein Gaskessel, in die Wärmeversorgung zu integrieren.

### Luft für Luft-Wasser-Wärmepumpe

- Kriterium 1: minimale für den Betrieb der Anlage mögliche Außenlufttemperatur
- Kriterium 2: systemabhängige Abtaumöglichkeiten und/oder -bedingungen

Kann die für einen bestimmungsgemäßen Betrieb der Wärmepumpenanlage der Umgebungsluft zu entziehende Energie nicht entzogen werden, ist die Leistung des Luft-Wasser-Wärmeübertragers, z. B. durch eine Vergrößerung der Einheit, anzupassen. Kommt es infolge der Umgebungslufttemperatur (und Feuchte) und/oder der Betriebsweise des Luft-Wasser-Wärmeübertragers zu dessen Vereisung, sind die notwendigen Abtaumöglichkeiten und/oder -bedingungen vorzusehen und zu beachten.

## Eisspeicher mit Solar- und Luftabsorber

Bei der Kombination *Eisspeicher mit Solar- und Luftabsorber* dienen zwei miteinander verbundene Anlagenkomponenten zur Bereitstellung von Niedertemperaturwärme aus der Umgebungsluft sowie aus solarer Einstrahlung als Wärmequelle für eine Wärmepumpe. Dabei liegt der Schwerpunkt der Nutzung auf der direkten Verwendung der Umweltwärme sowie Wärmegewinnen aus Solarstrahlung. Energie aus beiden Quellen wird über den Absorber an den Verdampferkreis der Wärmepumpe übertragen. Der Eisspeicher, der durch die Nutzung der Enthalpiedifferenz zwischen gefrorenem und flüssigem Wasser bezogen auf seine Masse und sein Volumen etwa 80 Mal mehr Energie speichern kann als durch die Temperaturerhöhung von flüssigem Wasser um 1 °C, und der im Bereich des Phasenwechsels zudem eine quasi isotherme Wärme- bzw. Kältequelle darstellt, trägt zu weniger als einem Viertel zur Wärmeversorgung der Wärmepumpe bei. Die wesentlichen Gründe für den Betrieb eines Eisspeichers in den betrachteten Konzepten sind die Energiebereitstellung für die Wärmepumpe in Zeiten, wenn aus der Umgebungsluft keine Niedertemperaturwärme zu gewinnen ist und/oder keine solare Einstrahlung den Absorber auf nutzbare Temperaturen erwärmt - sowie durch die Nutzung des Eisspeichers zu Kühlzwecken.

## 9.9 Simulationsergebnisse

Für die Auswertung der Simulationsergebnisse werden die nachfolgend aufgelisteten Parameter für unterschiedliche zeitliche Intervalle analysiert. Dabei beziehen sich die ausgewerteten Daten auf die Werte nach der 3. Heizperiode der Niedertemperaturwärmequelle.

### 1. Gebäude

- Heizwärmebedarf (inkl. flächenbezogener Jahreswert)
- Trinkwassererwärmung (inkl. flächenbezogener Jahreswert)
- Zapftemperatur Trinkwassererwärmung

### 2. Wärmepumpe

- gelieferte Wärmemenge der Wärmepumpe für Raumheizung und Trinkwassererwärmung
- aufgenommene Strommenge der Wärmepumpe
- Jahresarbeitszahl, monatliche Arbeitszahlen
- Vor- und Rücklauftemperatur Heizkreis Raumheizung
- Vor- und Rücklauftemperatur Heizkreis Trinkwassererwärmung

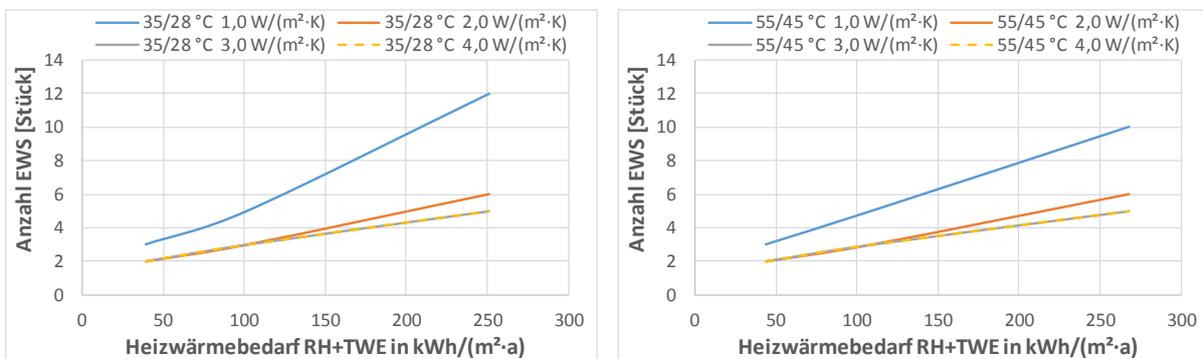
### 3. Niedertemperaturwärmequelle

- Ein- und Austrittstemperatur der Quelle
- entzogene Wärmemenge der Quelle
- Sonderbetrachtungen je nach Quelle (z. B. Eisbildung beim Flächenkollektor, etc.)

Generell werden die sogenannten volumenstrombereinigten Temperaturen ausgewertet. Dies bedeutet, dass nur diejenigen Temperaturen bei der Mittelwertbildung berücksichtigt werden, wenn die jeweilige Umwälzpumpe in Betrieb ist. Zum Schluss erfolgt die Zusammenführung der wesentlichen Parameter einer Niedertemperaturwärmequelle für die simulierte Klimaregion. Die Ergebnisaufbereitung erfolgt anhand von Jahreswerten, monatlichen Werten und Auslegungskenngrößen, die entsprechend ihren Kennzahlen und Kennzahlenfeldern in WP<sub>SOURCE</sub> implementiert werden.

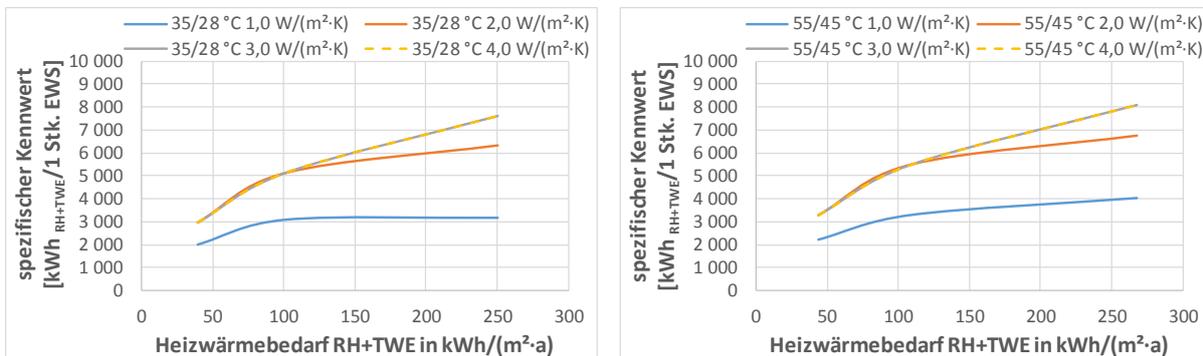
Zum besseren Verständnis erfolgt an dieser Stelle die Erläuterung der Ergebnisse für die Niedertemperaturquelle Erdwärmesonden (EWS). Exemplarisch werden für das Einfamilienhaus am Standort Potsdam (Referenzklimaregionen 04) die entsprechenden Kenndaten dargestellt, jeweils für zwei Temperaturniveaus der Raumheizung (35/28 °C Fußbodenheizung und 55/45 °C Heizkörper).

Aus der Simulationsmatrix ergibt sich die jeweilige Anzahl der Erdwärmesonden, welche für das entsprechende Einfamilienhaus für unterschiedliche Wärmedämmstandards benötigt werden, siehe Abbildung 45. Für die jeweilige Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs können in Abhängigkeit des Temperaturniveaus der Raumheizung und des Heizwärmebedarfs für Raumheizung und Trinkwassererwärmung die benötigte Anzahl an Erdwärmesonden abgelesen werden. Prinzipiell unterscheiden sich die Ergebnisse von Wärmeleitfähigkeit 3,0 W/m<sup>2</sup>·K und 4,0 W/m<sup>2</sup>·K nicht wesentlich. Daher liegen die beiden Kurven übereinander. Eine Erdwärmesonde hat eine Länge von 100 m.



**Abbildung 45** Simulationsergebnis Erdwärmesonden (EWS) nach TRNSYS 17 für das Einfamilienhaus für Referenzklimaregion 04 – ermittelte Anzahl an Erdwärmesonden in Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Erdreichs für zwei verschiedene Temperaturniveaus (links: 35/28 °C | rechts: 55/45 °C)

Aus der Anzahl der Erdwärmesonden entwickelt sich ein weiterer wesentlicher Kennwert. Dabei wird der Heizwärmebedarf für Raumheizung (RH) und Trinkwarmwasser (TWE) auf die Anzahl der erforderlichen Erdwärmesonden normiert, siehe Abbildung 46. Dieser spezifische Kennwert dient maßgeblich der Auslegung der Niedertemperaturwärmequelle in WP<sub>SOURCE</sub>.



**Abbildung 46** Simulationsergebnis Erdwärmesonden (EWS) nach TRNSYS 17 für das Einfamilienhaus für Referenzklimaregion 04 – ermittelte Auslegungskennwerte (Quotient aus Heizwärmebedarf Raumheizung und Trinkwassererwärmung zu einer Erdwärmesonde mit 100 m Länge) in Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Erdreichs für zwei verschiedene Temperaturniveaus (links: 35/28 °C | rechts: 55/45 °C)

Die in Abbildung 47 dargestellten Temperaturverläufe der monatlichen Fluidtemperaturen am Austritt des Erdwärmesondenfeldes stellen einen Ausschnitt dar. Der spezifische Heizwärmebedarf der Raumheizung liegt in der gewählten Darstellung bei 15, 75 und 200 kWh/m<sup>2</sup>·a. Für eine bessere Übersicht erfolgt die Darstellung der einzelnen Wärmeleitfähigkeiten des Erdreichs in mehreren Diagrammen. Die Ähnlichkeit der entsprechenden Kurvenverläufe resultiert aus den definierten Randbedingungen der Systemsimulationen (Abbruchkriterien).

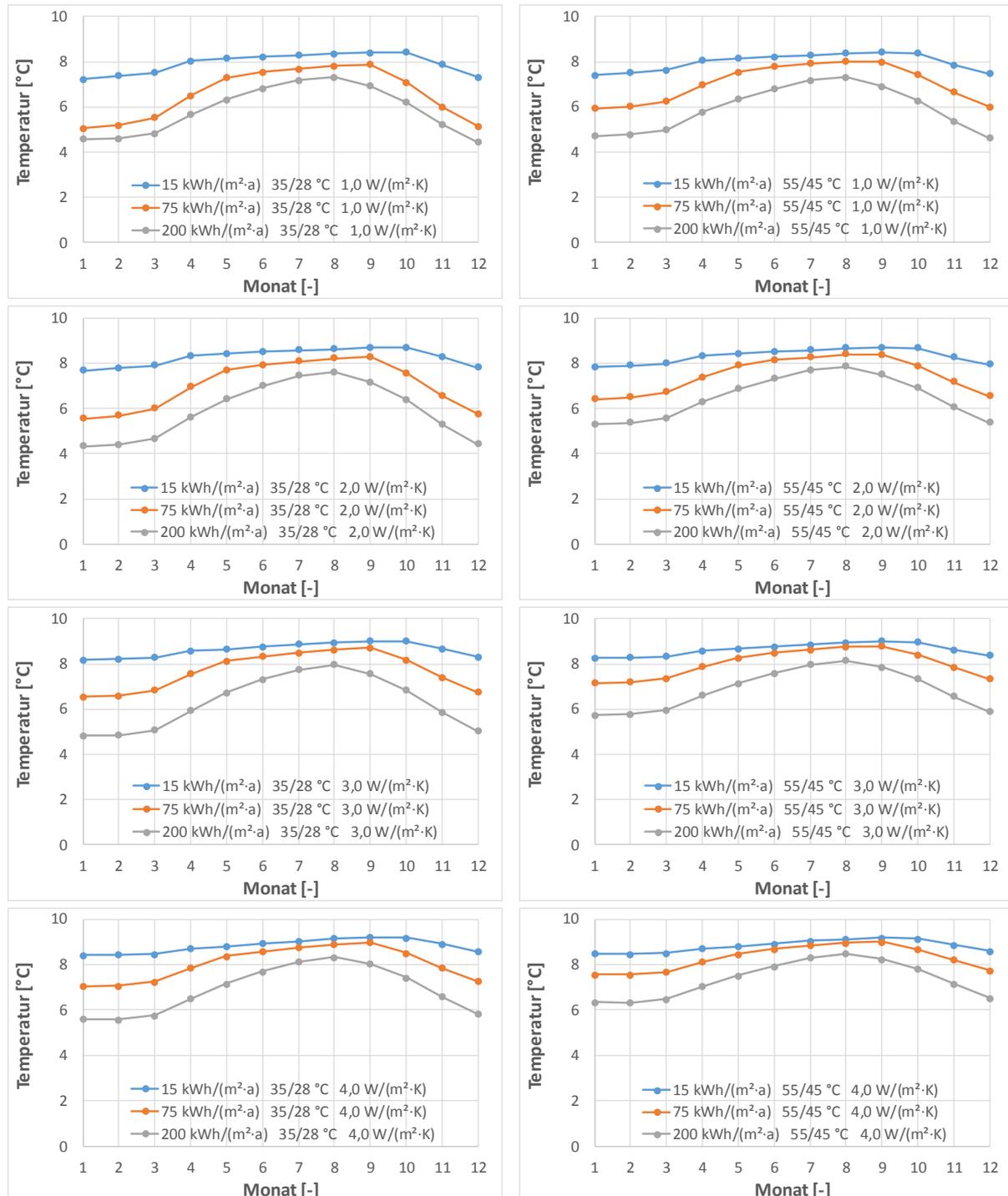
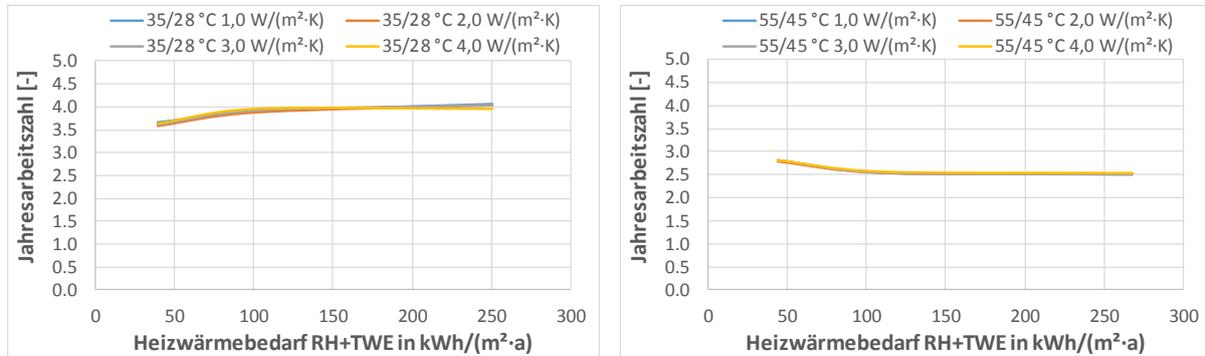


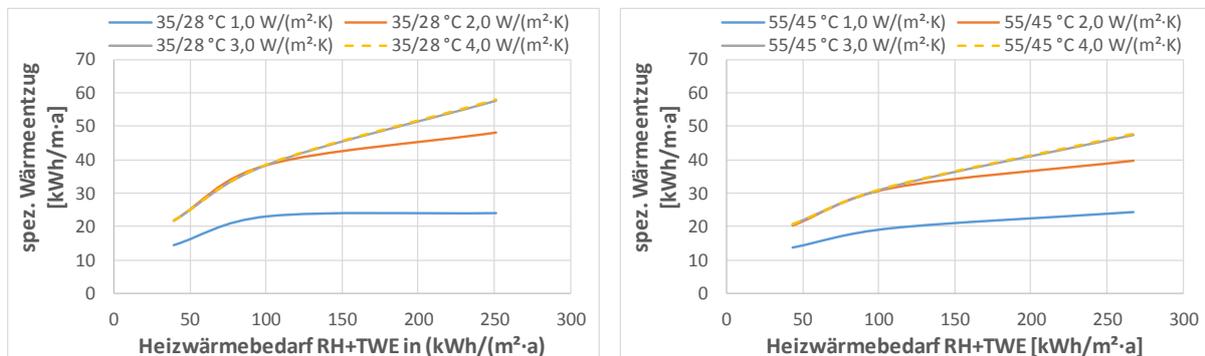
Abbildung 47 Simulationsergebnis Erdwärmesonden (EWS) nach TRNSYS 17 für das Einfamilienhaus für Referenzklimaregion 04 – ermittelte monatliche Fluidtemperaturen am Austritt des Erdwärmesondenfeldes in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs für zwei verschiedene Temperaturniveaus (links: 35/28 °C | rechts: 55/45 °C)

Unter den in den Simulationen angesetzten Randbedingungen (Systemtemperaturen, etc.) ergeben sich unter Berücksichtigung des Strombedarfs der Umwälzpumpe für die Erdwärmesonden die entsprechenden Jahresarbeitszahlen, siehe Abbildung 48. Diese werden zum Abgleich mit  $WP_{SOURCE}$  ebenfalls dokumentiert und ausgewertet.



**Abbildung 48** Simulationsergebnis Erdwärmesonden (EWS) nach TRNSYS 17 für das Einfamilienhaus für Referenzklimaregion 04 – ermittelte Jahresarbeitszahlen in Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs sowie der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs für zwei verschiedene Temperaturniveaus (links: 35/28 °C | rechts: 55/45 °C)

Neben den bereits genannten Kennwerten werden auch die spezifischen Wärmeentzugskennwerte ermittelt. Hierbei wird die jährliche Wärmeentzugsmenge aus dem Erdreich auf die Gesamtlänge des Erdwärmesondenfeldes bezogen, siehe Abbildung 49.



**Abbildung 49** Simulationsergebnis Erdwärmesonden (EWS) nach TRNSYS 17 für das Einfamilienhaus für Referenzklimaregion 04 – ermittelte spezifische Wärmeentzugsmengen pro Meter Sondenlänge in Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs sowie der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs für zwei verschiedene Temperaturniveaus (links: 35/28 °C | rechts: 55/45 °C)

Die hier dargestellten Simulationsergebnisse gelten für einen Standort, hier Referenzklimaregion 04 (Wetterstation Potsdam). Zur Umrechnung auf andere Klimaregionen werden anhand der Simulationsdaten Korrekturfaktoren ermittelt. Dies erfolgt hauptsächlich bei den oberflächennahen Systemen (< 10 m Tiefe) wie Flächenkollektoren, Erdwärmekörbe und Spiralsonden. Ausgangspunkt sind die Außenlufttemperatur, die Globalstrahlung sowie die Sonnenlufttemperatur der entsprechenden Klimaregionen. Klimaregion 11 (Erzgebirge, Böhmer- und Schwarzwald oberhalb 1.000 m) mit Station Fichtelberg bleibt dabei unberücksichtigt.

Abbildung 50 stellt den Unterschied der simulierten Kollektorfläche bei den Flächenkollektoren für Klimaregion 04 (Station Potsdam) und 10 (Station Hof) dar. Durch das entsprechend kältere Klima wird eine deutlich größere Fläche am Standort Hof benötigt. Durch Interpolation kann die entsprechende Kollektorfläche für jeden Standort unter Berücksichtigung des ermittelten Klimakorrekturfaktors ermittelt werden.

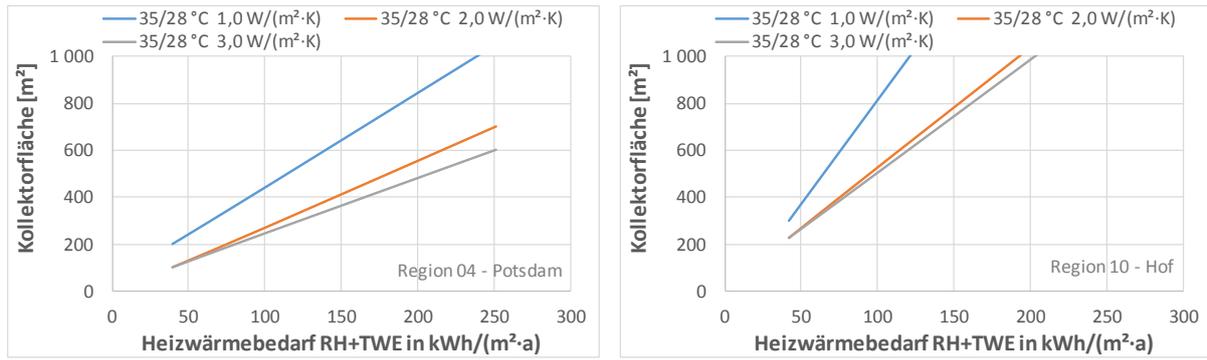


Abbildung 50 Simulationsergebnis Flächenkollektoren (FK) nach TRNSYS 17 für das Einfamilienhaus für Referenzklimaregion 04 und 10 – ermittelte Kollektorfläche in Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Erdreichs für das Temperaturniveau 35/28 °C der Raumheizung (Fußbodenheizung)

## 10 VORDIMENSIONIERUNGSPROGRAMM WP<sub>SOURCE</sub> (AP8)

Um die Vorplanung von Wärmepumpenanlagen zu erleichtern, ist eine übersichtliche und projektbezogene Zusammenstellung verschiedener Niedertemperaturwärmequellen und zugehöriger Wärmeübertragersysteme hilfreich. Daher war die Idee eine Zusammenstellung von zurzeit relevanten Niedertemperaturwärmequellen für Wärmepumpen und zugehöriger Wärmeübertragersysteme zu erarbeiten, deren Leistungsfähigkeit, Effizienz und Wirtschaftlichkeit an beliebigen Standorten in Deutschland abzuschätzen und sämtliche Daten und Erkenntnisse in einer für den Planungsalltag geeigneten Form zur Verfügung zu stellen.

Das in diesem Zusammenhang entwickelte Vorauslegungsprogramm WP<sub>SOURCE</sub> ermöglicht eine Vorauswahl von Niedertemperaturwärmequellen und -wärmeübertragersystemen für Wärmepumpen für vom Planer definierte Anwendungsfälle. Auf der Grundlage der im Vorfeld analysierten Anlagenvarianten und gewonnener Mess- und Simulationsergebnisse werden, in Abhängigkeit der gewählten Gebäudetypologie und des jeweiligen thermischen Standards des Gebäudes, für vordefinierte Niedertemperaturwärmequellen verfügbare Wärmeübertragersysteme überschlägig dimensioniert und bewertet. Hierzu gehören auch die wirtschaftliche Beurteilung (Investitionskosten, Jahresgesamtkosten) sowie die Ermittlung der Klimaschutzpotentiale (CO<sub>2</sub>-Emissionen, Primärenergiebedarf).

Der Einsatzbereich des Programms liegt bei der Grundlagenermittlung sowie der Planung und Erstellung von Energiekonzepten für Gebäude in Architektur- und Ingenieurbüros. Dabei steht die Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpe im Vordergrund. Im Hinblick auf die Nutzung einer ausgewählten Niedertemperaturquelle informiert WP<sub>SOURCE</sub> auch über entsprechende Randbedingungen für den jeweiligen Einsatz. Hierzu gehören z. B. die Einhaltung von Schallschutzanforderungen bei Luft-Wasser-Wärmepumpen oder die Forderung nach im Vorfeld durchzuführenden Pumpversuchen bei der Nutzung von Grundwasser als Wärmequelle und/oder -senke.

Derzeit umfasst WP<sub>SOURCE</sub> Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Bürogebäude. Bei den Wohngebäuden werden Wärmepumpensysteme zur Gebäudebeheizung und Trinkwassererwärmung abgebildet. Für die Typologie Bürogebäude erlaubt das Programm zurzeit nur die Abbildung der Raumheizung. Die Abbildung von Klimakälte ist derzeit nicht möglich. Wie bei Nichtwohngebäuden allgemein üblich, kann die Trinkwassererwärmung in Bürogebäuden über dezentral angeordnete elektrische Durchlauferhitzer erfolgen. Ein Kältebedarf in Wohngebäuden, der in den meisten Fällen auf architektonische Gegebenheiten oder hohe Komfortansprüche zurückzuführen ist, wird nicht in das Programm integriert.

Abbildung 51 zeigt beispielhaft die Benutzeroberfläche von WP<sub>SOURCE</sub>. Bei der Entwicklung wird auf Übersichtlichkeit und eine benutzerfreundliche Bedienbarkeit geachtet. Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die Methodik der Entwicklung und den Aufbau des Programms. Erläuterungen zur Ermittlung der Investitionskosten runden dieses Kapitel ab.

The image displays three screenshots of the WP\_SOURCE software interface, illustrating the user interface for different stages of a simulation project.

**Screenshot 1: WP\_SOURCE - 1. Auslegung Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdwärmekörpern (EWK) - konische Bauform**

Project: Wohnen am Musterpark, Ort: Musterstadt

Grundlagen  
 Auslegung

NRF (Nettoremfläche)	139 m <sup>2</sup>	30 W/m <sup>2</sup> sur
Herstellung Gebäude und TWE	4.2 kW	
Wärmebedarf Heizung	4 269 kWh/a	31 kWh/(m <sup>2</sup> sur-a)
Wärmebedarf TWE	1 760 kWh/a	13 kWh/(m <sup>2</sup> sur-a)
Summe Wärmebedarf	6 029 kWh/a	43 kWh/(m <sup>2</sup> sur-a)

Wärmepumpenauslegung - Heizen

Auslegungspunkt  
 Wärmepumpe

Heizleistung	5 kW
Quellentemperatur	-5 °C
Vorlauftemperatur	40 °C
Leistungsanzahl (COP)	3.6
Leistungsaufnahme	1.4 kW

Bodenart  
 Wärmeleitfähigkeit: 2.0 W/(m·K)

Ermittlung  
 Jahresarbeitszahl (JAZ)  
 Strombedarf (Umwälzpumpe Quelle): 13 kWh/a

Arbeitszahl (AZ) [-]

Monat	T <sub>amb</sub> [°C]	VL WP [°C]	T <sub>sohl</sub> [°C]	AZ [-]
1	2.4	34.0	-2.8	4.4
2	2.6	33.9	-3.2	4.4
3	4.6	34.0	-2.2	4.5
4	9.2	38.6	1.6	4.4
5	13.4	50.0	4.9	3.6
6	15.6	50.0	7.9	3.9
7	18.2	50.0	10.3	4.1
8	17.9	50.0	11.2	4.2
9	14.3	50.0	11.0	4.1
10	10.0	43.4	9.2	4.7
11	6.1	33.9	4.8	5.4
12	2.8	33.9	0.1	4.8
<b>Mittelwert</b>	<b>9.8</b>	<b>33.9</b>	<b>4.4</b>	

**Screenshot 2: WP\_SOURCE - VI. Auswahl Heizsystem**

Project: Wohnen am Musterpark, Ort: Musterstadt  
 Anwendungsfall "Heizen" bei Wohngebäude

Auswahl Heizsystem

Systemauswahl: 1 | Fußbodenheizung | 35/08 °C

Anteil Fußbodenheizung System 4: 25 % \*)  
 \*) Der Anteil muss zwischen 0 und 100 % liegen.

Vorlauftemperatur: TVL = 35 °C  
 Rücklauftemperatur: TRL = 28 °C  
 Rücklauftemperatur WP: TRL = 33 °C

Benennung Temperaturniveau Heizen

Auswahl Temperaturniveau: Systemauswahl: Vorlauftemperatur nach H

Vorlauftemperaturniveau: Vorlauftemperatur WP: TVL = 40 °C im Aus  
 in Abhängigkeit der: Normalaußentemperatur: T<sub>a,N</sub> = -14 °C

Temperatur [°C]

Monat	T <sub>amb</sub> [°C]	T <sub>sohl</sub> RH [°C]	T <sub>sohl</sub> TWE [°C]	T <sub>sohl</sub> WP [°C]
1	2.4	31.6	50.0	34.0
2	2.6	31.5	50.0	33.9
3	4.6	30.4	50.0	34.0
4	9.2	27.9	50.0	38.6
5	13.4	35.6	50.0	50.0
6	15.6	24.4	50.0	50.0
7	18.2	22.9	50.0	50.0
8	17.9	23.0	50.0	50.0
9	14.3	25.1	50.0	50.0
10	10.0	27.5	50.0	43.4
11	6.1	29.6	50.0	33.9
12	2.8	31.4	50.0	33.9
<b>Mittelwert</b>	<b>9.8</b>	<b>27.6</b>	<b>50.0</b>	<b>41.8</b>

**Screenshot 3: WP\_SOURCE - Ia. Geografische Angaben**

Project: Wohnen am Musterpark, Ort: Musterstadt

Ort

Postleitzahl (PLZ): 38106  
 Ort: Braunschweig  
 Landkreis: Braunschweig, Stadt  
 Bundesland: Niedersachsen

Klimaregion: Neg\_03  
 Klimazone: Nordwestdeutsches Tiefland  
 Jahresmittel Außentemperatur: 9.8 °C

Grundstück

Grundstücksfläche	Breite	Länge	fläche	Bemerkungen
0 m	0 m	20 m	600 m <sup>2</sup>	
0 m	0 m	0 m	0 m <sup>2</sup>	
0 m	0 m	0 m	0 m <sup>2</sup>	
0 m	0 m	0 m	0 m <sup>2</sup>	
0 m	0 m	0 m	0 m <sup>2</sup>	

Abzugsfläche 1  
 (z.B. Gebäude, Wege, Garage, ...)

Abzugsfläche 1	Breite	Länge	fläche	Bemerkungen
15 m	10 m	150 m <sup>2</sup>		
5 m	10 m	50 m <sup>2</sup>		
0 m	0 m	0 m <sup>2</sup>		
0 m	0 m	0 m <sup>2</sup>		

nutzbare Grundstücksfläche: 400 m<sup>2</sup>  
 Hinweis: Die Überbaubarkeit der jeweiligen Niedertemperaturwärmequelle ist separat zu prüfen.

Bodenart

Wärmeleitfähigkeit: 2.0 W/(m·K) für oberflächennahe Systeme bis 10 m Tiefe  
 Wärmeleitfähigkeit: mittel - 2 W/(m·K) für Erdwärmesonden  
 Hinweis: Angaben finden Sie in den entsprechenden Karten der Grund- und Bodenämter.

WP\_SOURCE - Ib. Gebäudekenndaten

Project: Wohnen am Musterpark, Ort: Musterstadt

Gebäudetyp

Gebäudekategorie: Einfamilienhaus (bitte auswählen)  
 Gebäudeunterteilt: nein (bitte auswählen)

Abbildung 51 Benutzeroberfläche von WP\_SOURCE, Beispiele für die Bildschirmoberfläche

## 10.1 Von der Grundlagenermittlung zur Bewertung und Auslegung

Die Simulationsstudie (AP 4) und die Ausarbeitung des Programms (AP 8) liegen inhaltlich eng beieinander. Aus diesem Grund erfolgen schon zu Beginn die Ausarbeitung einer Entwicklungsstrategie, Festlegungen zum grundsätzlichen Aufbau und der Methodik des Programms sowie die Definition der Inhalte. Es werden insgesamt vier Arbeitsblöcke als Struktur definiert und im Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel® umgesetzt.

### 1. Programminweise

- Anleitung
- Einstellungen
- Glossar

### 2. Eingabe

- allgemeine Projektdaten
- Ort / Gebäude
- Heizen (Heizwärmebedarf, Heizleistung)
- Kühlen (Kühlenergiebedarf, Kühlleistung)
- Trinkwassererwärmung
- Heizsystem Wohngebäude
- Heiz- und Kühlsystem Bürogebäude
- Strombedarf Haushalt / Strombedarf Bürogebäude

### 3. Ausgabe

- Energiebedarf
- Auslegung, Wirtschaftlichkeit, ökologische Bewertung für jede Wärmequelle bzw. jeden Wärmeübertrager (Luft-Wasser-Wärmepumpe, Flächenkollektor, Erdwärmekorb, Spiralsonde, Erdwärmesonde, Eisspeicher mit Solar- und Luftabsorber, Grundwasser, Abwasser)
- Gesamtüberblick zu den Wärmequellen und -übertragern

### 4.) Berechnungsgrundlagen (nicht sichtbar für den Programmnutzer)

- Klimadatenbank, Kennwerte Gebäude (Heizen und Kühlen), Strombedarfskennzahlen
- Bodenkennwerte, Kenndatenbank Wärmequellen, Kenndatenbank Wärmepumpen
- Kostenkennwerte, ökologische Kennwerte

In der erarbeiteten und umgesetzten Programmstruktur werden im ersten Schritt sog. „Dummy-Werte“ hinterlegt. Dies betrifft z. B. Kennlinienfelder für elektrische Wärmepumpen sowie Parameter und Kennlinienfelder aller Wärmequellen. Entsprechend dem Ergebnisfortschritt bei den Simulationsrechnungen werden die hinterlegten „Dummy-Werte“ durch Resultate aus den Simulationen ersetzt und ergänzt.

Abbildung 52 zeigt die Entwicklungsstufen der Bearbeitung des Programms „WP<sub>SOURCE</sub>“. Zu den ersten Simulationsergebnissen die eingepflegt werden, gehören die Klimadatenbank, die Bestimmung der statistischen Verteilung der Heizwärmebedarfe in Abhängigkeit der Heizgrenztemperaturen und die Abschätzung der Heizleistungen (Programmvorschlagn). Darüber hinaus werden eine Postleitzahleuzuordnung und Kennlinienfelder für elektrische Wärmepumpen sowie eine Wärmequellendatenbank in das Programm implementiert. Anfangs besteht die Wärmequellendatenbank im Wesentlichen aus Werten, die der Literatur und einschlägigen Normen entnommen werden.

In einem umfangreichen Prozess wurden und werden Referenzgebäude mit unterschiedlichen Wärmepumpen und Niedertemperaturwärmequellen/Wärmeübertrager-Kombinationen sowie teilweise variierenden Randbedingungen (z. B. Erdreichparameter) an verschiedenen Standorten in Deutschland numerisch simuliert. Die Ergebnisse der simulationstechnisch analysierten Systeme sowie daraus abgeleitete Korrelationen und Funktionen werden in das Programm eingepflegt.

Mit der Einarbeitung der Kennlinienfelder der Wärmequellen und der Kostenkennwerte erfolgt die Gestaltung der Benutzeroberfläche. Obwohl anfänglich eine externe Programmierung in Betracht gezogen wurde, wird zur Gewährung des uneingeschränkten Zugriffs durch das Entwicklerteam an der Programmentwicklung mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel® festgehalten. Hierzu werden verschiedene Operationen mit Hilfe der Programmiersprache VBA (Visual Basic for Applications) als sogenannte Makros in das Programm implementiert. Hierzu gehören unter anderem:

- Aus- und Einblenden von Zeilen und Spalten bei Anwahl einer Berechnungsmethode
- Auswahl und Schutz von Eingabefeldern und deren Sichtbarkeit
- Überprüfung der Eingabeparameter auf ihre Eingabebereiche und Ziffernformate

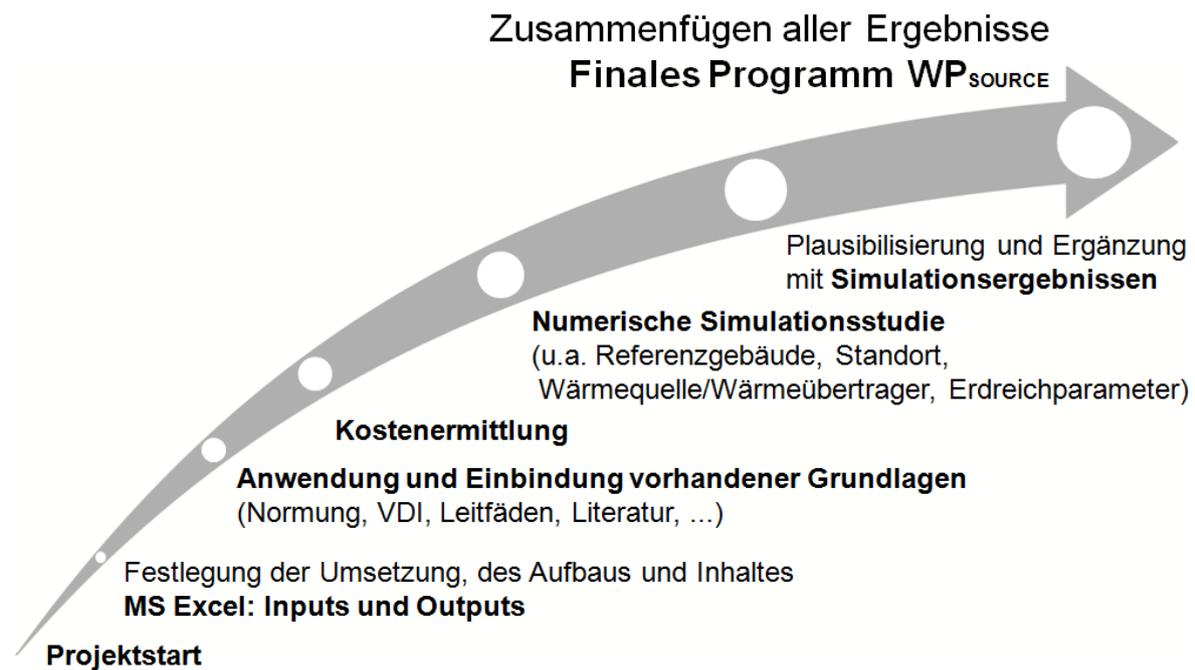


Abbildung 52 Workflow - Ablauf der Programmentwicklung

### Anmerkung

Auf der Grundlage der im Forschungsprojekt future:heatpump untersuchten Anlagenvarianten sowie Messdaten und Simulationsergebnissen, aber auch technischer Rahmenbedingungen bzw. hersteller- und anbieterspezifischer Angaben werden Umsetzungsempfehlungen für Niedertemperaturwärmequellen und dazu passende Wärmeübertrager und Wärmepumpen für die betrachteten Gebäudetypologien und -standards abgeleitet und zusammen mit deren Effizienz dokumentiert.

Dabei stellen Simulationsergebnisse eine wesentliche Grundlage zur Bewertung, Vorauswahl und Dimensionierung durch WP<sub>SOURCE</sub> dar. Die Simulationen erweitern zudem die Programmoptionen und Gültigkeitsbereiche zur Auswahl und Vordimensionierung der Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager. Das Programm WP<sub>SOURCE</sub> dient jedoch ausschließlich der überschlägigen Ermittlung von Kennwerten und ersetzt keine Berechnung und/oder Dimensionierung der Niedertemperaturwärmequellen und der betreffenden Wärmeübertrager.

## 10.2 Aufbau und Methodik von WP<sub>SOURCE</sub>

Die im Kapitel 10.1 gezeigte Blockstruktur wird prinzipiell auch beim Aufbau und dem methodischen Vorgehen von WP<sub>SOURCE</sub> beibehalten. Abbildung 53 zeigt den vereinfachten Aufbau des Programms sowie die Struktur des Informationsflusses. Um die Nutzung des Programms durch einen weiten Personenkreis zu ermöglichen sowie unterschiedlichen Detaillierungsgraden und Gesichtspunkten bei den Projektierungen und Planungen von Wärmepumpenanlagen Rechnung zu tragen, ist Flexibilität und Vielseitigkeit bei den Einstellungen und Eingaben ein wesentliches Merkmal von WP<sub>SOURCE</sub>. Zusammen mit der nutzerfreundlichen Oberfläche und Bedienung sollen Kommentare und Hilfstexte die Verwendung zudem erleichtern und Eingabefehler verhindern.

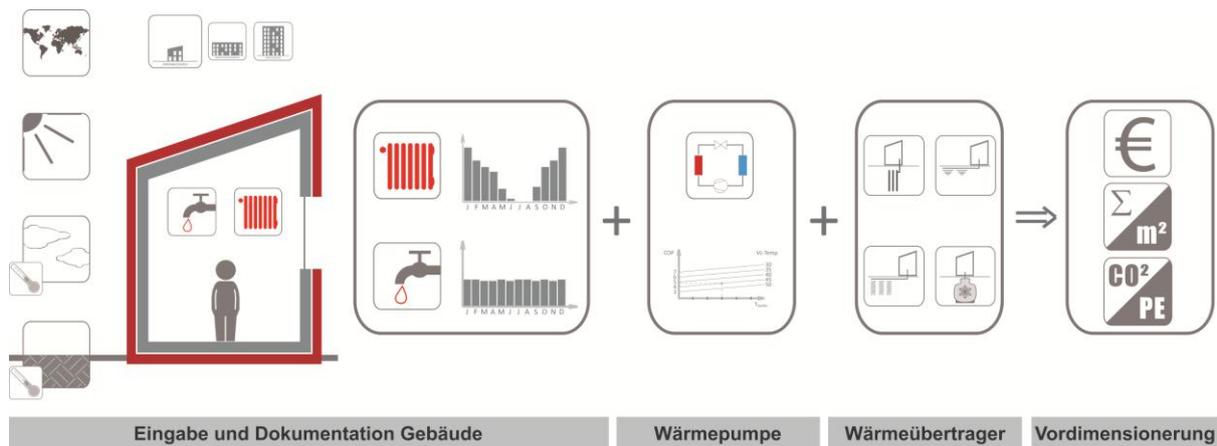


Abbildung 53 Schema zum Aufbau und Informationsfluss in WP<sub>SOURCE</sub>

Mittels Optionsschaltflächen (sog. Radiobuttons) kann der Anwender die für sein Projekt geeigneten Voreinstellungen und grundsätzliche Festlegungen treffen. Wo inhaltlich vertretbar, werden vom Anwender nicht spezifizierte Angaben programmintern mit Standardwerten belegt. Im nun folgenden Abschnitt werden die entsprechenden Strukturblöcke näher erläutert. Dabei wird auch auf die entsprechende Methodik detailliert eingegangen.

### 1. Schritt: Eingabe und Dokumentation des Projektes bzw. des Gebäudes

Die Bedienung von WP<sub>SOURCE</sub> beginnt mit der Dokumentation und Spezifikation der Ausgangssituation und der Rahmenbedingungen des jeweiligen Projektes. Nach der Möglichkeit zur Eingabe allgemeiner Projektdaten (z. B. Projektbezeichnung und Standort) gibt der Nutzer bekannte Kennwerte wie etwa die Grundstücksfläche, den Gebäudetyp (Ein- oder Mehrfamilienhaus oder Bürogebäude) und dessen thermischen Standard sowie ggf. Energiebedarfswerte, die Nettogrundfläche des Gebäudes und/oder ähnliches ein, siehe Abbildung 54. Darüber hinaus trifft der Nutzer bezüglich des auszulegenden Heiz- und/oder Kühlsystems erste Annahmen. Aus diesen Eingaben und weiteren, projektspezifischen Auswahlmöglichkeiten zum Gebäude, wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf (die Heiz- und Kühllast) ermittelt.

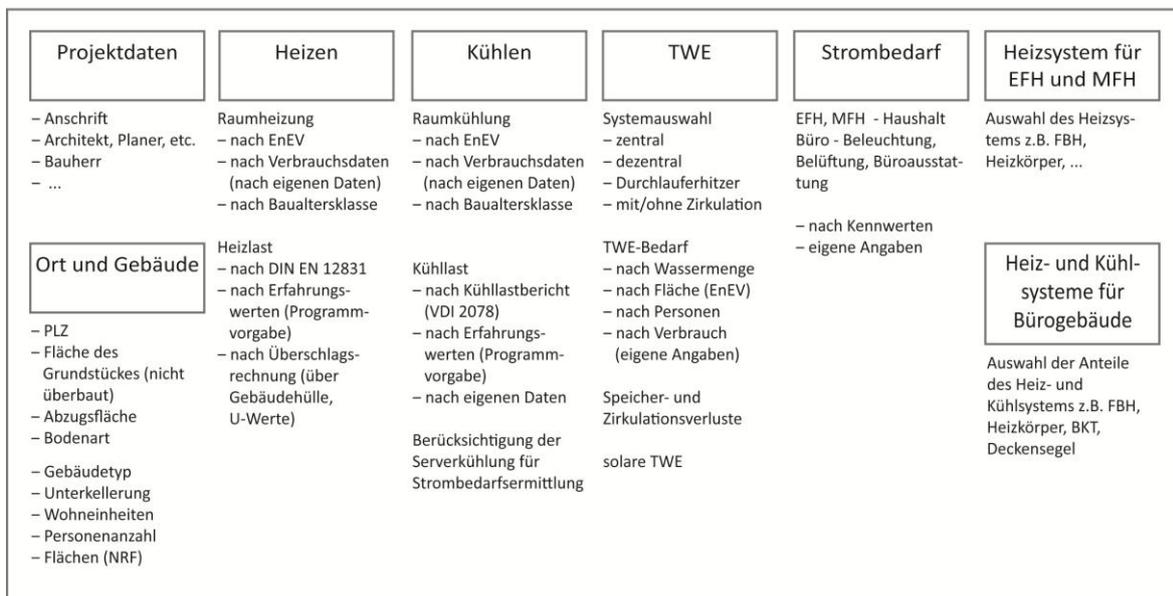


Abbildung 54 Schematischer Aufbau der Eingabeblöcke des Programms WP<sub>SOURCE</sub>

Die Beschreibung des Gebäudes und dessen thermischer Standard sind durch unterschiedliche Herangehensweisen möglich. Grundsätzlich kann sowohl ein Anwender mit detaillierten Kenntnissen zu den Rahmenbedingungen eines Projektes und die zu erstellende Wärmepumpenanlage ebenso von  $WP_{SOURCE}$  profitieren, wie ein Anwender mit nur groben Projektinformationen. Je nach Informationsstand kann der Nutzer das Gebäude z. B. durch Angaben aus einer EnEV-Bilanzierung, durch eigene Angaben zum Heizenergieverbrauch oder an Hand der Baualtersklasse definieren. Auch für die Definition eines Trinkwarmwasserbedarfs bei den Wohngebäuden oder eines in einer späteren Programmversion integrierten Kühlenergie- und Kühllastbedarfs bei den Bürogebäuden, stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung.

In Bezug auf die Trinkwassererwärmung hat der Nutzer die Möglichkeit verschiedene Systeme auszuwählen, z. B. zentrale oder dezentrale Warmwasserbereitung mit oder ohne Zirkulation sowie verschiedene Temperaturniveaus. Es besteht auch die Möglichkeit, eine solare Trinkwassererwärmung zu berücksichtigen. Abschließend hat der Nutzer bei Wohngebäuden die Option den Haushaltsstrombedarf bzw. bei Bürogebäuden den diesbezüglichen Strombedarf zu definieren. Einige Temperaturen und Bedarfswerte des ersten Eingabeblocks sind schematisch in Abbildung 55 dargestellt.

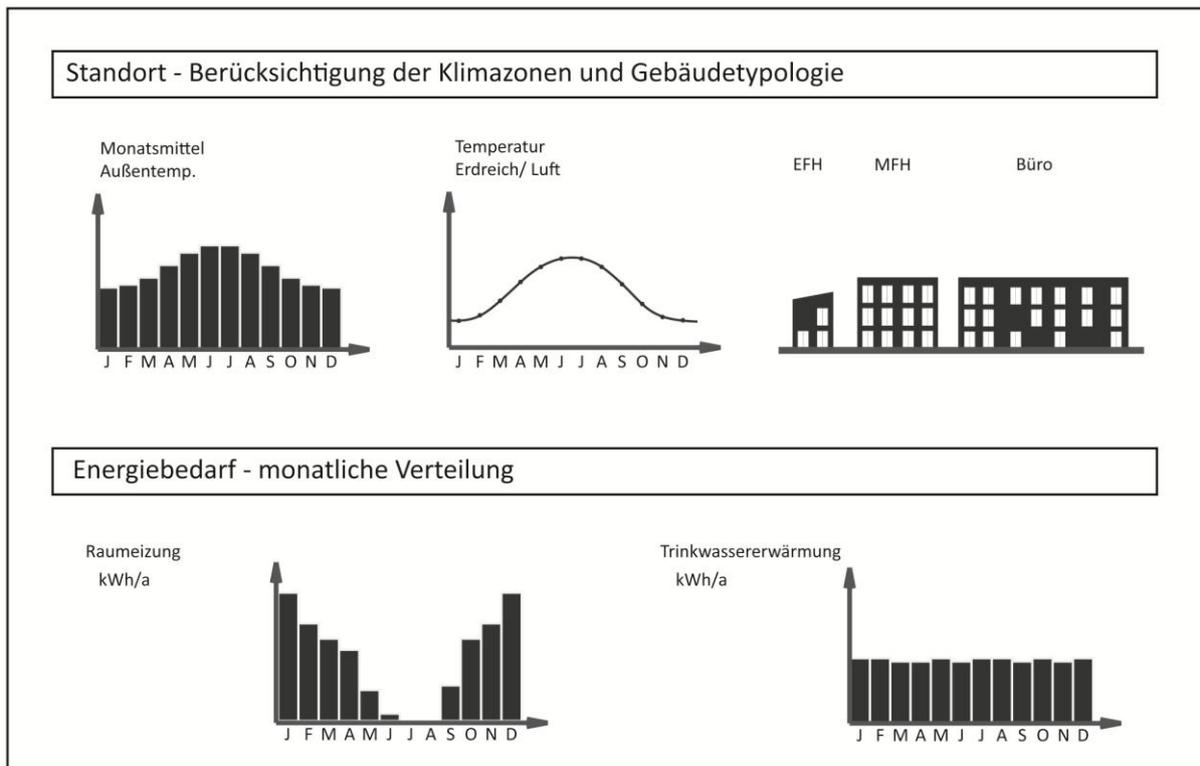


Abbildung 55 Schematische Darstellung der in  $WP_{SOURCE}$  visualisierten Angaben aus dem ersten Eingabeblock

## 2. Schritt: Wärmepumpe

Entsprechend des Heizleistungsbedarfs der verschiedenen Gebäude verwendet  $WP_{SOURCE}$  unterschiedliche Wärmepumpen. Die Kenndaten dieser Wärmepumpen werden aus Daten einer Vielzahl von zurzeit am Markt relevanten Geräten generiert. Die zur Integration in das Programm rechnerisch generierten Geräte mit unterschiedlichen Leistungen repräsentieren Wärmepumpen mittlerer Güte und dienen zu programminternen Berechnungen, z. B. von direkt auf eine Wärmepumpe bezogene Größen, wie etwa der Arbeitszahl. Um im Rahmen der numerischen Simulationen Wärmepumpen mit gleicher Charakteristik wie im Programm  $WP_{SOURCE}$  zu

berücksichtigen, werden entsprechend der benötigten Leistungen die Kennwerte der in  $WP_{SOURCE}$  verwendeten Referenzwärmepumpen auch in die Systemsimulationen implementiert.

Infolge des gewählten Projektstandortes ergeben sich klimatische Randbedingung und daraus, unter Berücksichtigung des Gebäudes, dessen thermischen Standards und der entsprechend abgeleiteten Heizkurve, die Zuordnung der monatlichen Vorlauftemperatur der Wärmepumpe für das gewählte Heizsystem (z. B. Fußbodenheizung). Alternativ dazu kann eine konstante Vorlauftemperatur gewählt werden. Für die Trinkwassererwärmung wird das entsprechende mittlere monatliche Vorlauf-temperaturniveau der Wärmepumpe aus den zugehörigen Eingaben abgeleitet. Neben anderen Daten stehen aus den Simulationsrechnungen für alle Niedertemperaturwärmequellen bzw. -übertrager monatliche Fluidtemperaturen bei unterschiedlichen Randbedingungen (z. B. Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs etc.) in einer Datenbank zur Verfügung. Über das Kennlinienfeld der Wärmepumpe und mit Hilfe des Temperaturniveaus der Niedertemperaturwärmequelle sowie dem mittleren Vorlauftemperaturniveau aus Raumheizung und Trinkwassererwärmung wird die monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpe bestimmt, siehe Abbildung 56.

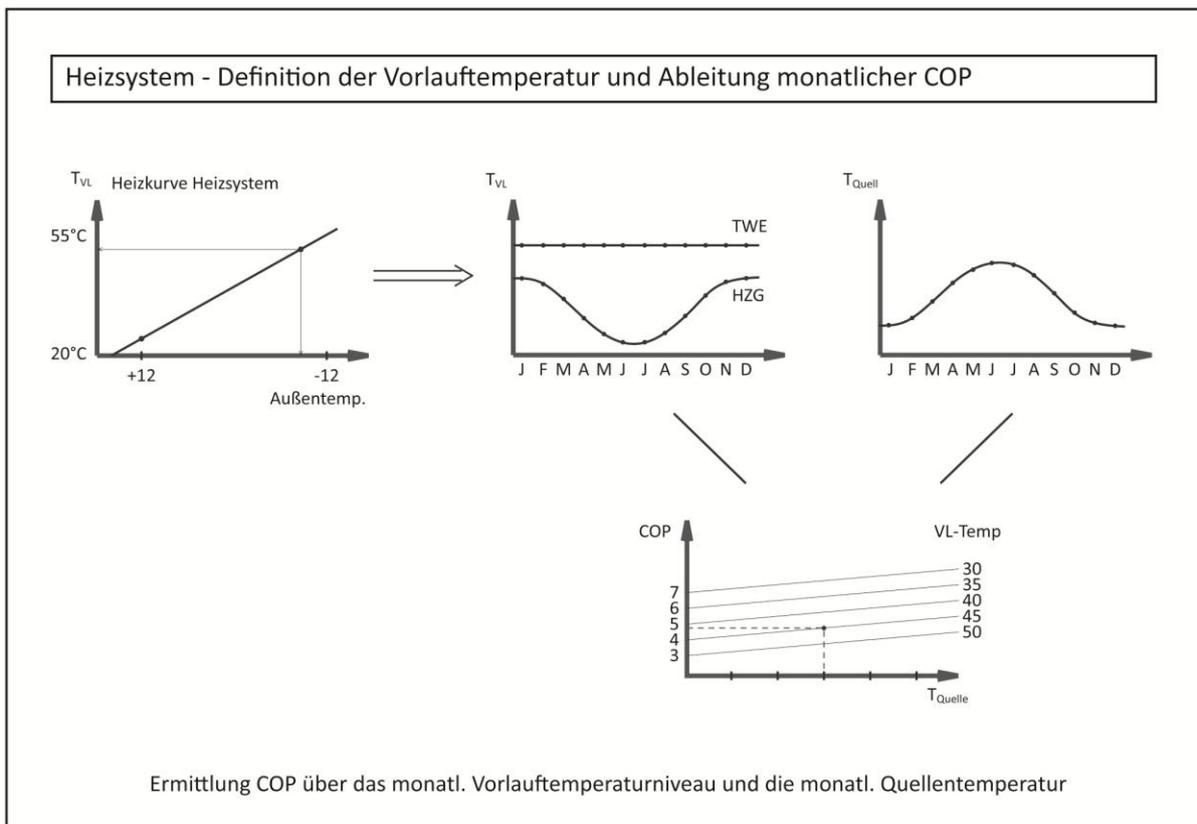


Abbildung 56 Vereinfachte schematische Darstellung zur Ermittlung der monatlichen Arbeitszahl aus dem mittleren Vorlauf-temperaturniveau der Wärmepumpe und der durchschnittlichen, monatlichen Quelltemperatur

### 3. Schritt: Niedertemperaturwärmequelle

Über die mittlere monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpe und den ermittelten monatlichen Wärmebedarf für Raumheizung und zur Trinkwassererwärmung wird die benötigte, der Niedertemperaturwärmequelle zu entziehende, Energiemenge berechnet. Diese sog. „Entzugsenergie“ bildet eine wesentliche Grundlage zur Auswahl und zur (überschlägigen) Dimensionierung der Niedertemperaturwärmequelle, siehe Abbildung 57.

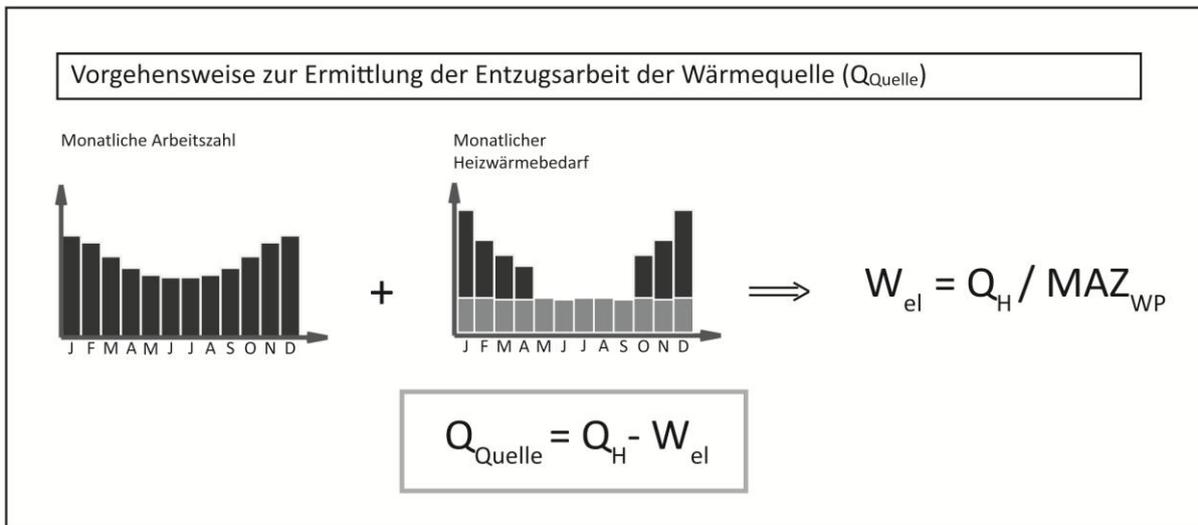


Abbildung 57 Schematische Darstellung zur Ermittlung des monatlichen Wärmeentzugs aus der Niedertemperaturwärmequelle

#### 4. Schritt: Vordimensionierung und Ausgabe

Auf der Basis der Ergebnisse von im Programm hinterlegten Resultaten aus Systemsimulationen, analysiertem Anlagenverhalten und Korrelationen aus vielerlei berechneten Systemvarianten leitet  $WP_{\text{SOURCE}}$  die zur Vorauswahl und überschlägigen Dimensionierung geeigneter Niedertemperaturwärmequellen und zugehöriger Wärmeübertrager benötigten Größen für einen individuellen Anwendungsfall ab, siehe Abbildung 58. Dies erfolgt im letzten Schritt über den Quotienten aus Heizwärmebedarf (Raumheizung und Trinkwassererwärmung) und dem spezifischen Auslegungskennwert der jeweiligen Niedertemperaturwärmequelle. Die mittels Simulationen ermittelten Kennwerte sind in Datenbanken im Programm implementiert.

Während die aus den Simulationen und für  $WP_{\text{SOURCE}}$  zugrundeliegenden Daten teilweise in stündlicher und höherer Auflösung vorliegen, basiert die Vordimensionierung auf monatlichen Werten. Auch die ökologischen ( $\text{CO}_2$ -Emission, Primärenergie) und wirtschaftlichen Faktoren (Investitions- und Betriebskosten) für die verschiedenen Niedertemperaturwärmequelle/Wärmeübertrager-Kombinationen werden als monatliche Werte dokumentiert. Zur Vereinfachung eines Vergleichs werden Monatswerte zusätzlich zu Jahreswerten zusammengefasst.

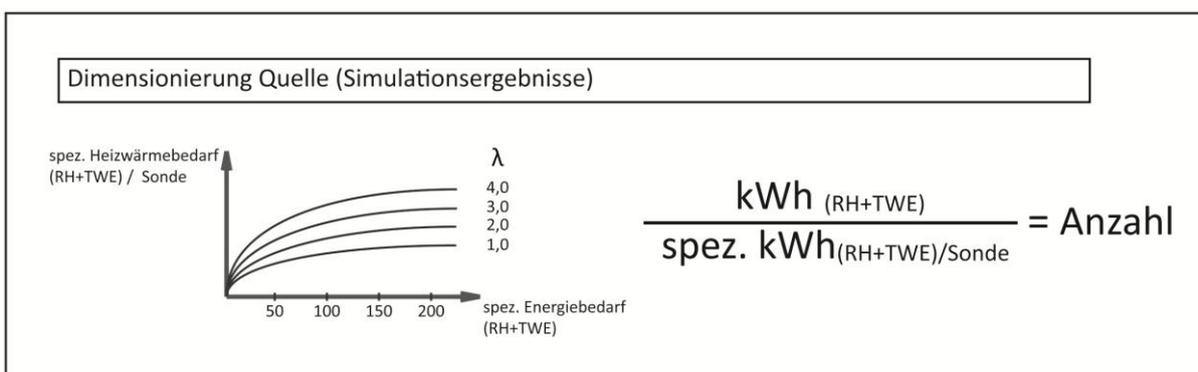


Abbildung 58 Schematische Darstellung zur Ermittlung der Größe der Niedertemperaturwärmequelle und des benötigten Niedertemperaturwärmeübertragers (hier benötigte Anzahl von Erdwärmesonden)

### 5. Schritt: Zusatzinformationen

Wenn im Rahmen der Programmerstellung in WP<sub>SOURCE</sub> integrierte Hinweise und/oder Warnungen zu bestimmten Betriebsbedingungen der Anlage oder einzelner Komponenten (z. B. Wärmeübertragerelemente) vorliegen und zu beachten sind, werden diese in einem eigenen Bereich ausgegeben und der Nutzer informiert. In diesem Zusammenhang erfolgt z. B. ein Hinweis, wenn die Möglichkeit besteht, dass das ausgewählte System neben dem Heizen auch zum Kühlen des Gebäudes verwendet werden kann. Weitere Hinweise beziehen sich z. B. auf Schallschutzanforderungen bei Luft-Wasser-Wärmepumpen, Pumpversuche bei einer geplanten Grundwassernutzung und ähnlichem.

### 10.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Der Kostenvergleich der unterschiedlichen Niedertemperaturwärmequellen und -übertrager erfolgt über eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Hierzu werden die Investitionskosten sowie die Jahresgesamtkosten in Anlehnung an VDI 2067 [10] ermittelt.

In den Investitionskosten sind die Kostenstellen

- Wärmepumpe,
- Erdarbeiten und Bohrungen,
- Material für Wärmeübertrager, Verteilerschächte und Anbindung sowie
- Genehmigung und Planung

der Anlagen berücksichtigt, siehe Abbildung 59.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt keine Förderung, da diese sehr variable und/oder zeitlich begrenzt sowie länder- und projektabhängig sein kann. Im Zuge der Analyse ergeben sich damit eher konservativ berechnete Investitionskosten, die ggf. durch Förderprogramme und/oder Zuschüsse reduziert werden können.

**Wärmepumpe**  
 Gerätepreis (Hersteller)



**Wärmeübertragungssystem**  
 Doppel-U-Rohr-Sonde  
 Verteilerschacht  
 Anbindungsrohre  
 Sondenfluid - Glykol

**Erdarbeiten / Bohrung**  
 Baustelleneinrichtung  
 Bohrung und Verfüllung / Erdarbeiten  
 horizontale Anbindung (Gräben)



**Dienstleistung**  
 Genehmigung und Anzeige  
 Dokumentation und Betreuung  
 Versicherung  
 Auslegung (z.B. EED)  
 Thermal Response Test / Pumpversuch

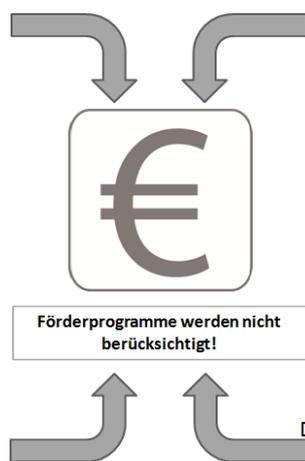


Abbildung 59 In den Investitionskosten berücksichtigte Kostenstellen – Beispiel Erdwärmesonde

### 10.3.1 Wärmepumpe

Zur Ermittlung der Investitionskosten für die Wärmepumpen werden die Listenpreise und Angaben zu den im Jahr 2017 auf dem Markt angebotenen Wärmepumpen dreier marktführender Hersteller herangezogen und ausgewertet. Dabei erfolgt die Unterteilung in vier unterschiedliche Gerätetypen:

- Sole-Wasser-Wärmepumpen
- Wasser-Wasser-Wärmepumpen
- Luft-Wasser-Wärmepumpen (ON-OFF)
- Luft-Wasser-Wärmepumpen (Inverter)

Im Rahmen der Auswertung werden die ermittelten Preise auf spezifische Preise heruntergebrochen und mit Hilfe einer Näherungsfunktion abgebildet. Die Funktionen für die Investitionskosten der Wärmepumpen sind Ausgangspunkte für die Implementierung der Kosten in das Programm WP<sub>SOURCE</sub>, siehe Abbildung 60.

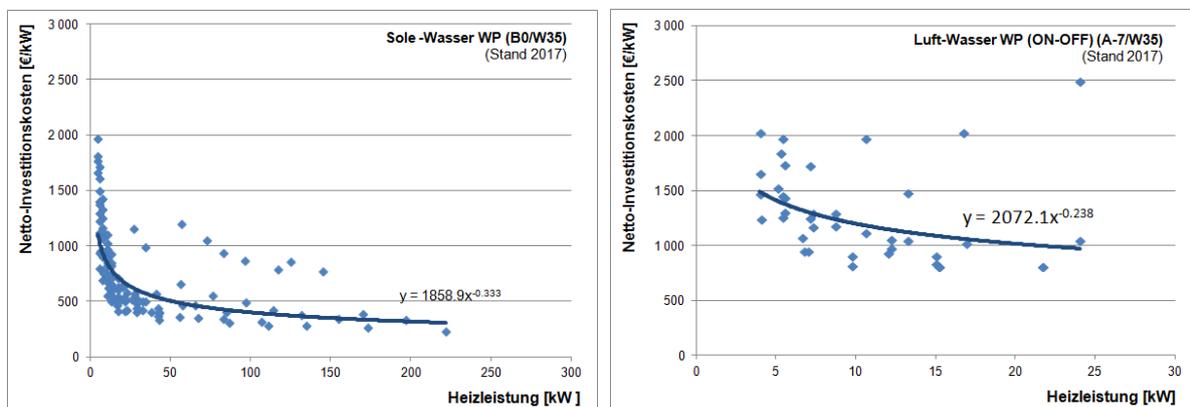


Abbildung 60 Spezifische (Netto)investitionskosten für Sole-Wasser- und Luft-Wasser-Wärmepumpen (Stand 2017)

### 10.3.2 Niedertemperaturwärmeübertrager

In Bezug auf die Investitionskosten für die Wärmeübertrager und deren Installation werden ebenfalls Herstellerangaben herangezogen und ausgewertet. Für die Errichtung der Anlagen werden Angebote von ausführenden Firmen sowie abgerechnete Kosten durchgeführter Baumaßnahmen verglichen. Eine weitere Informationsquelle ist der Baukostenindex (BKI) [11]. Dieser dient vor allem dem Vergleich der Preise für auszuführende Erd- und Tiefbaumaßnahmen.

Die Investitionskosten für die Niedertemperaturwärmeübertrager werden in die Positionen

- Bohr- und Erdarbeiten,
- Material und
- Dienstleistungen

aufgeteilt, siehe Abbildung 59.

Im Zuge der Zusammenstellung der Investitionskosten ist anzuführen, dass z. B. zur Errichtung eines Erdwärmesondenfeldes zu den Erdarbeiten die Baustelleneinrichtung, die Bohrungen und Verfüllung sowie die horizontale Anbindung (Graben) gehören. Zum Material zählen die eigentlichen Sonden, der Verteilerschacht, die Anbindungsleitungen und das Wärmeträgermedium. Unter die Position Dienstleistungen fallen die Planung und Auslegung der Wärmeübertrager (z. B. mittels *Earth Energie Designer* (EED)), die Genehmigung und die Bohranzeige sowie durchzuführende Voruntersuchungen und Test, wie z. B. ein Thermal Response Test (TRT) aber auch die Dokumentation und Betreuung der Ausführung und ggf. erforderliche Versicherungen.

Abbildung 61 zeigt beispielhaft die ermittelten (mittleren) Investitionskosten für Erdwärmesonden und Flächenkollektoren in Abhängigkeit von der Anzahl bzw. Fläche der/des Wärmeübertrager(s). Die ermittelten und vom Programm WP<sub>SOURCE</sub> dokumentierten Investitionskosten beinhalten stets alle Niedertemperaturwärmeübertrager und die Kosten für deren Installation sowie deren Anbindung bis zum Hausanschluss.

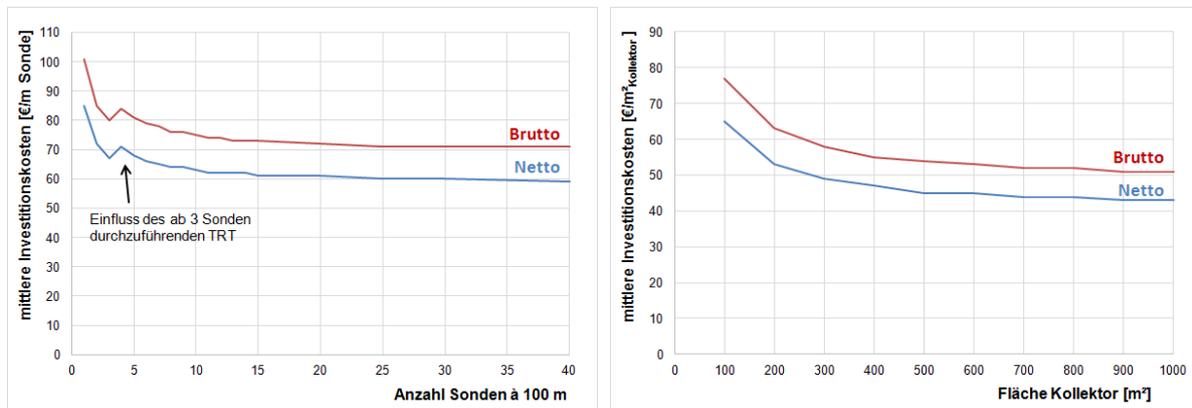


Abbildung 61 Spezifische mittlere Investitionskosten für Erdwärmesonden (links) und Flächenkollektoren (rechts)

### 10.3.3 Jahresgesamtkosten

Die Wirtschaftlichkeitsermittlung basiert auf einer dynamischen Berechnung nach der Annuitätenmethode. Die Berechnung der Jahresgesamtkosten erfolgt in Anlehnung an VDI 2067-1 [10]. Bei der Ermittlung der Kosten werden

- kapitalgebundenen Kosten (Annahme: Zinssatz 3 %; frei Eingabe in WP<sub>SOURCE</sub>),
- bedarfs- und/oder verbrauchsgebundene Kosten (Energiekosten, ohne Preissteigerung) und
- betriebsgebundene Kosten (Instandsetzungs-, Wartungs- und Betriebskosten)

berücksichtigt.

Für die kapitalgebundenen Kosten werden die ermittelten Investitionen für die Wärmepumpe und die Niedertemperaturwärmequelle/-übertrager herangezogen. Für die rechnerische Nutzungsdauer werden Angaben nach VDI 2067 verwendet. Die Berechnung der bedarfs- und/oder verbrauchsgebundenen Kosten erfolgt über die ermittelten Energiebedarfskennwerte zu den einzelnen Niedertemperaturwärmequellen. Die Energiepreise orientieren sich am Jahr 2017. Zu den betriebsgebundenen Kosten gehören u. a. die Kosten für Wartung und Instandsetzung. Die erforderlichen Werte werden entsprechend der Tabellen in VDI 2067 eingesetzt. Alle Eingaben zu den Randbedingungen können vom Nutzer im Programm verändert werden.

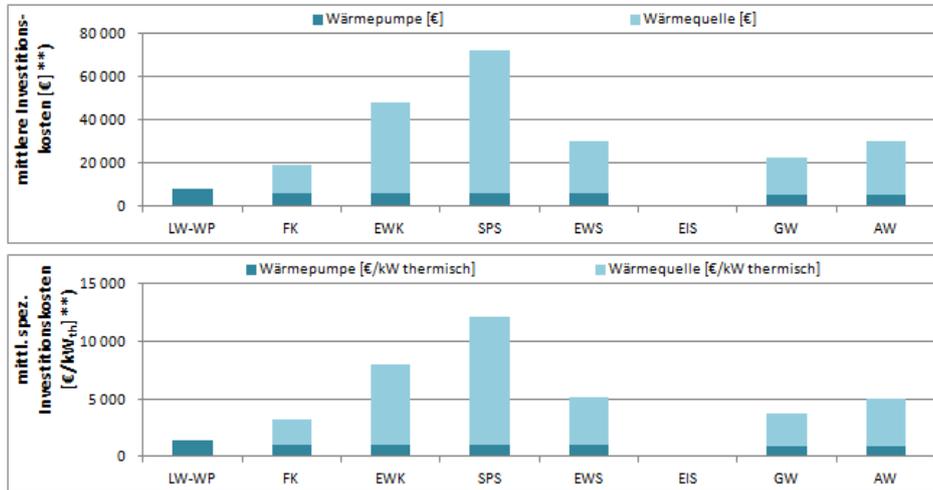
Im Programm WP<sub>SOURCE</sub> werden die ermittelten mittleren Investitionskosten als Absolutwerte und auch als spezifische Kosten sowie aufgeteilt in Einzelpositionen für die verschiedenen Wärmeübertrager dargestellt und vergleichend dokumentiert, siehe Abbildung 62. Der Nutzer kann die Ergebnisse voll-umfänglich ausdrucken.

**Ökonomische Bewertung**

(ohne Strombedarf Haushalt)

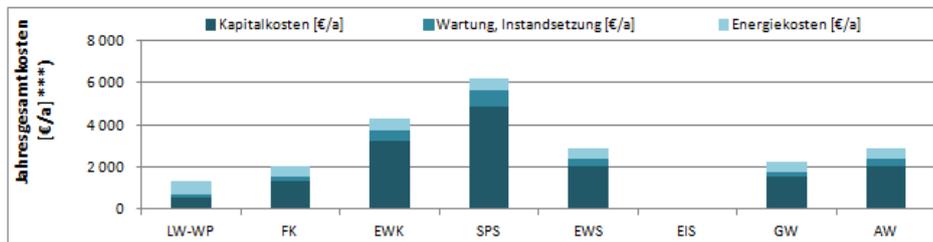
	LW-WP	FK	EWK	SPS	EWS	EIS	GW	AW
mittl. Investitionskosten WP	8 100	6 120	6 120	6 120	6 120		5 580	5 580
mittl. Investitionskosten WQ	0	13 090	41 910	66 240	24 300		16 960	24 820
mittl. Investitionskosten Gesamt	8 100	19 210	48 030	72 360	30 420		22 540	30 400
mittl. spez. Investitionskosten $[(m^2_{WP})^{-1}]$	54,0	128,1	320,2	482,4	202,8		150,3	202,7
spez. Investitionskosten WP $[(kW)^{-1}]$	1 350	1 020	1 020	1 020	1 020		930	930
spez. Investitionskosten WQ $[(kW)^{-1}]$	0	2 182	6 985	11 040	4 050		2 827	4 137

\*) bezogen auf die thermische Leistung der Wärmepumpe



\*\*) Bei den angegebenen Investitionskosten handelt es sich um mittlere Kosten. Dabei liegt die übliche Schwankungsbreite zwischen ± 15 %.

	LW-WP	FK	EWK	SPS	EWS	EIS	GW	AW
Kapitalkosten	544	1 291	3 228	4 864	2 045		1 515	2 043
Wartung, Instandsetzung	122	223	511	754	335		253	332
Energiekosten	689	523	568	559	492		466	491
Jahresgesamtkosten	1 355	2 037	4 307	6 177	2 872		2 234	2 866
spez. Jahresgesamtkosten $[(m^2_{WP})^{-1} \cdot a]$	9,0	13,6	28,7	41,2	19,1		14,9	19,1
Wärmegeheimkosten Cent/kWh	13	20	42	60	28		22	28



\*\*\*\*) Die angegebenen Kapitalkosten wurden auf Basis der mittleren Investitionskosten ermittelt.

Abbildung 62 Beispiel der Ausgabe und Darstellung einer ökonomischen Bewertung im Programm WP<sub>SOURCE</sub>

## 11 SONDERBETRACHTUNGEN (AP5)

Im Folgenden werden Sonderbetrachtungen zum Konzept Quellen – Gebäude – System vorgestellt und die Wärmepumpe in weiteren Nutzungsvarianten bewertet. Die Ausarbeitungen erfolgten zu großen Teilen durch studentische Arbeiten, siehe Kapitel 13.1.

Die Ergebnisse hängen nicht unmittelbar mit der Entwicklung des Vordimensionierungsprogrammes WP<sub>SOURCE</sub> zusammen. Die Analysen der Studenten sollen Ausgangspunkte zu neuen und weiterführenden Forschungsschwerpunkten bilden.

### 11.1 Wärmepumpen in unterschiedlichen Klimata

Die Wärmepumpe ist in Deutschland als anerkannter ressourcen- und energiesparender Wärme- und Kälteerzeuger angesehen, der eine gute Alternative zu den herkömmlichen Gas- und Ölheizungen darstellt. Doch kann die Wärmepumpe auch in anderen Klimazonen eine effiziente und klimafreundliche Lösung für die Gebäudeklimatisierung darstellen? Ist die Wärmepumpe ebenfalls eine gute Alternative zu den örtlichen Erzeugern? Anhand der Untersuchung sollen erste Erkenntnisse gewonnen werden, wie geeignet Wärmepumpen und deren Niedertemperaturwärmquellen in anderen Klimata zu nutzen und umzusetzen sind.

Anhand der Standorte, Potsdam, Straßburg, Athen, Riad, Jakarta und Oslo, die unterschiedliche Klimazonen repräsentieren, werden die einzelnen klimatischen Gegebenheiten sowie die geologischen und geothermischen Bedingungen analysiert. Auch Faktoren wie die örtliche Umweltpolitik und die herkömmlichen, für das Land typischen Energieträger und Klimatisierungssysteme, sowie der standortbezogene Wärmepumpenmarkt werden in den Vergleich und die Analysen einbezogen. Die Auswertung erfolgt anhand eines Mehrfamilienhauses, welches nach den Gebäudestandards der jeweiligen Region umgesetzt wird. Im Hinblick auf die ökologische Bewertung erfolgt ein Vergleich mit den standortspezifischen Heiz- bzw. Kühlsystemen. Auch die wirtschaftlichen Faktoren wie Investitions- und Energiekosten werden in Bezug auf die herkömmlichen Investitionskosten und finanziellen Aufwendungen für Energie an den Standorten bewertet.

Es ist festzustellen, dass viele Randbedingungen einen sinnvollen und zweckmäßigen Gebrauch von Wärmepumpen in anderen Klimazonen beeinflussen. So zeigt sich, dass nicht alle Gegebenheiten der unterschiedlichen Standorte zu einer erfolgreichen Anwendung von Wärmepumpensystem führen.

Die umweltpolitischen Faktoren, wie das Umweltbewusstsein der Bevölkerung und der Regierung, als auch eine staatliche Förderung von umweltschonenden Technologien, besitzen einen beachtlichen Einfluss auf die erfolgreiche Umsetzung von Wärmepumpen als eine ernstzunehmende Alternative zu den herkömmlichen Klimatisierungssystemen (siehe Tabelle 20). In wirtschaftsstarken Ländern wie Deutschland, Frankreich und Norwegen ist das Umweltbewusstsein der Bevölkerung stark ausgeprägt und der Staat sorgt in Bezug auf Umweltschutz und Energieeffizienz für eine umfassende Aufklärung. Durch eine stabile Wirtschaft und staatliche Subventionen hat sich dort ein etablierter Wärmepumpenmarkt entwickelt. Hingegen zeigt sich in Ländern, die durch Faktoren wie Überbevölkerung, Armut, wirtschaftliche Krisen sowie eigene fossile Bodenschätze kein gesteigertes Bewusstsein für umweltrelevante Themen aufweisen, auch der Wärmepumpenmarkt als bedeutungslos. Es ist dennoch nicht abwegig auch in diesen Ländern Wärmepumpen umzusetzen, da die Anwendung neuartiger Systeme das Bewusstsein der Verbraucher erweitert und eine Etablierung in diesen Ländern fördert.

Bedingt durch die unterschiedlichen Gebäudestandards ist ein direkter Vergleich zwischen den Ländern / Standorten nicht möglich. So können an den Standorten mit niedrigen Gebäudestandards durch bessere Dämmung o. ä. die Randbedingungen bezüglich Heiz- und Kühlbedarf verbessert werden, so dass eine Wärmepumpe effizienter, ökonomischer als auch ökologischer betrieben werden kann. Zudem würden aufgrund der geologischen und klimatischen Randbedingungen an einigen Standorten die Anlagen sehr groß dimensioniert werden müssen, um die Heiz- und/oder

Kühlbedarfe zu decken. Auch ist, zum Beispiel, bei der Dimensionierung der Förderbrunnen für eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe auf eine ausreichende Ergiebigkeit der lokalen Grundwasserleiter zu achten. Es zeigte sich, dass durch Grundwassermangel und lokale Verschmutzungen der Gebrauch von Wasser-Wasser-Wärmepumpen an einigen Standorten nicht ratsam ist.

Tabelle 20      **Umweltpolitische Randbedingungen für Wärmepumpenanlagen**

Standort	Umweltbewusstsein	Etablierung der Wärmepumpe (WP)	Staatliche Förderung	Bewertung der Randbedingungen
<b>Deutschland</b>	Ziele für Klima- und Umweltschutz	etabliert	+	+
<b>Frankreich</b>	Maßnahmen zur Bewusstseinsstärkung	gut entwickelter WP-Markt	+	+
<b>Griechenland</b>	Konflikt zwischen Regierung (+) und Bevölkerung (-)	steigender Trend, jedoch noch keine gängige Technologie	-	0
<b>Saudi-Arabien</b>	Regierung fördert erneuerbare Energien	kleiner WP-Markt	+	0
<b>Indonesien</b>	weder bei der Regierung noch bei der Bevölkerung	kleiner WP-Markt	-	-
<b>Norwegen</b>	starkes Umweltbewusstsein	seit 30 Jahren	+	+

Legende: + gut; 0 neutral; - schlecht

Die ökologische Betrachtung zeigt, dass primärenergetisch als auch hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen eine Wärmepumpe an jedem Standort eine sinnvolle Alternative zu den herkömmlichen Systemen darstellt. Es ist jedoch anzumerken, dass eine Auswertung mit lokalen Faktoren und Äquivalenten in Ermangelung von Daten nicht stattfinden konnte. Es wurde daher auf die für Deutschland bekannten Werte zurückgegriffen.

Anhand der Wirtschaftlichkeitsanalyse ist festzustellen, dass die Anwendung der Wärmepumpen in den meisten Fällen geminderte Energiekosten (standortspezifische Kosten verwendet) hervorrufen. In wenigen Fällen zeigt sich, dass die Energiekosten der Wärmepumpen verglichen mit Brennwertkesseln identisch sind. Die Investitions- und Wärmequellenerschließungskosten erweisen sich in allen Fällen höher als die der Standardheiz- und Kühlsysteme.

Tabelle 21 zeigt die Auswahl der Niedertemperaturwärmequellen an den jeweiligen Standorten, die sich im Rahmen der Untersuchungen ergeben haben.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es wie in Deutschland auch an anderen Standorten wichtig ist, alle Randbedingungen und Einflüsse zu erarbeiten und zu beachten. Für jeden Standort gibt es klimatische Bedingungen und geothermische und/oder geologische Gegebenheiten, die positiv oder ungünstig auf den Einsatz von Wärmepumpen wirken. Grundsätzlich kann eine Wärmepumpe bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen in ökologischer und wirtschaftlicher Sicht eine sinnvolle Alternative zu Standardheiz- und Kühlsystemen darstellen.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden in Deutschland gängige Niedertemperaturwärmequellen und -übertrager herangezogen. In einem weiteren Schritt wäre zu recherchieren, welche weiteren Übertragungssysteme und Quellen in den betrachteten Klimazonen bzw. an den Standorten Verwendung finden könnten. Des Weiteren sollte die Bevölkerung länderübergreifend auf alternative, innovative und umweltfreundliche Technologien zur Wärme- und Kältebereitstellung aufmerksam gemacht und auch auf Vorteile und Potenziale der Wärmepumpentechnologie hingewiesen werden.

Tabelle 21 Auflistung der nach Standort gewählten Niedertemperaturwärmequellen

Standort	gewählte Wärmequelle(n) und Kriterien zu ihrer Anwendung
<b>Potsdam (Heizbedarf)</b>	Grundwasser; die Förderung von Grundwasser weist einen geringen elektrischen Energiebedarf auf. Um die erforderlichen Fördermengen zu decken, besitzt Potsdam ausreichende Grundwasservorkommen.
<b>Straßburg (Heizbedarf)</b>	Außenluft oder Erdwärmesonden; energetisch sind Erdwärmesonden günstiger, wirtschaftlich haben Luft-Wasser-Wärmepumpe Vorteile.
<b>Athen (Heiz- und Kühlbedarf)</b>	Grundwasser; vor Ort vorhanden und sehr gute energetische Effizienz
<b>Riad (Heiz- und Kühlbedarf)</b>	Erdwärmesonde; am Standort die energetisch effizienteste Variante
<b>Jakarta (Kühlbedarf)</b>	Außenluft; die energieeffizienteste Lösung, da erhebliche Probleme bei der Grundwasserbewirtschaftung durch eine negative Beeinflussung übermäßiger Förderung auf die Statik des Untergrundes bestehen. Darüber hinaus schlechte Grundwasserqualität.
<b>Oslo (Heizbedarf)</b>	Erdwärmesonden und Grundwasser; beide effizient, da eine ausreichende Ergiebigkeit des Grundwasserleiters gegeben ist, kann Grundwasser gewählt werden.

## 11.2 Kopplung von Photovoltaik und Wärmepumpe

Im Zuge der von der Bundesregierung angekündigten „Energiewende“ ist eine Umstrukturierung der Energieversorgung anzusteuern. Um dabei einen wirksamen Beitrag für den Natur- und Klimaschutz leisten zu können, müssen die Prozesse des Energieverbrauchs sowie der -bereitstellung über fossile Energieträger zu erneuerbaren Quellen wechseln. In Deutschland spielt der Gebäudesektor hierbei eine zentrale Rolle. Aufgrund des maßgeblichen Anteils am Energiebedarf liegt ein besonderes Augenmerk auf der Konditionierung von Gebäuden mit Raumwärme und -kälte sowie der Trinkwarmwasserbereitung. Wärmepumpen sind (sehr) gut geeignet diese Aufgaben zu übernehmen und damit Anlagen mit fossilen Energieträgern zu ersetzen. Die im Gebäudebereich umgesetzten Wärmepumpen werden überwiegend mit Strom aus dem Netz betrieben, zunehmend aber auch aus meist volatilen, erneuerbaren Quellen, z. B. Photovoltaik oder Windkraft.

Im Rahmen der Untersuchung wird analysiert, ob die Integration von Wärmepumpen in Energiekonzepten verschiedener Gebäudetypen mit Photovoltaikanlagen sowohl nachhaltig als auch netzverträglich erfolgen und zudem die Eigennutzung von PV-Strom gesteigert werden kann. Für die Untersuchungen werden die Gebäudetypen Einfamilienhaus, Bürogebäude, Krankenhaus und Schule sowie Bibliothek herangezogen und mit einer maximalen PV-Belegung auf dem Dach versehen.

Bei der Regelung von Wärmepumpen geht es primär darum, die Anlage in ein übergreifendes Energiemanagement zu integrieren. Hierzu wird die Wärmeerzeugung mit einem thermischen Speicher und der PV-Anlage verknüpft und eine Regelstrategie festgelegt. Diese Regelstrategie kann verschiedene Zielsetzungen verfolgen. Eine Optimierung der Anlageneffizienz und Steigerung der Nutzung erneuerbarer Energie sind dabei gängige Motivationen. An dieser Stelle werden zwei gängige Regelstrategien zur Betriebsführung von Wärmepumpen diskutiert: die *wärmegeführte* und die *ertragsgeführte* Regelung. Wesentliches Ziel ist die Erhöhung des PV-Eigennutzungsanteils. Es soll erreicht werden, dass neben dem Strombedarf auch der Wärmebedarf im Gebäude möglichst vollständig durch PV-Strom gedeckt wird.

Die *wärmegeführte* Regelung wird auch *bedarfsgeführte* Regelung genannt und bezieht sich auf den anstehenden Wärmebedarf des Gebäudes sowie die geforderten Vorlauftemperaturen. In Abhängigkeit der Temperaturverhältnisse im Pufferspeicher (Mindesttemperatur) wird die Wärmepumpe in Betrieb genommen und abgeschaltet. Sinngemäß kann diese Strategie auch zur Deckung eines Kältebedarfs eingesetzt werden.

Die *ertragsgeführte Regelung* hat den primären Anspruch das Überangebot aus der Photovoltaikanlage unmittelbar zu nutzen und in thermische Energie zu wandeln, sog. „Power-to-Heat“. Ein Wärme(Kälte)bedarf des Gebäudes muss nicht explizit anstehen. Eine Regelgröße ist in diesem Fall die aktuelle Leistung der PV-Anlage. Übersteigt sie die Summe aus dem aktuellen Stromverbrauch des Gebäudes und der erforderlichen elektrischen Leistung der Wärmepumpe, so wird die Wärmepumpe in Betrieb genommen. Die Wärmepumpe bleibt so lange im Betrieb, bis die PV-Leistung -unter Berücksichtigung des aktuellen Stromverbrauchs des Gebäudes- unter einen Schwellenwert sinkt oder der Pufferspeicher als auch weitere thermisch aktivierte Massen (z. B. Fußbodenheizung) ihre thermische Kapazität erreicht haben. Mit einer ertragsgeführten Regelung lassen sich als positiver Nebeneffekt auch Erzeugungsspitzen puffern, was der Stabilität der Verteilnetze vor allem in Siedlungen und Quartieren mit hohen PV-Anschlussleistungen zugutekommt.

Wenn der Nutzerstrom wie im Fall eines Krankenhauses oder einer Bibliothek deutlich über dem Heizwärmebedarf liegt, so ist bereits ein hoher solarer Deckungsanteil durch die PV-Anlage gegeben und ein zusätzlicher Stromverbraucher, wie z. B. eine Wärmepumpe, würde den Deckungsanteil nicht wesentlich steigern. Demgegenüber zeigt sich bei dem betrachteten Bürogebäude, in dem der Jahresstrombedarf und der Jahresheizwärmebedarf dieselbe Größenordnung haben, dass eine Wärmepumpe den Deckungsanteil zwar nur marginal steigert, aber durch einen zielführenden Wärmepumpenbetrieb mit entsprechender Regelung und Speicher erneuerbarer Strom gezielter genutzt und gegenüber einer konventionellen Heizung kein zusätzlicher Energiebezug aus dem Netz verursacht wird.

Ganz anders verhält es sich bei dem untersuchten Schulgebäude. Hier liegt der Nutzerstrombedarf auf einem niedrigen Niveau, was bei einer hohen PV-Stromproduktion viel Potential zur Nutzung durch eine Wärmepumpe ermöglicht. Der Primärenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen können deutlich reduziert werden, da der Wärmepumpenstrombedarf durch den selbsterzeugten PV-Strom gedeckt wird. Zudem kann der Eigennutzungsanteil signifikant erhöht werden.

Das untersuchte Wohngebäude stellt einen Sonderfall dar. Sein Nutzerstrombedarf liegt deutlich unterhalb des Heizenergiebedarfs und die benötigten Energiemengen sind gegenüber den anderen Gebäudetypen sehr gering. Beim Wohngebäude zeigt sich, dass ein Großteil der von der PV-Anlage erzeugten Energie durch die saisonale Verschiebung von Erzeugung und Verbrauch nicht genutzt werden kann und in das öffentliche Netz eingespeist wird. Verbesserungen können hier ein (saisonaler) Wärmespeicher und/oder ein elektrischer Energiespeicher bringen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz von Wärmepumpen in Kombination mit PV-Anlagen zur Steigerung des solaren Deckungsanteils und der regenerativen Stromerzeugung nicht pauschal für alle Gebäudetypologien gleich ist, siehe Abbildung 63. Für die Umsetzung und bei der Nutzung von PV-Anlagen und Wärmepumpe spielt insbesondere der Nutzerstrombedarf eine entscheidende Rolle.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung beruhen auf der Betrachtung weniger Beispielgebäude. Abhängig von den Gebäudetypen zeigen sie zwar unvollständige, aber wesentliche Aussagen und Tendenzen auf.

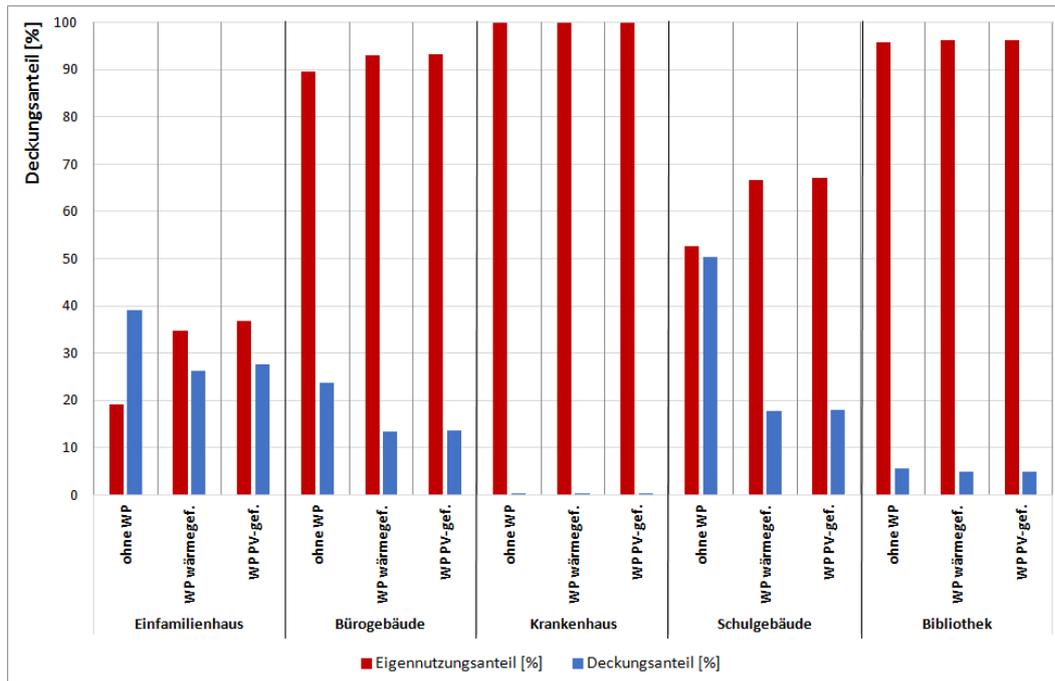


Abbildung 63 Ermittelte Eigennutzungs- und Deckungsanteile der untersuchten Gebäudetypen und Betriebsfälle

### 11.3 Gasabsorptionswärmepumpe vs. elektrisch angetriebener Wärmepumpe

Neben regenerativer Umweltenergie wird für den Betrieb einer Wärmepumpe zusätzliche Antriebsenergie benötigt. Im Rahmen der vorliegenden Auswertung und auch in der Praxis handelt es sich größtenteils um elektrische Antriebsenergie. Grundsätzlich kann eine Wärmepumpe jedoch auch mit Erdgas betrieben werden. Ein Vertreter dieser Variante ist die *Gasabsorptionswärmepumpe*, bei der das Kältemittel einen „thermischen Verdichter“ durchläuft und von einem Lösungsmittel unter Freisetzung von thermischer Energie absorbiert wird – diese thermische Energie kann als Heizwärme nutzbar gemacht werden. Eine weitere Wärmepumpenart ist die ebenfalls gasbetriebene *Adsorptionswärmepumpe*. Diese arbeitet nach dem Prinzip, dass ein Kältemittel an einem festen Material angelagert wird, wobei durch freiwerdende Bindungsenergie nutzbare Wärme entsteht. Sowohl die *Absorptions-* als auch die *Adsorptionswärmepumpe* beinhaltet einen Gasbrenner, der durch Zuführen hoher Temperaturen eine Regeneration des Systems ermöglicht.

Eine Gegenüberstellung beider Wärmepumpentechnologien zeigt, dass *Gasadsorptionswärmepumpen* derzeit ausschließlich für kleine Leistungsbereiche bis maximal 15 kW ausgelegt werden und somit auf eine Anwendung in Einfamilienhäusern beschränkt sind. Hingegen werden *Gasabsorptionswärmepumpen* erst oberhalb einer Nennwärmeleistungen von etwa 32 kW ausgeführt und eignen sich damit für einen Einsatz in Mehrfamilienhäusern und Gebäuden mit hohen Heizleistungsanforderungen, wie z. B. im Gewerbe und in der Industrie. Dem gegenüber stehen elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpen, die für nahezu jeden Anwendungsfall und über den gesamten geforderten Leistungsbereich verfügbar sind – auch als Kaskade mehrerer Geräte.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen den verschiedenen Bauformen von Wärmepumpen besteht hinsichtlich deren Energieeffizienz. So beträgt bei elektrisch angetriebenen Wärmepumpen der Anteil der Umweltenergie an der abgegebenen Nutzwärme etwa 65 % bis 85 %, wohingegen es bei Sorptionswärmepumpen lediglich ca. 20 % und 45 % sind. Damit sind gasbetriebene Wärmepumpen gegenüber elektrisch angetriebenen Geräten mit einem größeren Primärenergiebedarf und höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden. Verglichen mit einem konventionellen Wärmeerzeuger, z. B. einem Gasbrennwertkessel, ergeben sich für die verschiedenen Wärmepumpentypen unterschiedliche energetische und ökologische Vorteile.

Um die Nutzung unterschiedlich angetriebener Wärmepumpen genauer zu analysieren, werden die Einsatzmöglichkeiten der diskutierten Bauformen im Zusammenwirken mit Modellgebäuden eines Ein- und eines Mehrfamilienhauses untersucht. Die energetische und ökologische Analyse der einzelnen Anlagen bestätigt die vorangegangenen Ergebnisse aus dem allgemeinen Wärmepumpenvergleich. Die Gasadsorptionswärmepumpe (Heizzahl 1,35) im Einfamilienhaus weist bis zu 87 % höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen als die elektrisch angetriebene Wärmepumpe (JAZ<sub>Sole</sub> 4,3, JAZ<sub>Luft</sub> 3,8) auf und besitzt zudem einen um bis zu 134 % höheren Primärenergiebedarf. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Gasadsorptionswärmepumpe (Heizzahl 1,41) im Mehrfamilienhaus, deren CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 194 % größer ausfallen als bei den elektrischen Wärmepumpen (JAZ<sub>Sole</sub> 5,0, JAZ<sub>Luft</sub> 3,85); der Primärenergiebedarf beträgt bis zu 246 % mehr, Abbildung 64.

Auch ein wirtschaftlicher Vergleich zeigt Vorteile der elektrischen Wärmepumpen gegenüber den gasbetriebenen Varianten: So entstehen bei der Nutzung der Gasadsorptionswärmepumpe im Einfamilienhaus im Vergleich zur elektrische Luft-Wasser-Wärmepumpe zwar geringfügig niedrigere Betriebskosten, diesem Vorteilen stehen allerdings höhere Investitionskosten gegenüber. Ebenso kann durch den Einsatz der Gasadsorptionswärmepumpe im betrachteten Mehrfamilienhaus gegenüber der elektrischen Wärmepumpe kein wirtschaftlicher Vorteil erzielt werden. Die Gasadsorptionswärmepumpe benötigt weit größere Menge an Antriebsenergie, was zu deutlich höheren Betriebskosten führt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass durch die Verwendung einer Gasadsorptions- oder Gasadsorptionswärmepumpe anstelle eines elektrisch angetriebenen Gerätes aus energetischer, ökologischer oder wirtschaftlicher Sicht kein nennenswerter Nutzen entsteht. Auch hinsichtlich der Leistungs- und Einsatzbereiche besitzen elektrisch angetriebene Wärmepumpen ein wesentlich größeres Anwendungsspektrum. Gleichwohl ist nach derzeitigem Stand der Technik eine gasbetriebene Sorptionswärmepumpe gegenüber einem Gasbrennwertkessel als energetische Verbesserung anzusehen. Um insbesondere die Einsatzmöglichkeiten von Gasadsorptionswärmepumpen zu erhöhen, ist eine technische Weiterentwicklung des Absorptionsprozesses nötig, sodass die Wärmepumpen auch kleine bis mittlere Heizleistungsbereiche abdecken, ohne an energetischer Effizienz zu verlieren und dann, z. B. in Einfamilienhäusern, eingesetzt werden können.

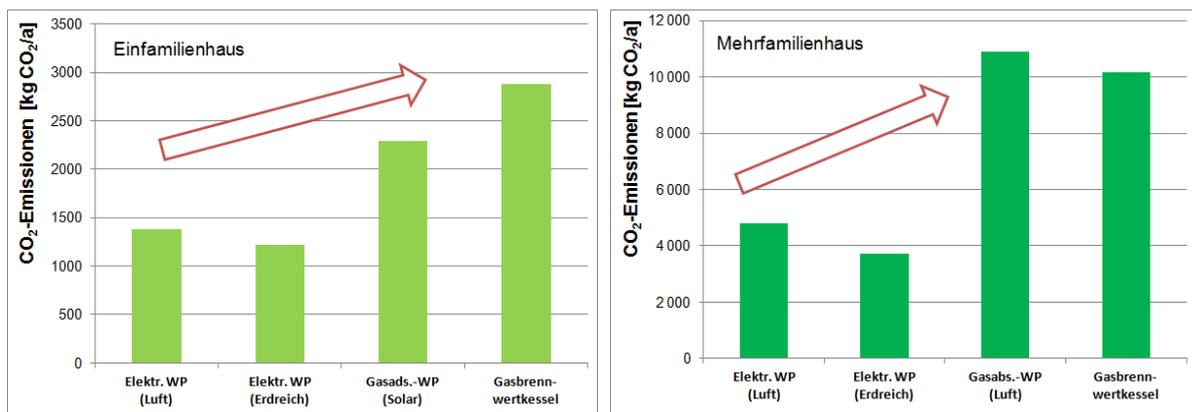


Abbildung 64 Ökologischer Vergleich der drei Wärmepumpentechnologien mit einem Gasbrennwertkessel im Ein- und Mehrfamilienhaus (Strom 623 gCO<sub>2</sub>/kWh und Gas 290gCO<sub>2</sub>/kWh)

## 11.4 Wärmepumpen im Nahwärmenetz

Vor dem Hintergrund der Energiewende sind energieeffiziente Wärmeversorgungssysteme zur Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser wesentliche Voraussetzungen. In diesem Zusammenhang bieten auch Nahwärmenetze Möglichkeiten, Wärmepumpen in die Wärmeversorgung von Siedlungen und Quartieren einzubinden. Die Wahl eines einzubindenden Wärmeerzeugers ist jedoch grundsätzlich abhängig von den Randbedingungen des

Versorgungsgebietes. So können etwa regenerative Energiequellen Wärme bereitstellen, die nicht immer auf einem für die Raumheizung und/oder die Trinkwassererwärmung nutzbaren Temperaturniveau liegt. In einem solchen Fall kann durch die Einbindung einer Wärmepumpe das Temperaturniveau angehoben werden und die Integration der Energiequellen in ein Nahwärmenetz ermöglicht werden.

Hierzu werden im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen an einem Mischquartier mit rund 45.000 m<sup>2</sup> (ca. 270 Wohneinheiten) mit folgende Varianten und Wärmequellen betrachtet (Vergleich Abbildung 65)

- Variante 1: Solare Nahwärme mit Langzeitwärmespeicher, Wärmepumpe und Nachheizung über einen Gaskessel
- Variante 2: Agrothermie als Wärmequelle für eine Wärmepumpe
- Variante 3: Rücklaufauskühlung eines Fernwärmenetzes als Wärmequelle für eine Wärmepumpe
- Variante 4: Beladung eines Langzeitwärmespeichers mittels einer mit Solarstrom betriebenen Wärmepumpe und Nachheizung über einen Gaskessel
- Variante 5: Kalte Nahwärme mit Erdwärmesonden und dezentralen Wärmepumpen sowie Blockheizkraftwerksbetrieb im Winter

In den vier Varianten wird neben den unterschiedlichen Wärmequellen zusätzlich unterschieden zwischen einem „warmen Netz“ mit einer zentralen Wärmepumpe in der Heizzentrale und einer Netztemperatur von Vorlauf 75 °C / Rücklauf 50 °C und dem „kalten Netz“ mit dezentralen Wärmepumpen in den Häusern und einem Temperaturniveau im Netz von Vorlauf 10 °C / Rücklauf 5 °C.

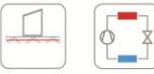
Variante	1	2	3	4
Beschreibung	LZWSP+ST+WP	Agrothermie + WP	Fernwärme + WP	LZWSP+LW-WP
Versorgungsnetz				
Heizsystem				
Regenerative Energien				
Zusatzvarianten	a) WP zentral b) WP dezentral c) WP zentral und dezentral	a) WP zentral b) WP dezentral	a) WP zentral b) WP dezentral	a) WP zentral b) WP dezentral

Abbildung 65 Betrachtete Netzvarianten

Anhand der Simulationen ist festzustellen, dass in den Varianten mit einem „kalten“ Netz eine Wärmefaufnahme aus dem anstehenden Erdreich erfolgt.

In Variante 1 können im Vergleich zwischen den Netzarten „kalt“ und „warm“ die Speicherverluste um ca. 20 % und die Netzverluste um über 80 % reduziert werden, wenn ein „kaltes“ Netz umgesetzt wird. Des Weiteren reduziert sich der Wärmebedarf aus der Nachheizung, die geforderte Vorlauftemperatur von 10 °C im „kalten“ Netz kann im Speicher länger „gehalten“ werden. Zudem stellt die Solarthermie über einen längeren Zeitraum das erforderliche Temperaturniveau bereit.

Im Gegensatz dazu muss in der Variante 4 im „kalten“ Netz in den Wintermonaten eine deutliche Nachheizung durch den Gaskessel erfolgen. Obwohl das Netz nur auf 10/5 °C geführt wird, reicht die erzeugte Wärme aus der Luft-Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit der PV-Anlage nicht aus, um den Wärmebedarf des Quartiers zu decken.

Beim ökologischen Vergleich der Varianten weist Variante 1 als „warmes“ Netz den geringsten Primärenergiebedarf und die geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Bedingt durch einen hohen Stromverbrauch der die Luft-Wasser-Wärmepumpe, als auch der erforderlichen Nachheizung, sind der Primärenergiebedarf und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß in der Variante 4 „warmes“ Netz rund doppelte so hoch wie die der anderen Varianten. Bei einer Umsetzung des Verteilnetzes als „kaltes“ Netz steht die Variante 2 gemäß den Simulationen als ökologisches Konzept dar. (Abbildung 66 und Abbildung 67)

Die Auswertungen zeigen, dass eine Nahwärmeversorgung auf der Grundlage regenerativer Energien möglich ist. Dabei ist festzustellen, dass in den meisten Fällen jedoch eine Spitzenlastabdeckung, z. B. durch einen Gaskessel oder eine andere konventionelle Wärmequelle, erfolgen muss. Durch regelungstechnische Optimierungen lässt sich der Anteil konventioneller Nachheizung am gesamten Energiebedarf minimieren.

Nahwärmenetze stellen eine sinnvolle Alternative zu Einzelversorgungen dar. Wichtige Vorteile liegen z. B. in der flexiblen Auswahl und Anpassung des/der Wärmeerzeugers(s), der Erweiterbarkeit auf zusätzliche Nutzer, der Verlegung technischer Komponenten in eine gemeinsame Heizzentrale und den damit verbundenen, für den einzelnen Nutzer im Allgemeinen geringeren Wartungskosten.

Die zur Beheizung von Langzeitwärmespeichern installierten Wärmepumpen müssen im Allgemeinen hohe Temperaturdifferenzen überwinden. Bei den meisten am Markt verfügbaren Geräten führt das zu teilweise drastischen Einbußen bei den Arbeitszahlen. Vor diesem Hintergrund sollten zur Beheizung von Langzeitwärmespeichern nur spezielle Hochtemperatur-Wärmepumpen zum Einsatz kommen. Als Alternative zu Großwärmepumpen, die den gesamten zu überwindenden Temperaturbereich abdecken, kann auch eine Kaskadenschaltung von Wärmepumpen erfolgen.

Um Wärmepumpen infolge der unterschiedlichen Anforderungen der Varianten/Konzepte energetisch und ökologisch sinnvoll einsetzen zu können, müssen zu den jeweiligen Anwendungsfällen passende Geräte ausgewählt und/oder entwickelt werden.

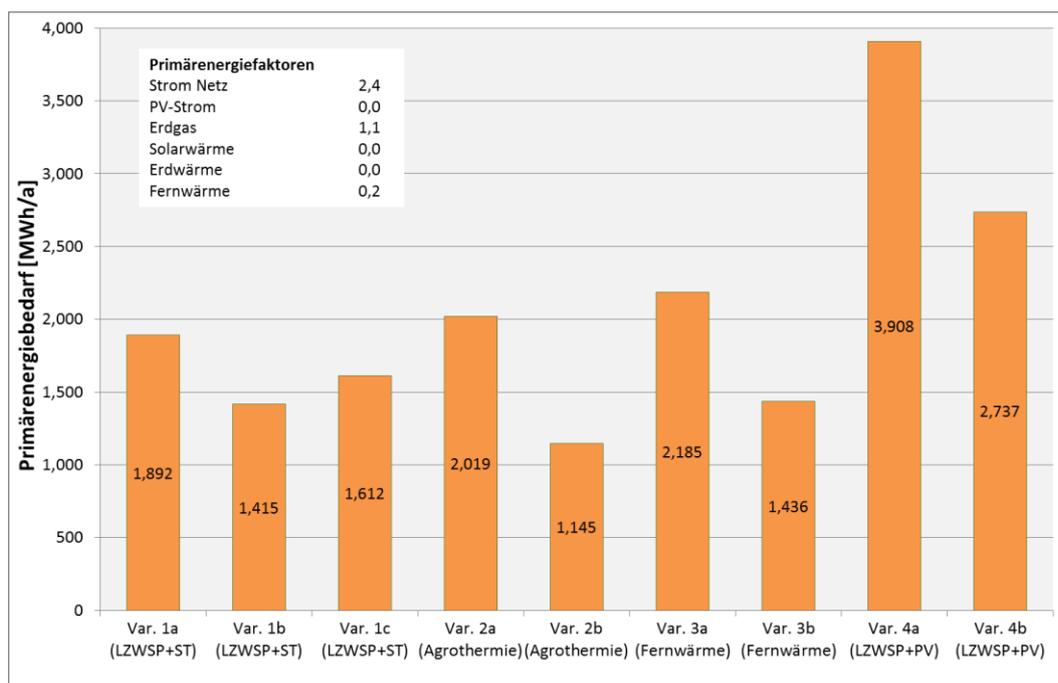


Abbildung 66 Primärenergetische Gegenüberstellung der Netzvarianten

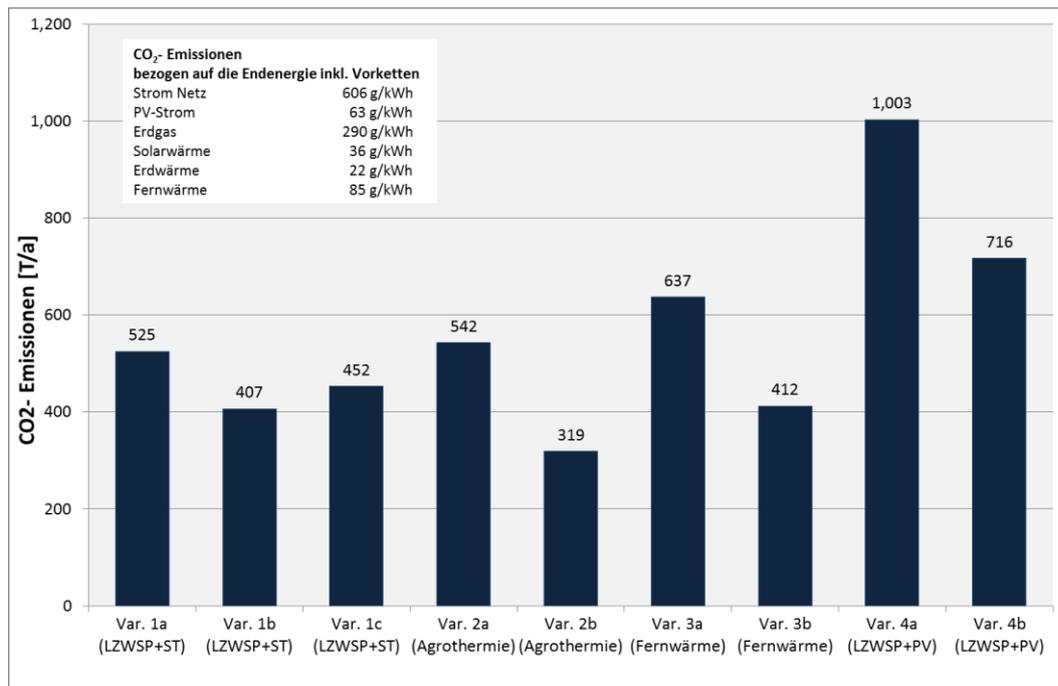


Abbildung 67 Ökologischer Gegenüberstellung der Netzvarianten anhand der CO<sub>2</sub>-Emissionen

### 11.5 Abluftwärmepumpe im Passivhaus

Regenerative Energiequellen in die Gebäudetechnik zu integrieren ist ein wichtiges Ziel für die nachhaltige Umsetzung von Bauvorhaben. Mit ihrem Gebäudestandard bilden Passivhäuser eine Möglichkeit diese Zielsetzung zu erreichen. Die Kombination erneuerbarer Energien mit dem Gebäudekonzept *Passivhaus* kann eine Grundlage für Ressourcenschonung bei künftigen Bauvorhaben bilden.

Im Rahmen der Untersuchung werden drei Konzepte betrachtet, die sich mit der Wärmeversorgung von Einfamilienhäusern im Passivhausstandard befassen. Die Wärmeversorgung der drei Konzepte ist in Tabelle 22 dargestellt. Neben einer Fußbodenheizung als Wärmeübergabesystem wird in allen Konzepten eine Lüftungsanlage zur Bereitstellung frischer Zuluft für die Wohn- und Schlafräume integriert. Alle Versorgungskonzepte beziehen ihren Strom ausschließlich aus dem öffentlichen Netz. In die Bilanzierung fließt kein Nutzerstrom, z. B. aus einer Photovoltaikanlage, ein. Der Fokus liegt allein auf der Anlagentechnik.

Tabelle 22 Betrachtete Wärmeversorgungskonzepte für Einfamilienhäuser im Passivhausstandard

	Wärmeerzeuger, Raumheizung	Wärmeerzeuger, Trinkwassererwärmung
<b>Konzept A</b>	Gasbrennwertkessel	Gasbrennwertkessel
<b>Konzept B</b>	Holzpelletkessel	Holzpelletkessel und thermische Solaranlage
<b>Konzept C</b>	Abluftwärmepumpe	Abluftwärmepumpe

Hinsichtlich des Endenergiebedarfs zeigt sich, dass die Konzepte A und B einen höheren Endenergiebedarf aufweisen, als das Konzept C, siehe Abbildung 68. Ursachen sind die Jahresnutzungsgrade der Anlagentechnik. Mit einem Jahresnutzungsgrad von 0,95 benötigt das Konzept A jährlich insgesamt 3.986 kWh Endenergie. Mit 335 kWh/a hat die Hilfsenergie, in Abbildung 68 als *Endenergie Strom* hellblau dargestellt, daran nur einen geringen Anteil. Konzept B würde auf Grund des geringen Jahresnutzungsgrades des Pelletkessels von 0,79 gegenüber dem Gasbrennwertkessel mehr Energie benötigen, durch die thermische Solaranlage, die einen beträchtlichen Teil der Trinkwassererwärmung übernimmt, können jedoch Holzpellets gespart werden. Der Bedarf an Hilfsenergie ist beim Versorgungskonzept B höher als beim Konzept A, da

sowohl der Pelletkessel mit einem Fördersystem für die Pellets ausgestattet ist, als auch die thermische Solaranlage Energie für eine Zirkulationspumpe und einen Regler benötigt. Die im Konzept C zu bilanzierende Energie besteht allein aus elektrischem Strom (1.621 kWh/a). Auch weil die frei zur Verfügung stehende Abwärme aus der Abluft (dunkelblauer Balken) definitionsgemäß nicht als Energiebezug angerechnet wird und nur der Strombedarf der Wärmepumpenanlage zu bilanzieren ist, weist das Wärmepumpensystem den niedrigsten Endenergiebedarf auf.

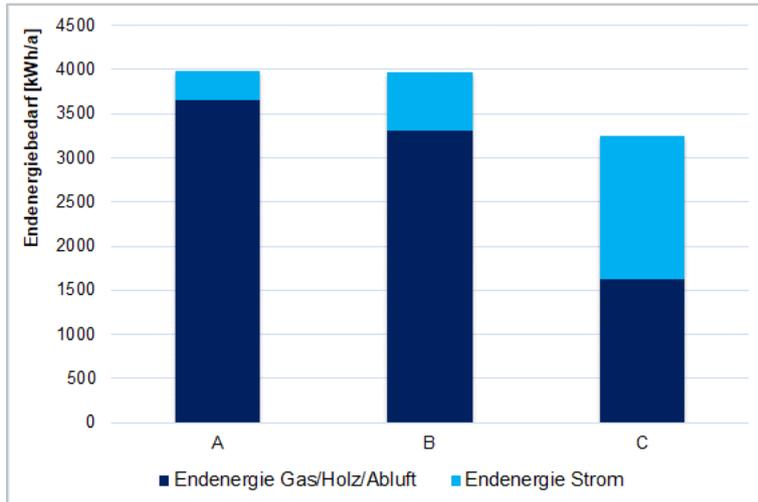


Abbildung 68 Endenergiebedarfswerte der Konzepte

Die ökologische Betrachtung zeigt, dass die Konzepte A und C einen höheren Primärenergiebedarf aufweisen als das Konzept B. Von diesen Konzepten benötigt der Gasbrennwertkessel die meiste Primärenergie (34,5 kWh/(m<sup>2</sup>·a)), während der Pelletkessel durch den niedrigen Primärenergiefaktor für Holz (0,2) und den geringen Strombezug den geringsten Bedarf an Primärenergie (13,8 kWh/(m<sup>2</sup>·a)) aufweist. Der eingesetzte Strom zur Wärmeerzeugung und als Hilfsenergie wirkt sich negativ auf die Energiebilanz (21,8 kWh/(m<sup>2</sup>·a)) des Konzeptes C aus. Der Kennwert für die Wärmepumpe würde sich verbessern, wenn der bezogene Strom regenerativ erzeugt würde.

Das auf Erdgas basierende Konzept A verursacht die meisten CO<sub>2</sub>-Emissionen (1.150 kg/a). Der Einsatz von Holzpellets und Solarthermie und der damit verbundene regenerative Anteil wirken sich positiv auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz dieses Konzeptes aus. Das Konzept B verursacht nur halb so viel CO<sub>2</sub>-Emissionen (592 kg/a) wie der Gasbrennwertkessel. Die Abluftwärmepumpe verursacht 973 kg CO<sub>2</sub> pro Jahr. Durch den erhöhten Stromeinsatz fällt die Bilanz von Konzept C bezogen auf den Pelletkessel schlechter aus.

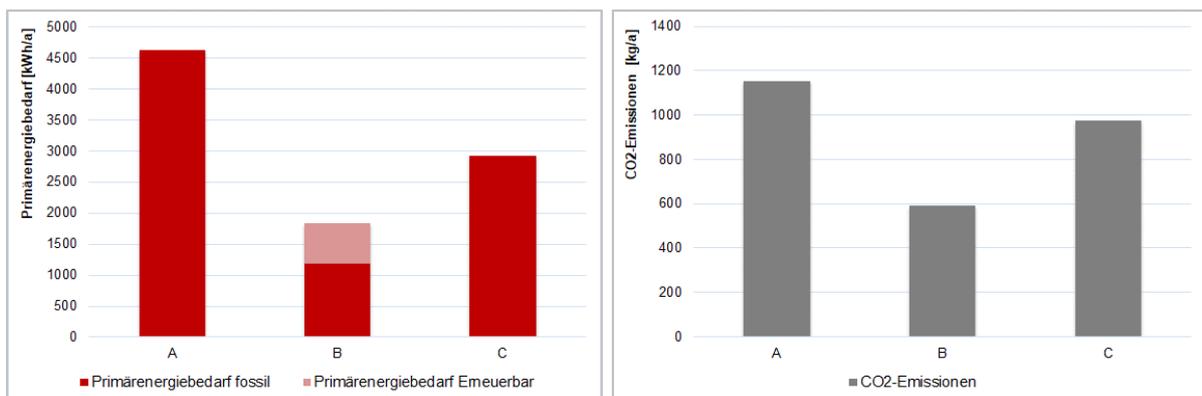


Abbildung 69 Primärenergiebedarfswerte und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Konzepte (Primärenergiefaktoren und CO<sub>2</sub>-Äquivalente gemäß EnEV 2016 und GEMIS)

In wirtschaftlicher Hinsicht wird das Konzept A durch die kapital- und bedarfsgebundenen (Gaspreis) Anteile bestimmt. Energiekonzept B ist bedingt durch die hohen kapital- und betriebsgebundenen Kosten das teuerste Konzept. Durch den hohen Arbeits- und Wartungsaufwand für die Lagerung und Förderung der Pellets zum Pelletkessel entstehen hohe betriebsgebundene Kosten. Die Abluftwärmepumpe weist hohe kapitalgebundene Kosten auf, abhängig vom Strompreis im Vergleich zu Gas und Holz jedoch auch hohe bedarfsgebundene Kosten.

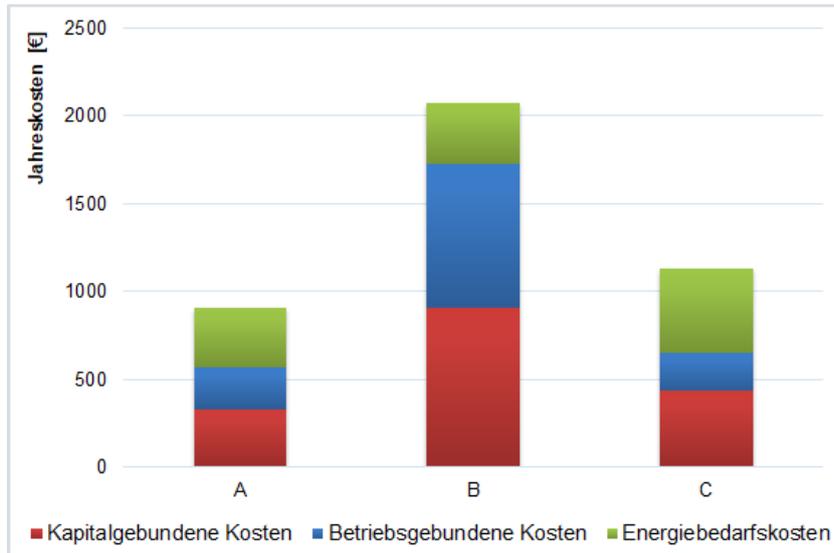


Abbildung 70 Jahreskosten durch die drei Konzepte

Das Energiekonzept mit der Abluftwärmepumpe als Wärmeerzeuger ist ein stabiles und ressourcenschonendes Wärmeversorgungskonzept für Passivhäuser. Die energetische Bilanzierung zeigt, dass die Nutzung von frei verfügbarer Wärme mittels Wärmepumpe effizienter als alternative regenerative Energieerzeugung sein kann. Der Primärenergiebedarf kann dahingehend optimiert werden, dass mittels fossiler Brennstoffe erzeugter Strom durch regenerativ erzeugten Strom, z. B. aus Photovoltaik und Wind, ersetzt wird. Auch die wirtschaftliche Analyse bestätigt, dass eine Wärmepumpenanlage in Passivhäusern wirtschaftlich im Vergleich zu Gas und Pellets darstellbar ist. eine zukunftssichere und stabile Versorgungsstrategie bilden.

## 12 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Wärmepumpentechnologie wird bei der zukünftigen Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden, aber auch bei industriellen Anwendungen, eine wesentliche Rolle im Kontext der Energiewende spielen. Um das Potential dieser Energieversorgungsvariante möglichst effizient ausschöpfen zu können, kommt neben der Wahl einer geeigneten Wärmepumpe auch der Auswahl der Niedertemperaturwärmequelle und des für diese Quelle am besten geeigneten Wärmeübertragers eine entscheidende Bedeutung zu. Mit dem im Rahmen des Forschungsprojektes future:heatpump entwickelten Vordimensionierungsprogramms WP<sub>SOURCE</sub> steht ein auf der Grundlage von Systemsimulationen und analytischen Berechnungen sowie auf Messdaten von Feldanlagen und Hersteller- bzw. Anbieterinformationen beruhendes, multifunktionales und in der Planungspraxis in weiten Bereichen anwendbares Hilfsmittel zur Bewertung, Auswahl und überschlägigen Dimensionierung von Wärmeübertragern für Niedertemperaturwärmequellen für Wärmepumpen zur Verfügung. Das Programm ermöglicht eine bedarfsgerechte und an örtliche Gegebenheiten, wie z. B. das Klima, nutzbare Wasserressourcen, zur Verfügung stehende Fläche oder auch thermodynamische Eigenschaften des Erdreichs, angepasste Auswahl und Vordimensionierung der jeweiligen Wärmeübertrager. Neben ökologischen Aspekten, wie dem effizienten Betrieb der gesamten Wärmepumpenanlage, ermöglichen die Ausgaben von WP<sub>SOURCE</sub> ebenso eine wirtschaftliche Bewertung des Gesamtsystems.

Im Rahmen künftiger Planungen kann WP<sub>SOURCE</sub> sowohl Planern als auch Bauherren, aber auch anderen mit ähnlichen Fragestellungen befasste Personen, bei der Auswahl geeigneter Niedertemperaturwärmequellen und -übertrager sowie bei einer vergleichenden Gegenüberstellung und überschlägigen Dimensionierung unterstützen. In der Ergebnisausgabe dokumentiert WP<sub>SOURCE</sub> einen Überblick zu entscheidenden Kriterien, wie etwa Flächenbedarf, Anlageneffizienz und Investitionskosten der betrachteten Niedertemperaturwärmeübertragersysteme.

Neben dem als vorrangiges Resultat des Projektes entwickelten Vordimensionierungsprogramms, können weitere im Rahmen von future:heatpump erarbeitete Grundlagen und Erkenntnisse sowohl von Planungsbüros als auch von Anlagen- und Komponentenherstellern sowie von Betreibern von Wärmepumpenanlagen genutzt werden. Die im Rahmen einer umfangreichen Marktrecherche und der weiteren Projektarbeit ermittelten thermodynamischen und ökologischen Zusammenhänge sowie die dokumentierten ökonomischen Randbedingungen, können insbesondere den Herstellern und Anbietern der vorgestellten Technologien und Produkte Entwicklungspotenziale und Markttendenzen für eine firmenpolitische Ausrichtung aufzeigen.

Anhand des Monitorings von 14 Gebäuden sowie durch die simulationstechnischen Ergebnisse des Forschungsprojektes kann gezeigt werden, dass in Bezug auf den Betrieb von Wärmepumpen und die untersuchten Wärmeübertrager nahezu unabhängig vom gewählten Wärmeübertragersystem hinsichtlich der Anlageneffizienz sehr gute Ergebnisse erzielt werden können. Für den Anwender bestehen jedoch wesentliche Unterschiede zwischen den untersuchten Wärmeübertragersystemen infolge unterschiedlicher Flächenbedarfe sowie den jeweiligen Investitionskosten.

Zusätzlich zu den Kosten haben im Bereich der Planung die Randbedingungen „Baugrundstück“ und „Raumwärmebedarf“ bei der Auswahl und Auslegung eines Systems sowie seiner Komponenten eine entscheidende Bedeutung. Vor dem Hintergrund, dass Baugrundstücke gegenwärtig vergleichsweise klein ausfallen und oft Grundstücksflächen mit weniger als 500 Quadratmetern mit Einfamilienhäusern bebaut werden sowie das auch bei bestehenden Gebäuden nicht von vornherein mit freien Grundstücksflächen in ausreichender Größe gerechnet werden kann, ist die Größe des Grundstücks bei der Wahl eines Niedertemperaturwärmeübertragers nicht selten ein limitierender Faktor. Aus diesem Grund lässt sich vermuten, dass bei Ein- und Mehrfamilienhäusern großflächige Systeme, wie etwa Flächenkollektoren, auch künftig wenig Anwendung finden werden. Dem Flächenbedarf für den Niedertemperaturwärmeübertrager steht der Raumwärmebedarf des zu versorgenden Gebäudes gegenüber, der jedoch infolge zunehmend extrem gut gedämmter Gebäude stetig abnimmt. Durch einen sinkenden Wärme- und daran gekoppelten Flächenbedarf für

oberflächennahe Systeme können z. B. Flächenkollektoren, die insbesondere infolge ihrer geringeren Einbaukosten attraktiv sind, wieder an Marktanteilen gewinnen.

Aufgrund der signifikanten Reduzierung des Wärmebedarfs für die Beheizung von Gebäuden, stellt die Erwärmung von Trinkwasser zunehmend einen deutlich größeren Anteil der Wärmebereitstellung dar. Das benötigte Temperaturniveau zur Trinkwassererwärmung liegt dabei im Allgemeinen oberhalb von 50 °C. Das Temperaturniveau für die Trinkwassererwärmung liegt damit im Allgemeinen deutlich über der in modernen Gebäuden üblicherweise benötigten Vorlauftemperatur für die Raumheizung (z. B. 35/28 °C). Mit einer sinkenden Arbeitszahl wirkt sich dieser Zusammenhang negativ auf die Effizienz einer Wärmepumpe und damit der gesamten Wärmepumpenanlage aus. Dieser Gesichtspunkt sollte bei künftigen Energiekonzepten mit Wärmepumpe eine angemessene Berücksichtigung finden.

## Ausblick

Auf der Grundlage der Erfahrungen und Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt future:heatpump sollen im Rahmen eines Nachfolgeprojektes im Wesentlichen die Themen und Schwerpunkte behandelt werden, die zu einem Ausbau und der erweiterten Nutzung des Programms WP<sub>SOURCE</sub> dienlich sind. Zentrale Arbeitspunkte werden sein:

- **Implementierung von weiteren Niedertemperaturwärmeübertragern und damit verbundene Systeme**

Auf dem Markt erscheinen immer wieder neue Niedertemperaturwärmeübertrager und damit verbundene Systeme. Besondere Ausführungen von Wärmespeichern und/oder deren spezielle Einbindung sind vielfach Alleinstellungsmerkmale einzelner Anbieter. Um die energetischen und wirtschaftlichen Potenziale dieser Übertrager bewerten zu können, können diese in das Programm WP<sub>SOURCE</sub> eingebunden werden. Bei der Auswahl der zu implementierenden Wärmeübertrager sollten der Innovationsgrad und die vermutete Zukunftsfähigkeit des jeweiligen Systems in gleicher Weise berücksichtigt werden.

- **Regeneration erdgekoppelter Niedertemperaturwärmequellen**

Das Erdreich als Niedertemperaturwärmequelle, dem mittels z. B. Erdwärmesonden, Erdwärmekörben, Spiralsonden oder Flächenkollektoren während des Heizbetriebs über die Wärmepumpe Wärme entzogen wird, kühlt sich infolge des Wärmeentzugs oft um mehrere Kelvin ab. Werden erdgekoppelte Systeme und deren Niedertemperaturwärmequelle außerhalb des Heizbetriebs sich selbst überlassen, kommt es durch Wärmegewinne aus solarer Einstrahlung sowie durch Umweltwärme der Umgebungsluft aber auch durch den Wärmestrom aus dem umgebenden Erdreich sowie dem Isotopenzerfall im Erdinneren zu einem Wärmestrom in Richtung des abgekühlten Bodensegments. Die einzelnen Wärmeströme resultieren in einer Temperaturerhöhung des Erdreichs und damit seiner (teilweisen) thermischen Regeneration. Die Anteile der beteiligten Wärmeströme sind im Wesentlichen von der Tiefe des betrachteten Erdsegments unterhalb der Erdoberflächen sowie den thermodynamischen und hygrologischen Eigenschaften des Erdreichs abhängig.

Um die Regeneration des Erdreichs zu unterstützen, kann diesem über die vorhandenen Niedertemperaturwärmeübertrager Wärme zugeführt werden. Dies kann z. B. mit Hilfe von thermischen Sonnenkollektoren oder Abwärme aus Industrieprozessen geschehen. Eine aktive Regeneration des Erdreichs kann außerhalb des Heizbetriebes aber auch in Stillstandszeiten der Wärmepumpe während des Heizbetriebs erfolgen. (siehe hierzu auch das Forschungsprojekt Terra-Quelle Solar vom ISFH [12]) In Systemen mit Wärmepumpen zu Heizzwecken, bei denen zusätzlich eine passive Kühlung über das Erdreich realisiert wird oder auch eine aktive Kühlung mittels einer reversiblen Wärmepumpe erfolgt, findet die

Regeneration des Erdreichs durch seine Nutzung als Wärmesenke statt. Auf der Basis von Systemsimulationen können aus verschiedenen Szenarien zur Regeneration erdgekoppelter Niedertemperaturwärmequellen thermodynamische Zusammenhänge identifiziert und deren ökologische und ökonomische Effekte in das Programm WP<sub>SOURCE</sub> integriert werden.

– **Kopplung von Solarenergie und Wärmepumpe**

Um eine ganzheitliche Betrachtung von Wärme und Strom zu ermöglichen, die neben der Raumheizung auch die Erwärmung von Trinkwasser sowie den Haushalts- und Betriebsstrom (z. B. Wärmepumpe, Regler, Zirkulationspumpen) eines Gebäudes berücksichtigt, können die im lokalen Bereich der Liegenschaft vorhandenen Anlagen zur thermischen Nutzung von Solarenergie sowie Photovoltaikanlagen in das Programm WP<sub>SOURCE</sub> integriert werden. Mit diesen zusätzlichen Informationen sowie auf der Grundlage zugehöriger numerischer Simulationen kann WP<sub>SOURCE</sub> um eine gesamtökologische Bewertung der betrachteten Liegenschaft inklusiv der Ausweisung der Eigenstromdeckungsanteile erweitert werden. Die Berücksichtigung von regenerativ erzeugtem Strom trägt zur Vergrößerung des Anteils der regenerativen Wärme- und Kälteversorgung mittels Wärmepumpen bei.

– **Gebäudekühlung für Bürogebäude**

Oft als Folge großer Verglasungsanteile in den Fassaden, aber auch durch Komfortansprüche der Nutzer, werden moderne Bürogebäude mit Möglichkeiten zur Gebäudekühlung ausgestattet. Aus diesem Grund soll ein Schwerpunkt bei der Erweiterung von WP<sub>SOURCE</sub> im Bereich der Kühlung von Bürogebäuden liegen. Dabei soll zunächst die Implementierung passiver Kühlung betrachtet und berücksichtigt werden. In einem weiteren Schritt kann durch die Integration einer reversiblen Wärmepumpe auch die Möglichkeit einer aktiven Kühlung integriert werden. Im Rahmen von aktiven Kühlmöglichkeiten kann eine bislang ausschließlich durch ihren elektrischen Energiebedarf berücksichtigte Serverkühlung als zusätzliche Last für eine Wärmepumpe aufgenommen werden.

– **Bivalente Betriebsweise von Wärmepumpe und zusätzlichem Wärmeerzeuger**

Insbesondere für Büros und andere Nicht-Wohngebäude, aber auch für Mehrfamilienhäuser, kann eine Heizungsanlage, die einen bivalenten Betrieb gestattet, sowohl ökologische als auch ökonomisch sinnvoll sein. Während die Deckung der Grundlast in den betrachteten Konzepten üblicherweise durch die Wärmepumpe erfolgt, werden Spitzenlasten oder Wärmebedarfe auf hohem Temperaturniveau z. B. von einem Gasbrennwertkessel bedient. WP<sub>SOURCE</sub> kann um Optionen und Algorithmen zur Bestimmung von Bivalenzpunkten sowie ökologischen und ökonomischen Bewertungen der bivalenten Betriebsweise erweitert werden.

– **Erweiterung der Nutzung von WP<sub>SOURCE</sub> auf Siedlungen und Quartiere**

Sämtliche im Rahmen des Projektes durchgeführte Berechnungen und Simulationen sind prinzipiell auf die Betrachtung von Siedlungen und/oder Quartieren skalier- und erweiterbar. Auch die Eingaben, Ausgaben, Optionen und Algorithmen von WP<sub>SOURCE</sub> können entsprechend angepasst werden.

– **Erweiterung der berücksichtigten Standorte**

Grundsätzlich kann das Programm WP<sub>SOURCE</sub> auf weitere Standorte, z. B. außerhalb Deutschlands, erweitert werden. Eine Erweiterung der betrachteten Standorte setzt genaue Recherchen der standortspezifischen Bedingungen unter allen in future:heatpump bisher betrachteten Aspekten voraus.

## 13 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

Die Ergebnisse des Projekts werden entsprechend dem Bearbeitungsfortschritt veröffentlicht, weitere Veröffentlichungen sind geplant. Eine Übersicht für die Jahre 2015 bis 2018 zeigen die weiteren Kapitel. Weitere Informationen können im Internet auf der Homepage des Instituts (<https://www.tu-braunschweig.de/igs>) im Bereich Forschung abgerufen werden.

### 13.1 Studentische Bearbeitungen

Tabelle 23 Studentische Bearbeitungen im Projekt – Bachelor- und Masterarbeiten

<b>Bachelorarbeit</b>	Niklas Kreye (2015): „Wärmequellen für Wärmepumpen“  Tom Bender (2015): „Gasabsorptions-Wärmepumpen vs. elektrisch angetriebene Wärmepumpen“  Tobias Wellert (2016): „Kopplung von PV-Anlagen und Wärmepumpen zur Steigerung des Eigenstromnutzungsanteils“  Ann-Kathrin Dreier (2017): „Umsetzung und Anwendung von Wärmepumpen in unterschiedlichen Klimazonen“  Bastian Ziebarth (2017): „Abluftwärmepumpen als Systemlösung für Passivhäuser“
<b>Masterarbeit</b>	Britta Crone (2015): „Anwendung von Wärmepumpen im Nahwärmenetz“

## 13.2 Veröffentlichungen und Vorträge

	Datum / Ausgabe	Wo	Titel	Autoren	Was
2015	16. + 17.06.2015	OTTI 14. Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, Neumarkt i. d. Opf.	future:heatpump - Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen	Franziska Bockelmann, M. Norbert Fisch, Mathias Schlosser, Markus Peter	Vortrag und Paper
	13.10.2015	Wärmepumpen - Innovative Lösungen, Stuttgart	future:heatpump Systemvergleich der Wärmepumpensysteme	Franziska Bockelmann	Vortrag
	20. + 21.10.2015	European Heat Pump Summit, Nürnberg	future:heatpump - Energetic and economic evaluation of heat sources for heat pumps	Franziska Bockelmann	Vortrag
	02. - 04.11.2015	Der Geothermie Kongress 2015, Essen	Was ist die richtige Wärmequelle für meine Wärmepumpe? - Energetische und wirtschaftliche Bewertung	Franziska Bockelmann, M. Norbert Fisch, Mathias Schlosser, Markus Peter	Vortrag und Paper
	18. - 20.11.2015	Deutsche Kälte- und Klimatagung 2015, Dresden	Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen	Franziska Bockelmann, M. Norbert Fisch, Mathias Schlosser, Markus Peter	Vortrag und Paper
2016	Ausgabe 03/16	KI Kälte, Luft, Klimatechnik Hüthing GmbH, Heidelberg	future:heatpump – Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen Erarbeitung eines Pre-Check-Tools	Franziska Bockelmann, Mathias Schlosser, Markus Peter	Artikel
	18. + 19.04.2016	OTTI 15. Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, Kloster Banz Bad Staffelstein	Wärmequellen für Wärmepumpen im Vergleich	Franziska Bockelmann, M. Norbert Fisch, Mathias Schlosser, Markus Peter	Vortrag und Paper
	2016	VDE Taschenbuch 2017 Kälte Wärme Klima	future:heatpump – Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen Erarbeitung eines Pre-Check-Tools	Franziska Bockelmann, M. Norbert Fisch, Mathias Schlosser, Markus Peter	Artikel
	17.+18.11.2016	Deutsche Kälte- und Klimatagung 2016, Kassel	Wärmequellen für Wärmepumpen im energetischen und wirtschaftlichen Vergleich	Franziska Bockelmann, M. Norbert Fisch, Mathias Schlosser, Markus Peter	Vortrag und Paper
	29.11.-01.12.2016	Der Geothermie Kongress 2016, Essen	Pre-Check-Tool für Wärmepumpen: Vergleich von Wärmequellen für Wärmepumpen	Franziska Bockelmann, M. Norbert Fisch, Mathias Schlosser, Markus Peter	Vortrag und Paper
	30.+31.01.2017	Konferenz 2017: EnergieWendeBauen, Berlin	future:heatpump – Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen	Franziska Bockelmann, M. Norbert Fisch, Mathias Schlosser, Markus Peter	Poster und Tagungsbandbeitrag
	Ausgabe 04/17	KI	WP <sub>source</sub> - Ein Pre_check-Tool zur überschlägigen Ermittlung und Prüfung von Wärmequellen und Wärmeübertragern für Wärmepumpen	Franziska Bockelmann, Mathias Schlosser, Markus Peter	Artikel
Frühjahr 2017	KKA und tab	WP <sub>source</sub> – ein im Rahmen des Forschungsprojektes future:heatpump entwickeltes Tool zur Vorauswahl und Bewertung von Niedertemperaturwärmequellen und - wärmeübertragern für Wärmepumpen	Franziska Bockelmann, Mathias Schlosser, Markus Peter	Artikel	
Ausgabe 01/2017	Ingenieurspiegel	WP <sub>source</sub> – Pre-Check-Tool zur Vorauswahl und Bewertung von Niedertemperaturwärmequellen und - wärmeübertragern für Wärmepumpen	Franziska Bockelmann, Mathias Schlosser, Markus Peter	Artikel	
15.-18.05.2017	12th IEA Heat Pump Conference 2017, Rotterdam	Pre-Check for heat pumps: comparison of heat sources for heat pumps	Franziska Bockelmann, M. Norbert Fisch, Mathias Schlosser, Markus Peter	Poster und Paper	
12. - 14.09.2017	Der Geothermie Kongress 2017, München	Performance von Wärmeübertragern in der Praxis - Verschiedene Wärmequellen für Wärmepumpen	Franziska Bockelmann, M. Norbert Fisch, Mathias Schlosser, Markus Peter	Vortrag und Paper	
22. - 24.11.2017	Deutsche Kälte- und Klimatagung 2017, Bremen	Leistungsfähigkeit von Wärmeübertragern für Wärmepumpen - Planung und Praxis	Franziska Bockelmann, M. Norbert Fisch, Mathias Schlosser, Markus Peter	Vortrag und Paper	
2018	Ausgabe 03/2018	HLH	Vorauswahl von Niedrigtemperaturwärme- quellen und -übertragern für Wärmepumpen mittel WP Source	Franziska Bockelmann, Markus Peter, Mathias Schlosser	Artikel
	Ausgabe 6-7/18	KI Kälte-Luft-Klimatechnik	Leistungsfähigkeit von Wärmeübertragern für Wärmepumpen - Planung und Praxis	Franziska Bockelmann, Markus Peter, Mathias Schlosser	Artikel
	Ausgabe 06/2018	BINE	Welche Wärmequellen sind optimal für Wärmepumpen?	Franziska Bockelmann, Markus Peter, Mathias Schlosser	Artikel
	09.10.2018	C.A.R.M.E.N Aschaffenburg	Fachgespräch "Wärmepumpen für Neubau und Bestand"	Franziska Bockelmann, Markus Peter, Mathias Schlosser	Präsentation
	29.11.2018	Der Geothermie Kongress 2018, Essen	Planungs- und Konzeptwerkzeug für Wärmequellen und -übertrager für Wärmepumpen	Franziska Bockelmann, Markus Peter, Mathias Schlosser	Vortrag und Paper

## 14 QUELLEN UND LITERATUR ZUM PROJEKT

Alle Angaben zu den Gebäuden und Wärmeübertragungssystemen sowie angegebenen Kenndaten, Kosten und Randbedingungen basieren auf Anfragen und Angaben der Gebäudebetreiber, Bauherren oder zuständigen Kontaktpersonen der Gebäude sowie Hersteller und befragten Firmen.

- [1] Bockelmann, F., Kipry, H., Fisch, M. N.: Forschungsbericht: WKSP – Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude, BMWi Fkz 032736A, November 2010.
- [2] Miara, M., Günther, D., Kramer, T., Oltersdorf, T., Wapler, J.: Wärmepumpen Effizienz Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb, BMWi Fkz 0327401A, Mai 2011.
- [3] Miara, M., et al: WP Monitor, Fraubhofer ISE, seit September 2013.
- [4] bwp - Bundesverband Wärmepumpen e.V: Wärmepumpenmarktanteile in Deutschland 2007 bis 2014 und 2013 bis 2017
- [5] bwp - Bundesverband Wärmepumpen e.V: Absatzzahlen für Heizungswärmepumpen in Deutschland jeweils 2005 bis 2017
- [6] bwp - Bundesverband Wärmepumpen e.V: Wärmepumpen-Marktanteile in Deutschland, 2003 - 2017
- [7] TRNSYS 17, TRaNsient SYstem Simulationprogramm, Version 17.02.0004, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison
- [8] Meteonorm® 7, Global Meteorological Database for Engineers, Planners and Education, Version 7.1.10.25939, Meteotest, Bern (CH), 2015
- [9] European Commission, Directorate-General for Energy and Transport, DG TREN, TREN D1 D(2002) M/324, Mandate to CEN and CENELEC for the elaboration and adoption of measurement standards for household appliances: water-heaters, hot water storage appliances and water heating systems, Brussels, 27th September 2002
- [10] VDI Richtlinie 2067, Blatt 1: „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen: Grundlagen und Kostenberechnung“, September 2012
- [11] Baukostenindex, BKI Baukosten Positionen 2017 Neubau, BKI Objektdaten Technische Gebäudeausrüstung 2017
- [12] ISFH:“Terra-Quelle-Solar: Erdwärmekollektoren und Sonnenkollektoren als optimierte bivalente Quelle für hocheffiziente Wärmepumpensysteme“, Forschungsprojekt vom BMWi gefördert (Fkz 03ET1275A)

## 15 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

$A_N$	Gebäudenutzfläche nach EnEV
AP	Arbeitspaket
AW	Abwasserwärmeübertrager
AW	Außenwand
AZ	Arbeitszahl
BGF:	Bruttogrundfläche
BKT	Betonkerntemperierung
COP	Coefficient of Performance (für Wärmepumpen) / Leistungszahl
EFH	Einfamilienhaus
EIS	Eisspeicher (mit Solar- und Luftabsorber)
EP	Energiepfahl
ET	eTank
EWK	Erdwärmekorb
EWS	Erdwärmesonde
EZ	Stromzähler
FBH	Fußbodenheizung
FK	Flächenkollektor
FK	Freie Kühlung
GW	Grundwasser / Brunnen
HZG	Raumheizung
JAZ	Jahresarbeitszahl
KM	mechanische Kühlung mittels umschaltbarer Wärmepumpe
KMZ	Kältemengenzähler
L	Luft
LW-WP	Luft-Wasser-Wärmepumpe
LZWP	Langzeitwärmespeicher
MEZ	Mitteuropäische Zeit
MFH	Mehrfamilienhaus
NGF	Nettogrundfläche
OG	Übertragungssysteme für Seen, offene Gewässer etc.
PS	Pufferspeicher
PV	Photovoltaik
PWS	Phasenwechselsonde
$Q_p$	Primärenergiebedarf
RL	Rücklauf
RLT	Raumluftechnik
SF	Sonderform
SPF	Seasonal Performance Faktor
SPS	Spiralsonde
ST	Solarthermie

TRY	Testreference Year, Testreferenzjahr
TWE	Trinkwassererwärmung
TWW	Trinkwarmwasser
UP	Umwälzpumpe
VL	Vorlauf
WMZ	Wärmemengenzähler
WOZ	Ware Ortszeit
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung
$V_e$	beheiztes Gebäudevolumen nach EnEV

## 16 ANHANG

### 16.1 Wärmeübertragersteckbriefe



#### Erdwärmesonde

##### Allgemeines

Die Erdwärmesonde gehört zu den geschlossenen Wärmeübertragersystemen. Größtenteils handelt es sich dabei um Doppel-U-Rohr-Sonden aus Kunststoff, welche mit einem Wärmeträgermedium (Wasser-Sole-Gemisch) durchströmt werden. Weitere Ausführungsformen sind die Einfach-U-Rohr-Sonde sowie die Koaxialsonde. Die Tiefe und Anzahl der Bohrungen hängt entscheidend von den vorliegenden Gesteinseigenschaften und dem Grundwasserfluss ab.

##### Technische Daten

<b>Material</b>	Polyethylen (PE, PE-Xa, PE 100 RC, ...)	
<b>Abmessung</b>	Länge <sub>Sonde</sub>	50 - 400 m
	∅ <sub>Rohr-außen</sub>	32 - 63 mm

##### ennwerte (abhängig von Randbedingungen und Bodenklasse)

<b>Spez. Entzugsleistung</b>	30 - 100 W/m
<b>Spez. Eintragsleistung</b>	30 - 100 W/m

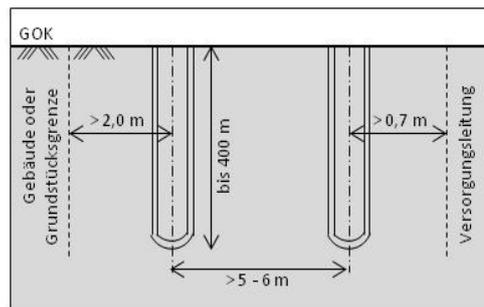
**Temperaturniveau der Quelle** 10 - 20 °C  
 (Erdreich ungestört)

**Wärmeträgermedium** Wasser oder  
 Wasser-Glykol-Gemisc

##### Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Die Erdwärmesonde wird durch vertikale oder schräge Bohrungen in den Untergrund bis zu einer Tiefe von 400 m eingebracht. Zur thermischen Anbindung an das Erdreich werden die Bohrlöcher mit einem Verfüllmaterial verfüllt.

Bei der Platzierung der Erdwärmesonden ist ein Abstand der Sonden zueinander von mindestens 5 - 6 m zu beachten, sowie einen Abstand von 0,7 m zu Versorgungsleitungen und 2,0 m zur Grundstücksgrenze oder Gebäuden einzuhalten.



##### Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

<b>Materialkosten</b>	20 €/m	<b>Zusätzliche Leistungen (u.a. bundeslandabhängig)</b> Thermal Response Test (TRT), Genehmigungen, Auslegung und Versicherung
<b>Installation/Einbau</b> (Bohrung und Anbindung)	50 €/m	
<b>Planung / Genehmigung</b>	400 - 4.000 €	

##### Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude  
 Nachträglicher Einbau auch bei Bestandsgebäuden möglich

##### Randbedingungen/Bemerkung

- Wasserrechtliche Genehmigung erforderlich
- Sondentiefe > 100 m: bergrechtliche Genehmigung erforderlich
- Standfestigkeit des Gebäudes darf durch den Bau von Erdwärmesonden nicht beeinträchtigt werden
- Leitfäden und Randbedingungen der jeweiligen Bundesländer sind zu beachten
- Dokumentations- und Nachweispflichten sind zu beachten (bundeslandabhängig)
- Thermal Response Test bei größeren Anlagen erforderlich
- Versicherung erforderlich



## Erdwärmekorb

### Allgemeines

Erdwärmekörbe gehören zu den oberflächennaheren geschlossenen Wärmeübertragern. Sie bestehen aus einem Rohr, welches zu einem Korb gewickelt wird.

### Technische Daten

<b>Material</b>	Polyethylen (PE, PE-Xa, PE100, ...)	
<b>Abmessung</b>	Höhe <sub>Korb</sub>	1,2 - 2,7 m
	∅ <sub>Korb</sub>	0,9 - 4,0 m
	Länge <sub>Rohr</sub>	150 - 200 m
	∅ <sub>Rohr-außen</sub>	32 - 63 mm

**Temperaturniveau der Quelle** 5 - 15 °C  
 (Erdreich ungestört)

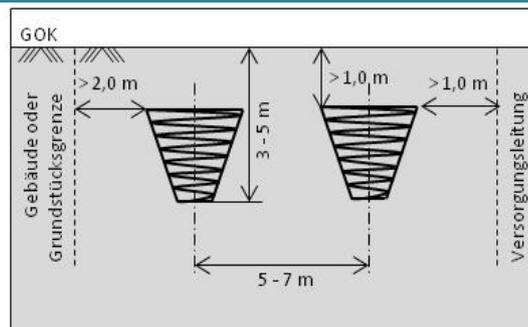
### ennwerte (abhängig von Randbedingungen und Bodenklasse)

<b>Spez. Entzugsleistung</b>	700 - 2.000 W/Korb
<b>Spez. Eintragsleistung</b>	k.A.

**Wärmeträgermedium** Wasser-Glykol-Gemisc

### Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Erdwärmekörbe werden in einem Bodenaushub bis zu einer Tiefe von 5,0 m eingesetzt und mit einer Wasser-Sand-Schlemme wieder verfüllt. Der Achsabstand der Körbe zueinander sollte 5 - 7 m betragen. Ein Abstand von min. 2,0 m ist zu angrenzenden Grundstücken oder Gebäuden sowie von min. 1,0 m zu Versorgungsleitungen einzuhalten.



### Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

<b>Materialkosten</b>	1.600 €/Korb	<b>Zusätzliche Leistungen (u.a. bundeslandabhängig)</b>
<b>Installation/Einbau</b> (Aushub und Anbindung)	1.200 - 2.100 €/Korb	Auslegung, Genehmigung (Anzeige)
<b>Planung / Genehmigung</b>	150 - 350 €/Korb	

### Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser  
 Nachträglicher Einbau auch bei Bestandsgebäuden möglich, wenn Platz vorhanden

### Randbedingungen/Bemerkung

- Wasserrechtliche Genehmigungen können erforderlich sein, anzeigepflichtig
- Dokumentations- und Anzeigepflicht des jeweiligen Bundeslandes beachten
- Einhaltung der Mindestabstände zur Gewährleistung des Abführens des Niederschlags bei Eisbildung
- Regeneration durch Witterung und solarer Einstrahlung
- Überbauung oder Versiegelung ist nicht zulässig



## Spiralsonde

### Allgemeines

Die Spiralsonde gehört zu den oberflächennahen geschlossenen Wärmeübertragern. Bei Spiralsonden wird das Übertragerrrohr zu einer Spirale aufgewickelt. Die Anzahl der Sonden werden wesentlich von den vorhandenen Bodenarten und dem Grundwasser beeinflusst.

### Technische Daten

<b>Material</b>	Polyethylen (PE, PE-Xa, PE100, ...)	
<b>Abmessung</b>	Länge <sub>Sonde</sub>	3 - 15 m
	∅ <sub>Sonde</sub>	260 - 520 mm
	∅ <sub>Rohr-außen</sub>	25 - 32 mm

**Temperaturniveau der Quelle** 5 - 15 °C  
 (Erdreich ungestört)

### ennwerte (abhängig von Randbedingungen und Bodenklasse)

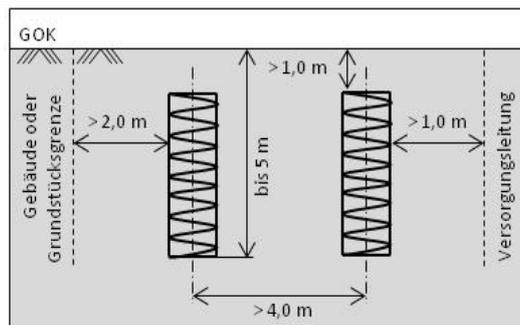
**Spez. Entzugsleistung** 200 - 1.500 W/Sonde

**Spez. Eintragsleistung** k.A.

**Wärmeträgermedium** Wasser-Glykol-Gemisc

### Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Die Spiralsonde wird bis in eine Tiefe von 5,0 m in das Erdreich abgeteuft. Mittels eines Spiralbohreres werden Löcher gebohrt, die Sonde eingesetzt und mittels einer Wasser-Sand-Schlemme verfüllt und verdichtet. Der Achsabstand der Spiralsonden untereinander sollte min. 4,0 m betragen. Ein Mindestabstand von 1,0 m zu anderen Versorgungsleitungen und 2,0 m zu Gebäuden und Grundstücksgrenzen ist ein zu halten.



### Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

<b>Materialkosten</b>	700 €/Sonde	<b>Zusätzliche Leistungen (u.a. bundeslandabhängig)</b>
<b>Installation/Einbau</b> (Aushub und Anbindung)	700 - 2.600 €/Sonde	Auslegung, Genehmigung (Anzeige)
<b>Planung / Genehmigung</b>	100 - 550 €/Sonde	

### Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser

Nachträglicher Einbau auch bei Bestandsgebäuden möglich, wenn Platz vorhanden

### Randbedingungen/Bemerkung

- Dokumentations- und Anzeigepflichten der jeweiligen Bundesländer beachten
- Wasserrechtliche Genehmigung muss ggf. berücksichtigt werden, genehmigungsfrei aber anzeigepflichtig
- Regeneration erfolgt durch Witterung und solarer Einstrahlung
- Überbauung oder Versiegelung ist nicht zulässig



## Flächenkollektor

### Allgemeines

Der Flächenkollektor ist ein geschlossenes System und gehört zu den oberflächennaheren Erdreichwärmeübertragern. Er wird großflächig, horizontal aus gelegten Rohren oder Kapillarrohrmatten hergestellt. Die Größe der Kollektorfläche hängt im Wesentlichen von der Regenwasserdurchlässigkeit und den Eigenschaften der Bodenschichten ab.

### Technische Daten

**Material** Polyethylen (PE, PE-Xa, PE 100 RC, ...)  
**Abmessung**  $\varnothing_{\text{Rohr-außen}}$  20 - 40 mm

### ennwerte (abhängig von Randbedingungen und Bodenklasse)

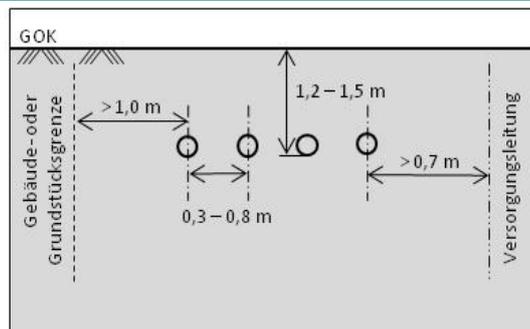
**Spez. Entzugsleistung** 10 - 40 W/m<sup>2</sup>  
**Spez. Eintragsleistung** 10 - 40 W/m<sup>2</sup>

**Temperaturniveau der Quelle** 0 - 10 °C (Winter)  
 (Erdreich ungestört) 10 - 20 °C (Sommer)

**Wärmeträgermedium** Wasser-Glykol-Gemisch

### Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Der Flächenkollektor wird in einer Tiefe von > 1,2 m (frostfrei) verlegt. Dabei ist ein Mindestabstand der Rohre zueinander von 0,3 - 0,8 m einzuhalten. Zu Versorgungsleitungen muss ein Abstand von mindestens 0,7 m und zu Gebäuden oder der Grundstücksgrenze von > 1,0 m eingehalten werden. Ein Rohrkreis sollte nicht länger als 100 m sein. Verlegearten sind Schnecke, Tichelmann, Mäander, etc.



### Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

**Materialkosten** 15 €/m<sup>2</sup>  
**Installation/Einbau** 20 - 50 €/m<sup>2</sup>  
 (Aushub und Anbindung)  
**Planung / Genehmigung** 5 - 10 €/m<sup>2</sup>

**Zusätzliche Leistungen (u.a. bundeslandabhängig)**  
 Auslegung und Anzeige

### Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser; Nichtwohngebäude auch möglich jedoch hoher Flächenbedarf

### Randbedingungen/Bemerkung

- genehmigungsfrei, aber anzeigepflichtig; ggf. wasserrechtliche Genehmigung erforderlich
- Dokumentations- und Anzeigepflichten der jeweiligen Bundesländer beachten
- Regeneration erfolgt durch Witterung und solare Einstrahlung
- Überbauung oder Versiegelung ist nicht zulässig
- Berücksichtigung der Beeinträchtigung von vegetativen Prozessen, Anbau nur begrenzt möglich
- hoher Flächenbedarf; Flächenauslegung ist durch die verfügbare Freifläche begrenzt



## Luft-Wasser-Wärmepumpe

### Allgemeines

Die Wärmepumpe kann innen als auch außen aufgestellt werden. In der Monoblock-Ausführung befinden sich alle wichtigen Komponenten innerhalb der Wärmepumpe. Bei Split-Geräten sind bis auf den Verflüssiger alle für den Kältekreis notwendigen Komponenten in der Außeneinheit. Die Inneneinheit beinhaltet den Verflüssiger und die hydraulischen Komponenten sowie die Regelung. Umfangreiche Erdarbeiten oder Bohrungen entfallen.

### Technische Daten

**Material** Gehäuse / Abdeckhaube Blech  
**Abmessung** TxBxH (z. B. EFH) 2,0 x 2,0 x 2,0 m  
 (abhängig von Bauweise: Monoblock oder Split-Gerät sowie therm. Leistung)

### Kennwerte (abhängig von Randbedingungen)

**Spez. Heizleistung** 6 bis > 100 kW

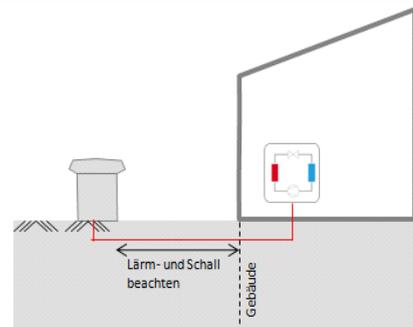
**Temperaturniveau der Quelle** -7 bis 30 °C  
 (Außenluft)

**Wärmeträgermedium** Kältemittel

### Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Bei der Platzierung der Luft-Wasser-Wärmepumpe im Außenraum sind die Immissionsrichtwerte zu beachten (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm), Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)).

Für die Innen- als auch Außenaufstellung sind die Vorgaben zu den Abstände des Herstellers zu beachten und zwischen Zu- und Abluftöffnung ein erforderlicher Mindestabstand einzuhalten.



### Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

<b>Wärmepumpe</b>	ON-OFF	600 - 1.300 €/kW	<b>Zusätzliche Leistungen (u.a. bundeslandabhängig)</b>
	Inverter	1.000 - 1.500 €/kW	

### Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude  
 Nachträglicher Einbau auch bei Bestandsgebäuden möglich

### Randbedingungen/Bemerkung

- keine behördliche Genehmigungen erforderlich
- Leitfäden und Randbedingungen der jeweiligen Bundesländer sind zu beachten
- Lärm- und Schallpegel ist zu beachten



## Eisspeicher + Luftabsorber

### Allgemeines

Es handelt sich hierbei um eine Kombination aus einem Betontank mit eingebautem Wärmeübertrager und Luftabsorbern auf den Dachflächen, die beide als Quelle für die Wärmepumpe arbeiten. Das System kann zum Heizen als auch zum Kühlen verwendet werden. Liefert der Luftabsorber nicht genügend Energie, wird dem Eisspeicher die benötigte Energie entzogen. Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, wird die Vereisung des Wassers zur weiteren Energiegewinnung genutzt. Regeneriert wird der Eisspeichers durch den Luftabsorber oder im Kühlfall.

### Technische Daten

### Kennwerte (abhängig von Randbedingungen)

#### Eisspeicher

<b>Material</b>	Betontank mit Wärmeübertrager aus Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP)	<b>Spez. Entzugsleistung</b>	4 - 18 kW
<b>Abmessung</b>	Höhe bis zu 3,3 m Ø <sub>Speicher</sub> bis 2,7 m oder Sonderanfertigungen	<b>Spez. Eintragsleistung</b>	3,5 - 7 kW
<b>Temperaturniveau</b>	< 0 - 30 °C	<b>Wärmeträgermedium</b>	Wasser u. Wasser-Glykol-Gemisch

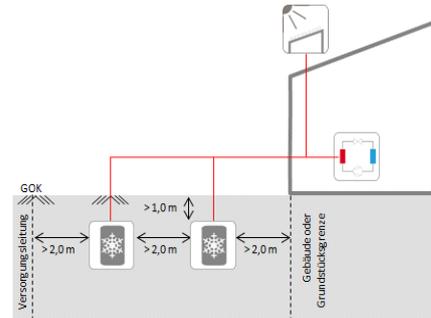
#### Luftabsorber

<b>Material</b>	Polyethylen (PE), Polypropylen (PP)	<b>Spez. Entzugsleistung</b>	60 - 100 W/m <sup>2</sup>
<b>Abmessung</b>	Länge 2 - 4 m Breite 1 - 1,5 m	<b>Spez. Eintragsleistung</b>	k.A.
<b>Temperaturniveau Wärmequelle</b>	5 - 30 °C	<b>Wärmeträgermedium</b>	Wasser-Glykol-Gemisch

### Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Der Eisspeicher wird in Tiefen > 4 m im Erdreich vergraben. Bei der Ausführung muss ein Mindestabstand von 2 m zu angrenzenden Gebäuden, zwischen den Eisspeichern und zu wasserführenden Leitungen gewährleistet sein. Ist dieses nicht einzuhalten, müssen diese Leitungen entsprechend gedämmt werden.

Der Luftabsorber wird auf Dach montiert und an das System angebunden. Eine Aufständerung der Absorber ist möglich.



### Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

<b>Eisspeicher</b> (Material und Einbau)	500 - 2.000 €/m <sup>3</sup>	<b>Luftabsorber</b> (Material und Einbau)	250 €/m <sup>2</sup>
<b>Planung / Genehmigung</b>	~1.000 €		

### Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude  
 Nachträglicher Einbau auch bei Bestandsgebäuden möglich

### Randbedingungen/Bemerkung

- genehmigungsfrei; unkritisch für das Grundwasser
- Individueller Einbau, da keine Bohrungen notwendig
- Speicherdimensionierung abhängig vom Wärmebedarf, daher können große Volumen auftreten



## Brunnen

### Allgemeines

Das Brunnensystem zählt zu den offenen Systemen. Wenn Grundwasser in ausreichender Menge, Temperatur und Qualität und in nicht zu großer Tiefe vorhanden ist, kann es über einen Förderbrunnen dem Boden entnommen und der Wärmepumpe zugeführt werden. Das abgekühlte Wasser wird über einen Schluckbrunnen zurückgeleitet. Brunnen können neben dem Heizen auch zur passiv sowie zur aktiven Kühlung verwendet werden.

### Technische Daten

<b>Material</b>	Edelstahl / Stahl, PVC
<b>Abmessung</b>	Tiefe <sub>Brunnen</sub> bis 200 m
	∅ <sub>Brunnen-außen</sub> 250 - 725 mm
	∅ <sub>Rohr-außen</sub> 100 - 400 mm

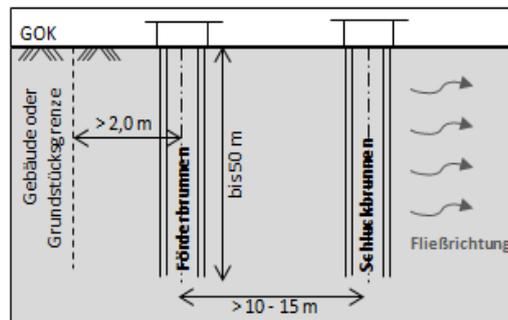
**Temperaturniveau der Quelle** 7 - 12 °C  
 (Grundwasser ungestört)

### ennwerte (abhängig von Randbedingungen und Bodenklasse)

<b>Spez. Entzugsleistung</b>	500 - 600 W/m <sup>3</sup> /h
<b>Spez. Eintragsleistung</b>	k.A.
<b>Wärmeträgermedium</b>	Grundwasser

### Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Bei der Umsetzung der Brunnen ist die Lage und der Abstand abhängig von der Fließrichtung, dem Gefälle und der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers. Der Mindestabstand zwischen den Brunnen beträgt 10 - 15 m und soll einen hydraulisch-thermischen Kurzschluss vermeiden. Zudem muss ein Abstand von 2,0 m zu Gebäuden eingehalten werden. Weiterhin ist die chemische Zusammensetzung des Grundwassers zu beachten.



### Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

<b>Materialkosten</b>	70 €/m	<b>Zusätzliche Leistungen (u.a. bundeslandabhängig)</b>
<b>Installation/Einbau</b> (Bohrung und Anbindung)	260 €/m	Pumpversuch und Wasserprobe, Genehmigung, Auslegung und Versicherung
<b>Planung / Genehmigung</b>	50 - 200 €/m	

### Einsatzgebiete

Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude; Ein- und Zweifamilienhäuser seltener, da kostenintensiv  
 Nachträglicher Einbau auch bei Bestandsgebäuden möglich

### Randbedingungen/Bemerkung

- Brunnentiefe > 100 m: bergrechtliche Genehmigung erforderlich
- Leitfäden und Randbedingungen der jeweiligen Bundesländer sind zu beachten; ggf. Förderbegrenzung
- Dokumentations- und Nachweispflichten sind zu beachten (bundeslandabhängig)
- Pumpversuch und Wasserprobe zur Beurteilung der Grundwasserqualität erforderlich
- Versicherung erforderlich
- Die Standsicherheit der Gebäuden darf nicht gefährdet werden.
- Förder- und Schluckbrunnen außerhalb von Verkehrsflächen positionieren und für spätere Wartungsarbeiten zugänglich
- Brunnenreinigung /-regenerierung ist im Laufe des Betriebes einzuplanen
- Bei größeren Anlagen wird vorab eine numerische, hydraulisch-thermische Grundwassermodellierung empfohlen.



## Abwasserwärmeübertrager

### Allgemeines

Beim Abwasserwärmetauscher handelt es sich um ein modulares Wärmetauschersystem für den nachträglichen Einbau in Bestands- und Neubaukanäle. Die Wärmetauscheroberfläche wird vollflächig vom warmen Abwasser überströmt. Der Wärmetauscher selbst wird vom Wärmeträgermedium durchströmt und entzieht so dem Abwasser die Wärme.

### Technische Daten

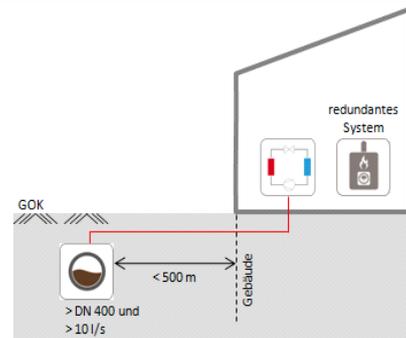
<b>Material</b>	Polypropylen (PP) mit Edelstahlgestell
<b>Abmessung</b>	Modul Länge ~ 1,00 m Modul Breite ~ 0,65 m
<b>Temperaturniveau der Quelle</b> (Abwasser)	8 - 20°C

### Kennwerte (abhängig von Randbedingungen)

<b>Spez. Entzugsleistung</b>	350 - 1.800 W/m <sup>2</sup>
<b>Spez. Eintragsleistung</b>	k.A.
<b>Wärmeträgermedium</b>	Wasser

### Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Die einzelnen Wärmetauschermodule werden über die vorhandene Schachtingrastruktur in den Kanal eingebracht und betriebssicher montiert. Die Anbindung zwischen Kanal und Verbraucher sollte gering gehalten werden und 500 m nicht übersteigen. Zudem ist darauf zu achten, dass der Kanal mindestens einen Kanalquerschnitt DN 400 und einen Trockenabfluss von mind. 10 l/s aufweist.



### Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

<b>Materialkosten</b> (inkl. Einbau)	1.300 €/m <sup>2</sup>	<b>Zusätzliche Leistungen (u.a. bundeslandabhängig)</b> Auslegung, Genehmigungen, Kanalreinigung, redundantes Versorgungssystem erforderlich
<b>Baustelleneinr. und Anbindung</b>	15.000 €	
<b>Planung / Genehmigung</b>	45 €/m <sup>2</sup>	

### Einsatzgebiete

Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude  
 Nachträglicher Einbau auch bei Bestandsgebäuden möglich

### Randbedingungen/Bemerkung

- Effektive Versorgung nur für Abnehmer mit hohem Wärmebedarf (mindestens 25 kW Heiz- oder Kühlleistung)
- Verengung des Abwasserkanalquerschnitts ist zu berücksichtigen
- Genehmigungspflicht bei Abwasserwerken / -betrieb
- Redundantes System (zwingend notwendig) dient zur Bedarfsdeckung bei Defekten oder Ausfällen
- Berücksichtigung der Sielhautbildung, Reinigungen und Wartungen des Kanals sind erforderlich



## Energiepfahl

### Allgemeines

Energiepfählen sind thermisch aktivierte Gründungspfähle die zur Übertragung von Wärme aus oder an das Erdreich genutzt werden. Hierfür werden in den Gründungspfählen Rohrleitungsschleifen (U-, mäander- oder spiralförmige Wicklungen) eingebaut, die der Wärmeübertragung dienen. Es handelt sich hierbei um das gleiche Prinzip wie bei der Erdwärmesonde, nur dass konstruktive massive Bauteile dafür thermisch aktiviert werden und so Synergieeffekte genutzt werden können.

### Technische Daten

### Werte (abhängig von Randbedingungen und Bodenklasse)

<b>Material</b>	Stahlbeton mit Polyethylenrohren (PE)	<b>Spez. Entzugsleistung</b>	40 - 85 W/m	
<b>Abmessung</b>	Länge	10 - 30 m	<b>Spez. Eintragsleistung</b>	20 - 60 W/m
	$\varnothing_{\text{Pfahl}}$	bis 0,6 m und größer		
	$\varnothing_{\text{Rohr}}$	20 - 32 mm		
<b>Temperaturniveau der Quelle</b>	5 - 15 °C	<b>Wärmeträgermedium</b>	Wasser	

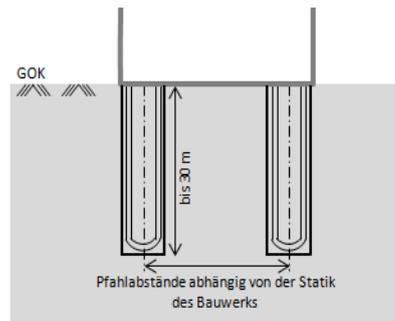
(Erdreich ungestört)

### Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Energiepfähle werden je nach statischen Bedingungen bis zu 30 m in das Erdreich eingebracht.

Die Tragfähigkeit des Pfahls darf durch die Aktivierung nicht gefährdet werden. Eintrittstemperaturen < 5 °C sind daher nicht erlaubt.

Der Pfahlabstand wird durch die Statik vorgegeben.



### Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

<b>Materialkosten</b>	gesamt rund	<b>Zusätzliche Leistungen (u.a. bundeslandabhängig)</b>
<b>Einbau (Rohre)</b>	95 €/m	Genehmigung / Anzeige
<b>Planung / Genehmigung</b>		

### Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude

### Randbedingungen/Bemerkung

- Genehmigungs- und anzeigespflichtig
- Maximale Einbautiefe 30 m oder gemäß Statik
- Einsatz möglich als Pendelpeicher (Heiz- und Kühlbetrieb)
- Einsatz in Trinkwasserschutzonen möglich



## Gewässer

### Allgemeines

Der Wärmeübertrager wird in der Regel im Gewässer (See, Fluss, ...) über Verankerungen an der Gewässersohle und / oder am Uferbereich befestigt. Der Wärmeübertrager dient zur Wärmegewinnung aus dem umgebenden Wasser und wird über Anschlussleitungen mit der Wärmepumpe gekoppelt. Des Weiteren kann der Wärmeübertrager auch für die Gebäudekühlung genutzt werden.

### Technische Daten

<b>Material</b>	Polyethylen (PE)	
<b>Abmessung</b>	Höhe	110 cm
	Breite	110 cm

### Kennwerte (abhängig von Randbedingungen)

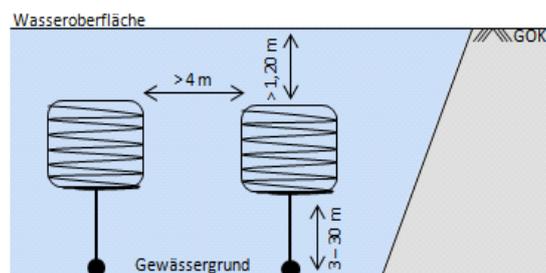
<b>Spez. Entzugsleistung</b>	6 - 15 kW/Einheit
<b>Spez. Eintragsleistung</b>	6 - 26 kW/Einheit

**Temperaturniveau der Quelle** 3 - 24 °C  
 (Gewässer, See, Meer)

**Wärmeträgermedium** Wasser oder  
 Wasser-Glykol-Gemisc

### Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Der Wärmetauscher wird in 3 - 30 m Tiefe über dem Gewässergrund installiert. Der Abstand zu anderen Wärmetauschern muss min. 4 m betragen. Der Wärmetauscher kann mittels eines Ausgleichgewichts auf dem Gewässergrund oder alternativ durch Verankerungen an Pfahlkonstruktionen oder Bootsstegen montiert werden. Die Anbindeleitung wird auf dem Grund des Gewässers verlegt.



### Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

<b>Materialkosten</b>	6.000 €/Einheit	<b>Zusätzliche Leistungen (u.a. bundeslandabhängig)</b>
<b>Installation/Einbau</b>	1.500 €	Genehmigung
<b>Planung / Genehmigung</b>	k.A.	

### Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude

### Randbedingungen/Bemerkung

- ggf. Genehmigungspflicht bei öffentlichen Gewässern
- keine Korrosionsgefahr, da keine metallischen Bauteile



## Flächenkollektor (eTank)

### Allgemeines

Bei dem eTank handelt es sich um eine Art von Energiespeicher, der unter oder neben dem Gebäude errichtet wird. Der Aufbau besteht bis zu einer Tiefe von 1,50 m aus mehreren Schichten Erdreich, in denen Rohre verlegt werden. Zusätzlich wird das aufgefüllte Erdreich vertikal und nach oben gegen das angrenzende Erdreich thermisch gedämmt. Das Prinzip des eTanks besteht darin, dass das Erdreich über Solarenergie (Solarkollektoren) oder anderen Energiequellen (Wärmeeintrag im Sommer) erwärmt wird. Im Heizfall wird die im Erdreich gepufferte Energie über eine Wärmepumpe nutzbar gemacht.

### Technische Daten

**ennwerte** (abhängig von Randbedingungen und Bodenklasse)

**Material** Sand, Polyethylen, Dämmmaterial  
**Abmessung** Sonderanfertigungen

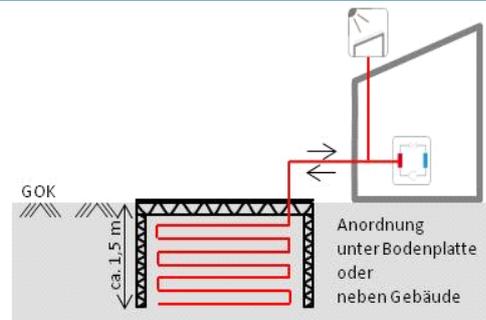
**Spez. Entzugsleistung** k.A.  
**Spez. Eintragsleistung** k.A.

**Temperaturniveau der Quelle** 6 - 23 °C  
 (Erdreich ungestört)

**Wärmeträgermedium** Wasser-Glykol-Gemisc

### Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Der eTank wird mittels Folientechnik und Dämmung vom angrenzenden Erdreich abgetrennt. In dem Speicher sind die PE-Rohre verlegt. Der Speicher hat eine maximale Tiefe von 1,5 m



### Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

**Materialkosten** eTank rund  
**Installation/Einbau** 70 €/m<sup>3</sup> plus  
 Regenerations-  
 system  
**Planung / Genehmigung**

**Zusätzliche Leistungen (u.a. bundeslandabhängig)**  
 Solaranlage zur Regeneration, Genehmigung

### Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude

### Randbedingungen/Bemerkung

- Muss aktiv regeneriert werden; z.B. Solarthermie, Luftabsorber, o.ä.
- Anzeigepflicht im Zuge des Baugenehmigungsverfahrens
- Planung und Ausführung abhängig von dem Projekt (NGF, Heiz- Kühllast etc.)



## Erdwärmesonde (geoKOAX)

### Allgemeines

geoKOAX-Erdwärmesonde ist ein geschlossenes Koaxial-Rohr-Systeme, welche mit einem Wärmeträgermedium gefüllt ist und durch ihre Größe als Speichersonde gilt. Kern der geoKOAX-Erdwärmetausch-Technologie ist die passive Verwirbelung. Durch einen permanenten Wechsel von laminarer zu turbulenter Strömung wird der Wärmeübergangskoeffizienten gesteigert.

### Technische Daten

<b>Material</b>	PE 100-RC	
<b>Abmessung</b>	Länge	bis 100 m
	∅ Bohrloch	200 mm
	∅ Rohr-außen	140 mm

**Temperaturniveau der Quelle** 10 - 20 °C  
 (Erdreich ungestört)

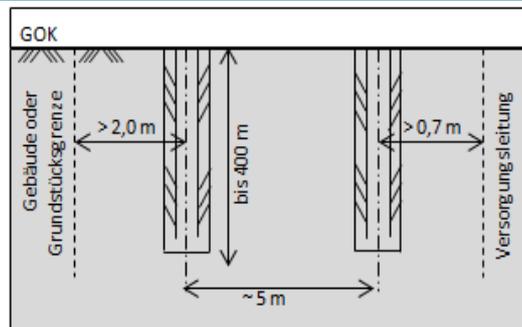
### ennwerte (abhängig von Randbedingungen und Bodenklasse)

<b>Spez. Entzugsleistung</b>	30 - 100 W/m
<b>Spez. Eintragsleistung</b>	30 - 100 W/m

**Wärmeträgermedium** Wasser oder  
 Wasser-Glykol-Gemisc

### Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Die Erdwärmesonden werden bis zu einer Tiefe von 100 m in das Erdreich mittels entsprechender Bohrungen eingebracht. Bei der Platzierung der Erdwärmesonden ist ein Abstände der Sonden zueinander von rund 5 m zu beachten. Ein Abstand von 0,7 m zu anderen Versorgungsleitungen und 2 m zu der Grundstücks- oder Gebäudegrenze muss eingehalten werden.



### Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

<b>Materialkosten</b>		<b>Zusätzliche Leistungen (u.a. bundeslandabhängig)</b>
<b>Installation/Einbau</b>	Gesamtsumme	Thermal Response Test (TRT), Genehmigung,
(Bohrung und Anbindung)	rund 70 - 90 €/m	Auslegung und Versicherung
<b>Planung / Genehmigung</b>		

### Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude  
 Nachträglicher Einbau auch bei Bestandsgebäuden möglich

### Randbedingungen/Bemerkung

- Wasserrechtliche Genehmigung erforderlich
- Sondentiefe > 100 m: bergrechtliche Genehmigung erforderlich
- Standfestigkeit des Gebäudes darf durch den Bau von Erdwärmesonden nicht beeinträchtigt werden
- Leitfäden und Randbedingungen der jeweiligen Bundesländer sind zu beachten
- Dokumentations- und Nachweispflichten sind zu beachten (bundeslandabhängig)
- Thermal Response Test bei größeren Anlagen erforderlich
- Versicherung erforderlich

## 16.2 Informationen zur Simulationsumsetzung

In diesem Abschnitt werden weiterführende Informationen zur Umsetzung der Parameterstudie in TRNSYS dargestellt.

### 16.2.1 Wetterdaten

Für die Systemsimulationen wurden diverse meteorologische Größen genutzt. In den mittels Meteororm® erzeugten Referenzwetterdaten sind dieselben meteorologischen Größen enthalten, wie in den zu Beginn des Projektes vorgesehenen Testreferenzjahren des Deutschen Wetterdienstes. Von einzelnen Rechenmodellen innerhalb der Simulationen ggf. speziell benötigte Größen, werden im Rahmen der Berechnungen aus den Referenzwetterdaten der Referenzklimaregionen abgeleitet bzw. berechnet. Die für die 15 für Deutschland definierten Klimaregionen zur Verfügung stehenden Wetterdaten liegen in einer stündlichen Auflösung vor. Die Zeitreihen beinhalten folgende Größen:

- direkte solare Strahlung auf eine horizontale Fläche
- diffuse solare Strahlung auf eine horizontale Fläche
- Umgebungstemperatur
- relative Luftfeuchtigkeit
- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung
- Luftdruck
- Bedeckungsgrad (Bewölkungsgrad)

Zur Verwendung durch einzelne Rechenmodelle werden die folgenden Größen innerhalb der Simulationen berechnet:

- Strahlungsdaten auf unterschiedlich ausgerichtete und geneigte Flächen
- Taupunkttemperatur
- Himmelstemperatur

Temperatur des Erdreichs.

### 16.2.2 Simulationsmodell

Im Rahmen der Simulationen zu future:heatpump werden aus der Programmumgebung von TRNSYS 17 die folgenden Anwendungen abgewendet:

- **Simulation Studio**  
Benutzeroberfläche zur graphischen Erstellung der für eine Simulation benötigten Steuerdatei (TRNSYS-Deck). Zur Erzeugung einer Steuerdatei werden auf der Arbeitsoberfläche des Simulation Studios Symbole, die physikalischen Komponenten einer realen Anlage sowie Hilfsroutinen repräsentieren, graphisch verknüpft. Im Simulation Studio werden zudem Angaben zum Ablauf der Simulation (z. B. Simulationszeitraum) und numerische Festlegungen (z. B. Zeitschrittweite und numerische Toleranzen) getroffen.
- **TRBBuild**  
Hilfsprogramm zur Eingabe einer Gebäudebeschreibung für den Type 56.
- **TRNEdit**  
Hilfsprogramm zu Eingaben in den TRNSYS-Steuerdateien, den sog. TRNSYS-Decks.
- **TRNSED**  
Hilfsprogramm zur Automatisierung von Parametervariationen.

– **TRNDLL**

Dynamic Link Library zur Ausführung der Simulation unter Einbindung der vom Nutzer erstellten Steuerdatei (\*.dck).

Im Dynamic Link Library *TRNDll.dll* sind die Grund- und Standardroutinen von TRNSYS integriert. Eine *TRNDll.dll* ist für alle Simulationen erforderlich. Zusätzliche Rechenroutinen werden entweder in Bibliotheken zusammengefasst und/oder als einzelne Types, die dann oft als „Non-Standard-Types“ bezeichnet werden, zusammen mit der *TRNDll.dll* ausgeführt.

Im Rahmen der Systemsimulationen werden Rechenmodelle (Types) aus dem Lieferumfang von TRNSYS 17 und sogenannte „Non-Standard-Types“ verwenden. In Tabelle 24 und Tabelle 25 sind die wesentlichen Rechenmodelle für die verwendeten Komponenten und Routinen dokumentiert. Die grau hinterlegten Felder kennzeichnen Rechenroutinen (Types), die nur in den Vorabsimulationen, z. B. zur Bearbeitung und Auswertung der Wetterdaten oder zur Prüfung ihrer Eignung für die Untersuchungen in future:heatpump verwendet wurden. Die übrigen Types wurden schwerpunktmäßig im Rahmen der Untersuchungen zu den Niedertemperaturwärmeübertragern verwendet.

**Tabelle 24**      **Verwendete TRNSYS-Typen (Rechenmodelle) aus dem Lieferumfang von TRNSYS 17**

<b>Komponente</b>	<b>Rechenroutine</b>	<b>Bemerkung(en)</b>
Ein/Aus Regler	Type 2	2-Punkt Regler, z. B. für Temperaturdifferenzregelungen
Wärmeübertrager und Luft-Wasser-Wärmeübertrager	Type 5	Gegenstrom/Gleichstrom/Kreuzstrom Übertragungsleistung als Nutzerangabe
T-Stück, Verteiler, Mischer und Temperierventil	Type 11	Komponente mit drei hydraulischen Anschlüssen
Funktion zur Eingabe zeitabhängiger Größen	Type 14	z. B. Lastprofile oder zeitlich transiente Randbedingungen
Integrator	Type 24	Integration beliebiger Größen
Drucker	Type 25	Ausgabe von Momentanwerten oder aufbereiteter Daten in eine Ausgabedatei
Simulations-Zusammenfassung	Type 28	Ausgabe von aufbereiteten Daten in eine Ausgabedatei
Rohrleitung	Type 31	beliebige Dimensionierung der Rohrleitung und Wärmedämmung
thermodynamischer Größen von feuchter Luft	Type 33	z. B. Eingabe für das Gebäudemodell Type 56
Gebäudemodell	Type 56	Hauptkomponente einer thermischen Gebäudesimulation
Online, graphische Ausgabe	Type 65	Visualisierung von Simulationsgrößen während der Simulation
effektive Himmelstemperatur	Type 69	z. B. Eingabe für das Gebäudemodell Type 56
Erdreichtemperatur	Type 77	z. B. Eingabe für das Gebäudemodell Type 56
Schrittmacher / Tempomacher	Type 82	Steuerung (Verlangsamung) der Simulationsgeschwindigkeit zur Identifizierung von Details
Wärmeübertrager und Luft-Wasser-Wärmeübertrager	Type 91	Model mit konstantem Wirkungsgrad
Datenleser-Solarstrahlungsprozessor-Kombination	Type 99	inkl. Himmelsmodel für diffuse Strahlung Perez, Modell 1999

In der nachfolgenden Tabelle sind die verwendeten „Non-Standard-Types“ zusammengestellt.

**Tabelle 25**      **Verwendete TRNSYS Types (Rechenmodelle) NICHT im Lieferumfang von TRNSYS 17**

Komponente	Rechenroutine	Bemerkung(en)
Gleitender Durchschnitt	Type 84	Berechnung des gleitenden Durchschnitts beliebiger Größen
Mittelwert	Type 127	Berechnung des Mittelwerts beliebiger Größen für beliebige Zeitintervalle
Spiralsonde	Type 246	Wegen Inkompatibilität nur bedingt nutzbar
Frischwasserstation	Type 298	nur bei der Simulation von Mehrfamilienhäusern
PID Regler	Type 320	z. B. als Heizkörperthermostat für Type 362
Warmwasserspeicher	Type 340	Warmwasserspeicher mit frei konfigurierbaren Anschlüssen und internen Wärmeübertragern
„Ice Pit“	Type 343	Vertikal geschichteter Speicher zur Nutzung als Wärme- und Kältespeicher
Heizkörper, dynamisch	Type 362	Verwendung vorzugsweise in Verbindung mit dem PID Regler, Type 320
Wärmepumpe	Type 401	Rechenmodell genutzt für alle Wärmepumpenvariante, z. B. Luft-Wasser-WP oder Wärmepumpe mit erdgekoppelten Niedertemperaturwärmeübertragern
Erdwärmesonde	Type 451	einfaches, frei konfigurierbares Modell
Erdwärmesonde	Type 557	frei konfigurierbares Modell
Nachheizung	Type 659	ideale Nachheizung mit frei spezifizierbarer Leistung und Effektivität, ohne Hysterese
WRG Luft/Luft	Type 667	frei konfigurierbares Modell
Flächenkollektor	Type 710	frei konfigurierbares Modell
Temperierventil	Type 953	z. B. zur Beimischung von Kaltwasser in erwärmtes Trinkwasser
Flächenkollektor	Type 997	frei konfigurierbares Modell mit einer beliebigen Anzahl übereinander liegender Rohrschlangen
Akustischer Signalgeber	Type 1238	Erzeugung akustischer Signale infolge nutzerdefinierter Ereignisse

Während der Simulation werden zwischen einzelnen Types Informationen übergeben, wobei im Allgemeinen die Ausgabegrößen (Outputs) des einen Types die Eingabegrößen (Inputs) eines anderen oder Eingabegrößen mehrerer anderer Types sind. Zur Modifikation der Daten zwischen Aus- und Eingaben verknüpfter Types sowie zu Zwischenrechnungen oder zur Umrechnung von Ausgaben in nutzerfreundliche Formate, bevor diese in die Ergebnisdateien der betreffenden Simulation geschrieben werden, werden Gleichungssysteme in Form von sog. *Equations*, einem trnsysspezifischen Format formuliert. Je nach Niedertemperaturwärmeübertrager, Gebäude und vorliegender Variante, werden etwa 250 bis 260 derartiger Equations formuliert und zusammen mit den Types während der Simulationen aufgerufen.

### 16.2.3 Trinkwarmwasser - *European Tapping Cycles*

Das Zapfprofil wurden im Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L 239 vom 6. September 2013 in den Schriftstücken

- Delegierte Verordnung (EU) Nr. 811/2013 der Kommission vom 18.02.2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, Anhang VII, Tabelle 15,
- Delegierte Verordnung (EU) Nr. 812/2013 der Kommission vom 18.02.2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, Anhang VII, Tabelle 3.
- Verordnung (EU) Nr. 813/2013 der Kommission vom 02.08.2013 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, Anhang III, Tabelle 7 und
- Verordnung (EU) Nr. 814/2013 der Kommission vom 02.08.2013 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, Anhang III, Tabelle 1

als Lastprofil für unterschiedliche Anwendungszwecke und -bereiche veröffentlicht. Gegenüber anderen gebräuchlichen Zapfprofilen zeichnen sich *European Tapping Cycles* für erwärmtes Trinkwasser insbesondere durch einen höheren Detaillierungsgrad aus.

### 16.3 Gebäudesteckbriefe

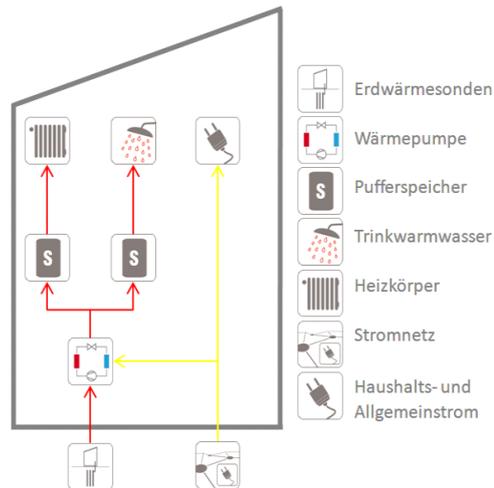


#### Einfamilienhaus Troisdorf (Geb. 1)

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten		
Baujahr	2008	Beheiztes Gebäudevolumen ( $V_E$ )	k.A.	$m^3$
Bruttogeschossfläche (BGF)	k.A. $m^2$	Jahresheizenergiebedarf ( $Q_H+Q_{TWW}$ )	k.A.	kWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	259 $m^2$	spez. Heizwärmebedarf ( $q_h+q_{TWW}$ )	70.0	kWh/ $m^2a$

#### Gebäude

Das Reihenhhaus wurde 2008 gebaut und hat eine Wohnfläche von 259  $m^2$ . Die Erdwärmesonden sind an eine Wärmepumpe der Firma Junkers angebunden. Sie versorgt die Heizung und Trinkwarmwasserbereitung über einen Pufferspeicher mit Energie. Insgesamt sind drei Sonden à 21 m Länge (insg. 63 m Sondenlänge) installiert. Die elektrische Energie wird über das Stromnetz bezogen und für die Wärmepumpe und im Haushalt genutzt.



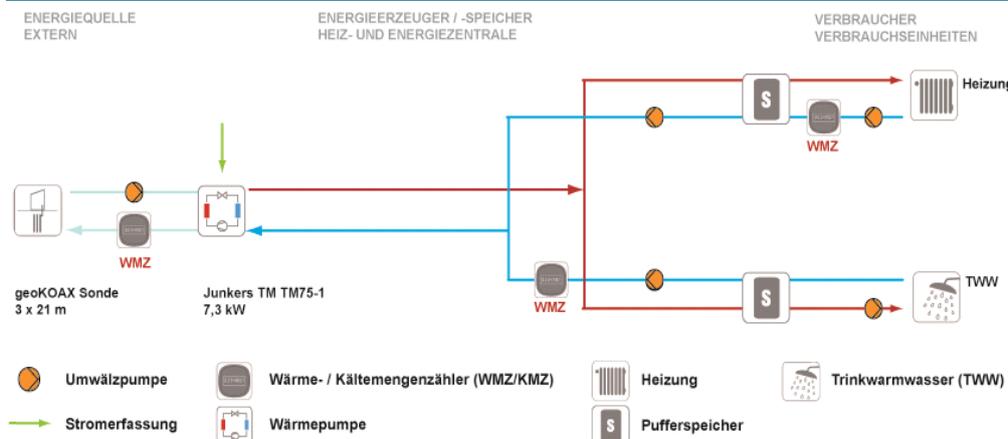
#### Wärmepumpe

Hersteller	Junkers	Elekt. Nennleistung	1.6	kW
Wärmeleistung	7,3 kW	COP (B0/W35)	4.5	
Kühlleistung	- kW			

#### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Erdreich	Planung:		
Übertrager	geoKOAX Erdwärmesonden	Wärmeentzug	10.800	kWh/a
Anzahl	3 Stk	Wärmeeintrag	k.A.	kWh/a
Tiefe	21 m	spez. Entzugsleistung	85.7	W/m
Abstand	5 m	spez. Eintragsleistung	k.A.	W/m
Einbauort	neben dem Gebäude			

#### Messkonzept





## Einfamilienhaus Alzenau Hörstein (Geb. 2)

### Allgemeine Angaben

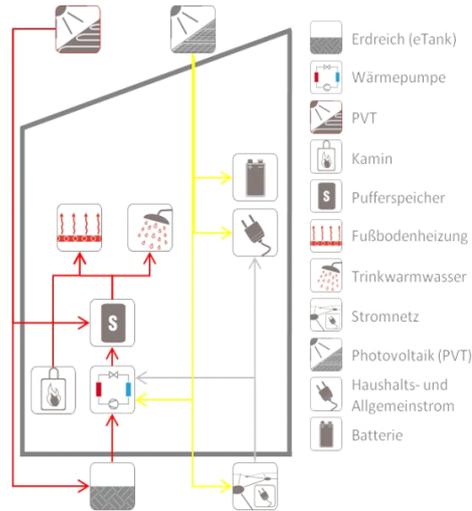
Baujahr	2015
Bruttogeschossfläche (BGF)	180 m <sup>2</sup>
Nettogeschossfläche (NGF)	158 m <sup>2</sup>

### Gebäudedaten

Beheiztes Gebäudevolumen ( $V_E$ )	k.A.	m <sup>3</sup>
Jahresheizenergiebedarf ( $Q_H+Q_{TWW}$ )	10	kWh/a
spez. Heizwärmebedarf ( $q_H+q_{TWW}$ )	65	kWh/m <sup>2</sup> a

### Gebäude

Das Energiekonzept des Gebäudes besteht aus einer Wärmepumpe, einem Erdreichwärmespeicher (eTank), PVT-Modulen und einem wasserführendem Kamin. Die Solarmodule beladen den Pufferspeicher und den Erdreichwärmespeicher. Der Kamin kann ebenfalls zum Teil den Wärmebedarf der Fußbodenheizung decken, sodass weniger Wärme aus dem Speicher entnommen werden muss. Der Strom wird im Haushalt und von der Wärmepumpe benötigt. Bei Stromüberschuss wird ein Lithium-Ionen Batteriespeicher beladen oder in das öffentliche Stromnetz eingespeist.



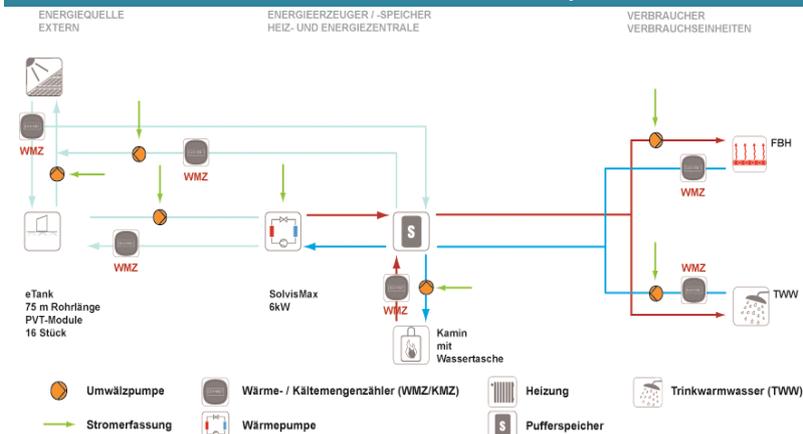
### Wärmepumpe

Hersteller	SolvisMax	Elekt. Nennleistung	1.4	kW
Wärmeleistung	6	COP (B0/W35)	4.28	
Kühlleistung	-			

### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle 1	Solarstrahlung / Luft	Planung:		
Übertrager 1	PVT-Hybridmodule	Wärmeentzug	k.A.	kWh/a
Größe	26 m <sup>2</sup> / 16 Stk	Wärmeeintrag	-	kWh/a
Einbauort	Aufdachmontage	spez. Entzugsleistung	k.A.	W/m
Quelle 2	Erdreich	spez. Eintragsleistung	-	W/m
Übertrager 2	eTank			
Größe	150 m <sup>3</sup>			
Einbauort	unterhalb des Gebäudes			

### Messkonzept



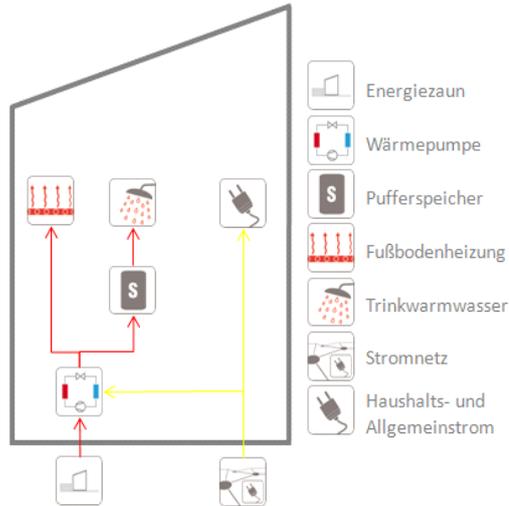


## Einfamilienhaus Gütersloh (Geb. 3)

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten	
Baujahr	2007	Beheiztes Gebäudevolumen ( $V_E$ )	k.A. m <sup>3</sup>
Bruttogeschossfläche (BGF)	k.A. m <sup>2</sup>	Jahresheizenergiebedarf ( $Q_H+Q_{TWW}$ )	12.688 kWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	208 m <sup>2</sup>	spez. Heizwärmebedarf ( $q_H+q_{TWW}$ )	61 kWh/m <sup>2</sup> a

### Gebäude

Das Einfamilienhaus in Gütersloh verwendet einen Energiezaun als Wärmeübertrager. Der Energiezaun (Zaun L x H 8 m x 2.4 m) besteht aus 60 Rohrkreisen und hat eine Rohrlänge von insgesamt 480 m. Ungefähr ein Drittel des Zaunes befindet sich unter der Erdoberkante, um bei tiefen Lufttemperaturen die Erdwärme nutzen zu können. Die Wärmepumpe dient sowohl zur Gebäudebeheizung als auch zur Trinkwassererwärmung. Der Heizkreis wird direkt aus der Wärmepumpenanlage versorgt, es ist kein Zwischenspeicher installiert.



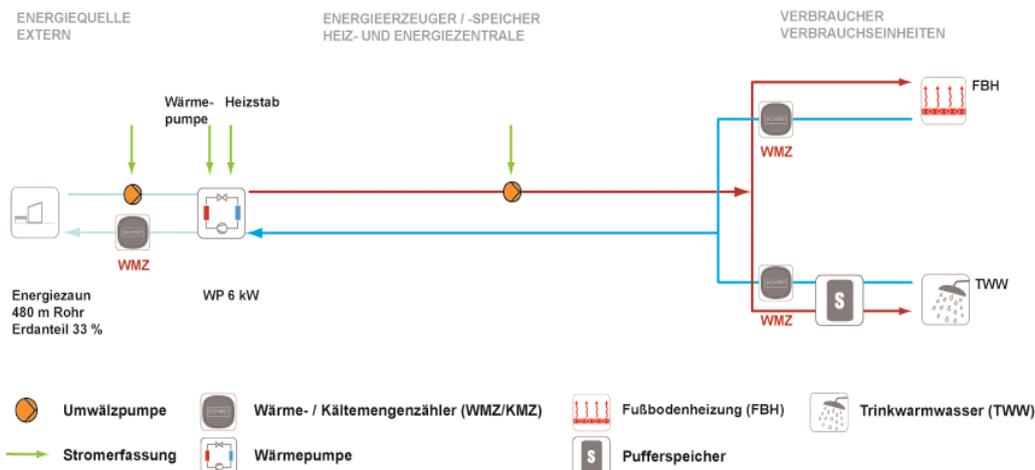
### Wärmepumpe

Hersteller	k.A.	Elektrische Nennleistung	k.A.	kW
Wärmeleistung	6 kW	COP (B0/W35)	4.8	
Kühlleistung	- kW			

### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Erdreich und Außenluft	Planung		
Übertrager	Energiezaun	Wärmeentzug	k.A.	kWh/a
Anzahl	60 Rohrkreise / 8 m Zaun	Wärmeeintrag	-	kWh/a
Gesamtlänge	480 m Rohr	spez. Entzugsleistung	10	W/m
Einbauort	1/3 im Erdreich	spez. Eintragsleistung	-	W/m

### Messkonzept



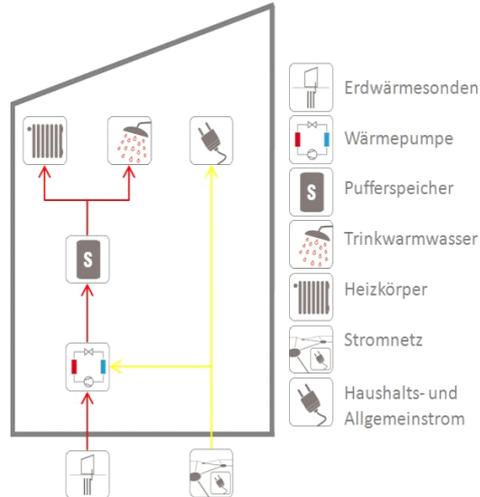


## Einfamilienhaus Kerpen (Geb. 4)

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten		
Baujahr	1968 (Sanierung 2015)	Beheiztes Gebäudevolumen ( $V_E$ )	k.A.	$m^3$
Bruttogeschossfläche (BGF)	k.A. $m^2$	Jahresheizenergiebedarf ( $Q_H+Q_{TWW}$ )	k.A.	kWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	130 $m^2$	spez. Heizwärmebedarf ( $q_h+q_{TWW}$ )	230	kWh/ $m^2a$

### Gebäude

Das Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von 130  $m^2$  liegt in Kerpen (Nordrhein-Westfalen) und wurde im Jahr 2015 teilsaniert. Die Erdwärmesonde sind an eine Wärmepumpe der Firma Nibe angebunden. Neben dem Gebäude sind sechs Sonden à 24 m Länge (insg. 144 m Sondenlänge) installiert. Die Wärmepumpe belädt den Speicher, welcher die Heizkörper und das Trinkwarmwassersysteme versorgt. Die elektrische Energie wird über das Stromnetz bezogen und für die Wärmepumpe und im Haushalt genutzt.



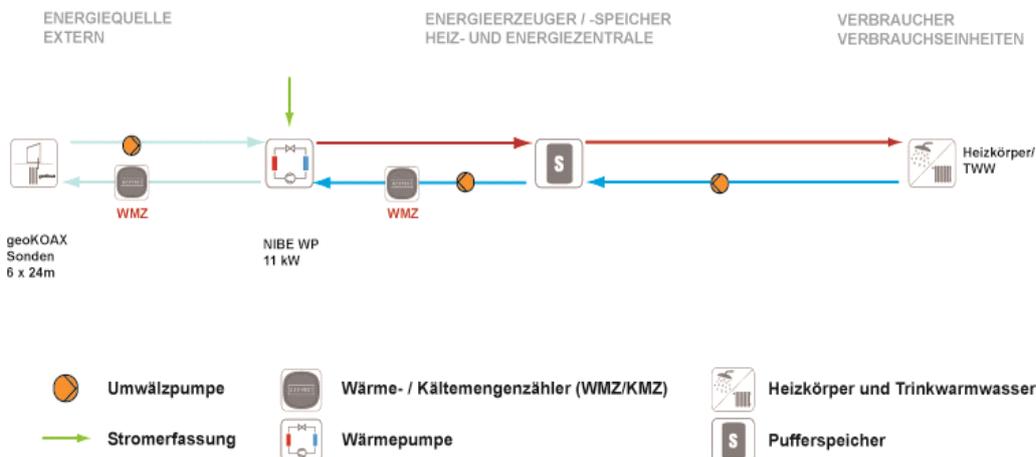
### Wärmepumpe

Hersteller	Nibe	Elekt. Nennleistung	12,5 kW
Wärmeleistung	11 kW	COP (B0/W35)	4.4
Kühlleistung	- kW		

### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Erdreich	Planung:	
Übertrager	geoKoax	Wärmeentzug	23.000 kWh/a
Anzahl	6 Stk.	Wärmeeintrag	kWh/a
Tiefe	24 m	spez. Entzugsleistung	57.3 W/m
Abstand	4 bzw. 5 m	spez. Eintragsleistung	W/m
Einbauort	neben dem Gebäude		

### Messkonzept



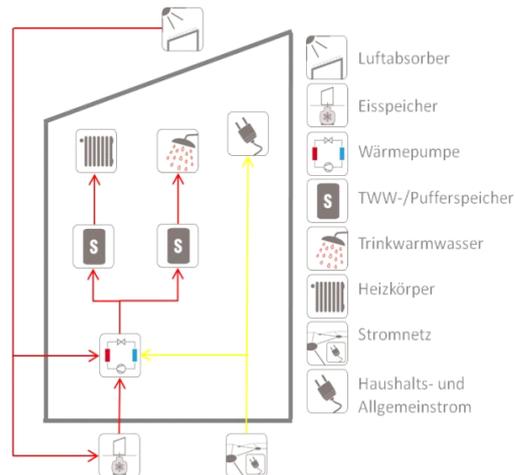


## Einfamilienhaus Oberwil (Geb. 5)

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten		
Baujahr	komplett saniert 2013	Beheiztes Gebäudevolumen ( $V_E$ )	k.A.	$m^3$
Bruttogeschossfläche (BGF)	k.A. $m^2$	Jahresheizenergiebedarf ( $Q_H+Q_{TWW}$ )	k.A.	kWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	147 $m^2$	spez. Heizwärmebedarf ( $q_h+q_{TWW}$ )	k.A.	kWh/ $m^2a$

### Gebäude

Das Gebäude wurde 2013 modernisiert und mit einer Wärmepumpe ausgestattet. Die Energieversorgung des Einfamilienhauses erfolgt über die Wärmepumpe in Verbindung mit einem Eisspeicher und einem Luftabsorber. Der Eisspeicher wird über die Luftabsorber regeneriert, welche Aufdach montiert werden. Die elektrische Energie wird aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen und sowohl für den Haushalte, als auch von der Wärmepumpe genutzt.



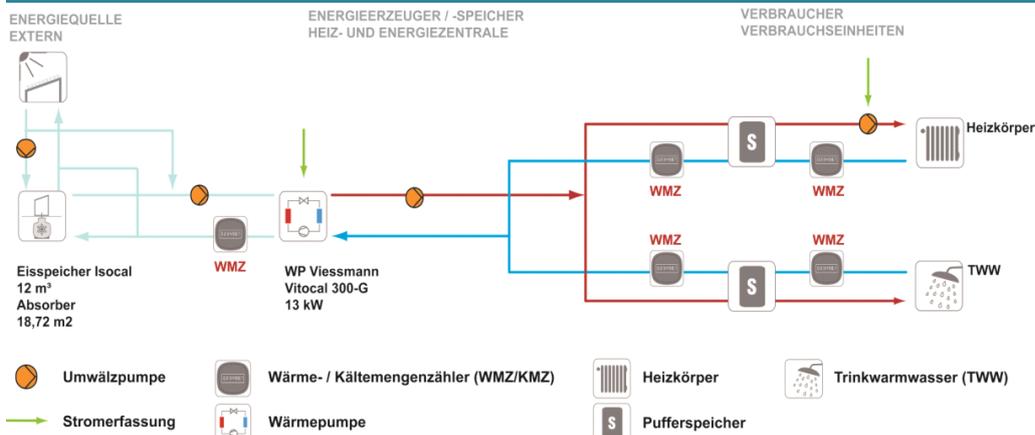
### Wärmepumpe

Hersteller	Viessmann (Vitocal 300-G BW113)	Elekt. Nennleistung	3.05	kW
Wärmeleistung	13	COP (B0/W35)	4.59	
Kühlleistung	-			

### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle 1	Erdreich	Planung:		
Übertrager 1	Eisspeicher	Wärmeentzug	k.A.	kWh/a
Größe	12 $m^3$	Wärmeeintrag	-	kWh/a
Einbauort	neben dem Gebäudes	spez. Entzugsleistung	k.A.	W/m
Quelle 2	Solarstrahlung/Außenluft	spez. Eintragsleistung	-	W/m
Übertrager 2	Luftabsorber			
Anzahl	18,72 $m^2$			
Einbauort	Aufdachmontage			

### Messkonzept



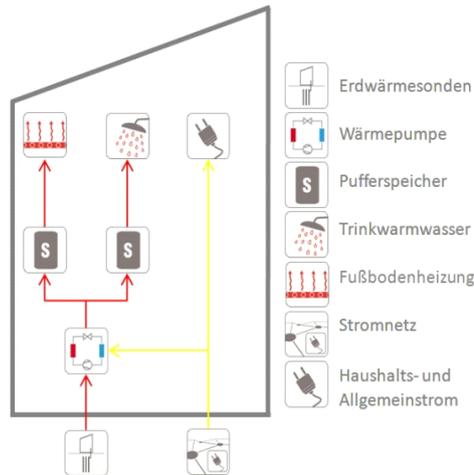


## Mehrfamilienhaus Troisdorf (Geb. 6)

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten		
Baujahr	2013	Beheiztes Gebäudevolumen ( $V_E$ )	k.A.	$m^3$
Bruttogeschossfläche (BGF)	k.A. $m^2$	Jahresheizenergiebedarf ( $Q_H+Q_{TWW}$ )	k.A.	$kWh/a$
Nettogeschossfläche (NGF)	2.000 $m^2$	spez. Heizwärmebedarf ( $q_H+q_{TWW}$ )	k.A.	$kWh/m^2a$

### Gebäude

Das Mehrfamilienhaus in Troisdorf (Nordrhein-Westfalen) bietet neben der Wohnflächen auch Gewerbeflächen an. Die Erdreichwärmeübertrager (geoKoax Erdwärmesonden) haben eine gesamte Länge von 960 m. Sie sind an eine Wärmepumpe der Firma Watterkotte angeschlossen. Über einen Trinkwarmwasser- und einen Pufferspeicher wird die benötigte Brauchwasser- und Heizenergie zur Verfügung gestellt. Im Gebäude ist eine Fußbodenheizung installiert. Die elektrische Energie wird aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen und sowohl im Haushalt, als auch für die Wärmepumpe genutzt.



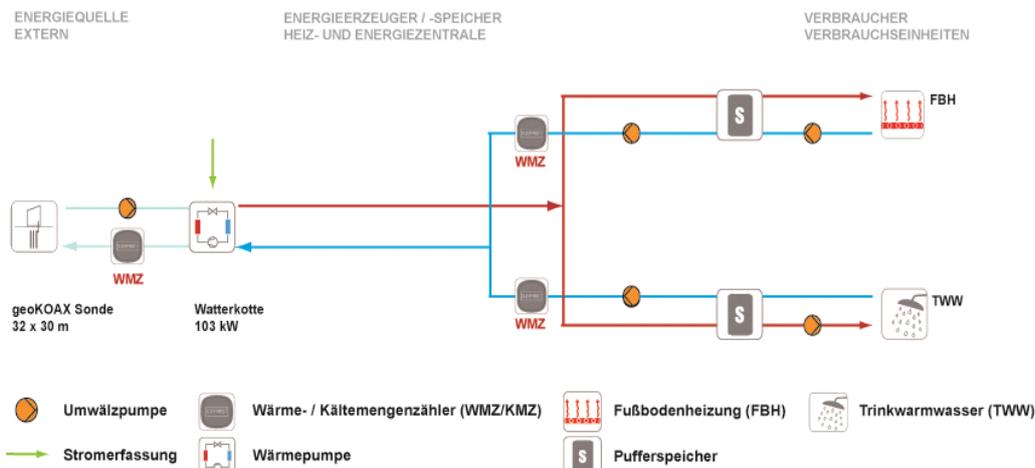
### Wärmepumpe

Hersteller	Watterkotte	Elekt. Nennleistung	23	kW
Wärmeleistung	103 kW	COP (B0/W35)	4.4	
Kühlleistung	- kW			

### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Erdreich	Planung		
Übertrager	geoKoax	Wärmeentzug	k.A.	$kWh/a$
Anzahl	32 Stk	Wärmeeintrag	-	$kWh/a$
Tiefe	30 m	spez. Entzugsleistung	83.3	$W/m$
Abstand	5 m	spez. Eintragsleistung	-	$W/m$
Einbauort	neben dem Gebäudes			

### Messkonzept



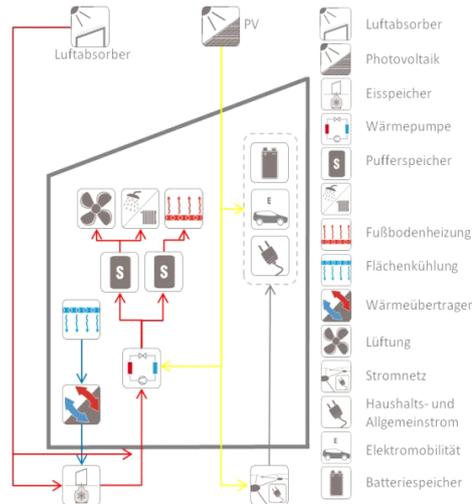


## Mehrfamilienhaus Frankfurt am Main (Geb. 7)

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten	
Baujahr	2015	Beheiztes Gebäudevolumen ( $V_E$ )	8.517 m <sup>3</sup>
Bruttogeschossfläche (BGF)	3.200 m <sup>2</sup>	Jahresheizenergiebedarf ( $Q_H+Q_{TWW}$ )	45.412 kWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	1.599 m <sup>2</sup>	spez. Heizwärmebedarf ( $q_H+q_{TWW}$ )	19 kWh/m <sup>2</sup> a

### Gebäude

In Frankfurt am Main befindet sich das Mehrfamilienhaus mit 17 Wohneinheiten auf vier Vollgeschossen und einem Dachgeschoss. Die Energiequellen für die Wärmepumpe sind ein Eisspeicher und Luftabsorber. Eine zentrale mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung reduziert die Wärmeverluste im Winter und erhöht den Wohnkomfort. Die PV-Module versorgen das Gebäude mit Energie und speisen Strom in das öffentliche Netz ein. Der Energieüberschuss wird vor Ort verwendet und lädt Elektroautos und E-Bikes in der Tiefgarage des Gebäudes auf.



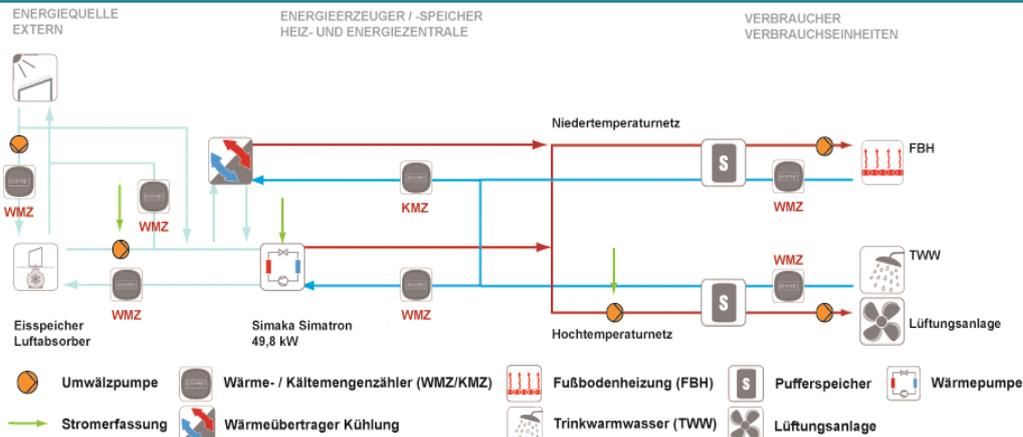
### Wärmepumpe

Hersteller	Simaka Simatron WP50	Elekt. Nennleistung	11.1 kW
Wärmeleistung	49.8 kW	COP (B0/W35)	4.49
Kühlleistung	- kW		

### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle 1	Luft und Solarstrahlung	Planung:		
Übertrager 1	Luftabsorber	Wärmeentzug	k.A.	kWh/a
Größe	11 Stk (85 m <sup>2</sup> )	Wärmeeintrag	k.A.	kWh/a
Einbauort	Aufdachmontage	spez. Entzugsleistung	k.A.	W/m
Quelle 2	Erdreich	spez. Eintragsleistung	k.A.	W/m
Übertrager 2	Eisspeicher			
Größe	98 m <sup>3</sup>			
Einbauort	neben dem Gebäude			

### Messkonzept



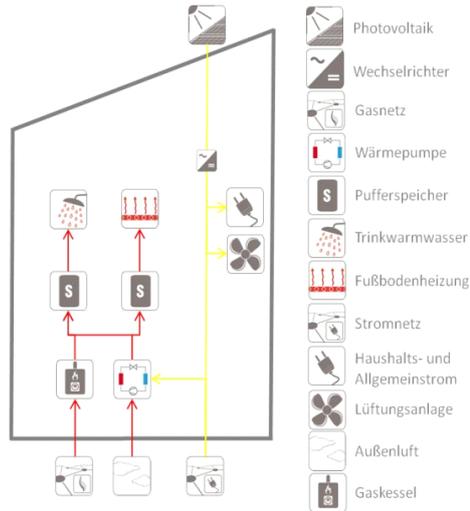


## Mehrfamilienhaus Konstanz (Geb. 8)

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten	
Baujahr	2016	Beheiztes Gebäudevolumen ( $V_E$ )	3.564 m <sup>3</sup>
Bruttogeschossfläche (BGF)	k.A. m <sup>2</sup>	Jahresheizenergiebedarf ( $Q_H+Q_{TWW}$ )	66.451 kWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	1.140 m <sup>2</sup>	spez. Heizwärmebedarf ( $q_H+q_{TWW}$ )	58.3 kWh/m <sup>2</sup> a

### Gebäude

Die Mehrfamilienhäuser sind über eine Tiefgarage verbunden. In jedem Gebäude befinden sich 6 Wohneinheiten auf 3 Vollgeschossen. Als Wärmequelle für die Wärmepumpe dient die Außenluft. Die Wärmepumpe wird für den Heizkreis und die Warmwasserbereitung vorgesehen. Die Wärmepumpe ist an Pufferspeichern in der Haustechnikzentrale im Untergeschoss angeschlossen. Eine dezentrale mechanische Abluftanlage steigert den Wohnkomfort. Photovoltaikmodule auf dem Dach runden das Energiekonzept ab. Zur Unterstützung ist ein Gaskessel ins Energiekonzept eingebunden.



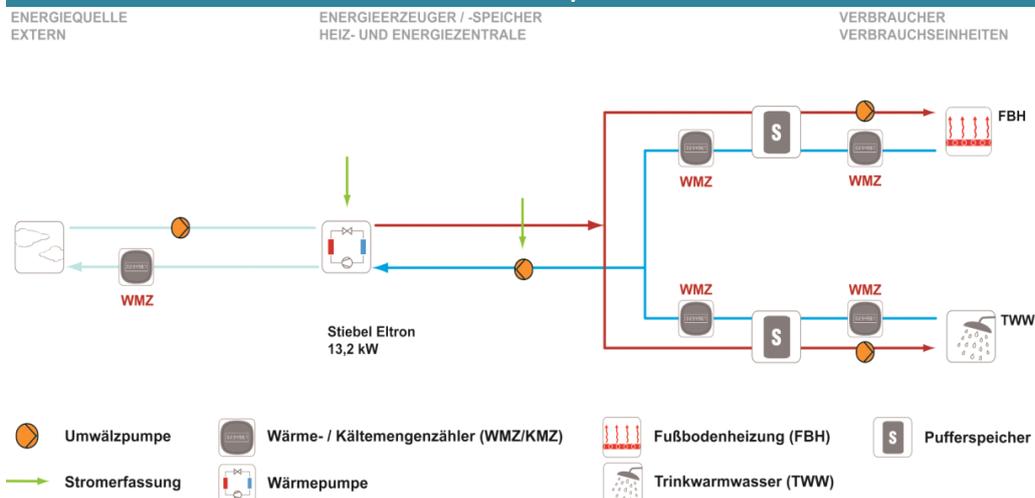
### Wärmepumpe

Hersteller	Stiebel-Eltron	Elekt. Nennleistung	4.21 kW
Wärmeleistung	13.2 kW	COP (A-7/W35)	3.14
Kühlleistung	- kW		

### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Außenluft	Planung:	
Übertrager		Wärmeentzug	k.A. kWh/a
Anzahl		Wärmeeintrag	- kWh/a
Tiefe		spez. Entzugsleistung	k.A. W/m
Abstand		spez. Eintragsleistung	- W/m
Einbauort			

### Messkonzept



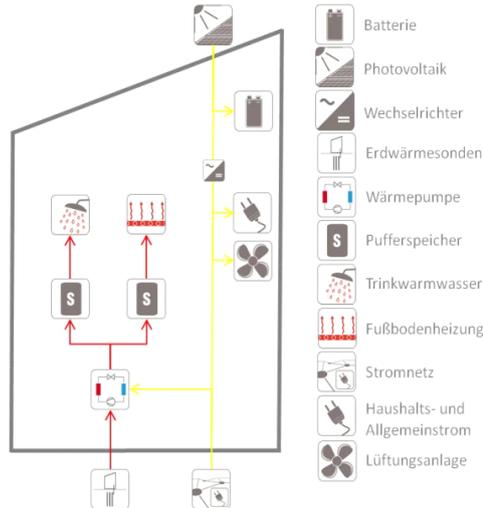


## Mehrfamilienhaus Konstanz (Geb. 9)

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten	
Baujahr	2016	Beheiztes Gebäudevolumen ( $V_E$ )	3.564 m <sup>3</sup>
Bruttogeschossfläche (BGF)	k. A. m <sup>2</sup>	Jahresheizenergiebedarf ( $Q_H+Q_{TWW}$ )	66.451 kWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	1.140 m <sup>2</sup>	spez. Heizwärmebedarf ( $q_h+q_{TWW}$ )	58.3 kWh/m <sup>2</sup> a

### Gebäude

Die beiden Gebäude sind durch eine Tiefgarage miteinander verbunden. Das Gebäude besteht aus 3 Vollgeschossen mit insgesamt 6 Wohneinheiten. Als Wärmequelle für die Wärmepumpen dienen 8 Erdsonden à 100 m. Zum einen wird der Heizkreis und zum anderen die Warmwasserbereitung vorgesehen. Jede der beiden Wärmepumpen ist an einen separaten Pufferspeicher angeschlossen. Eine dezentrale mechanische Abluftanlage steigert den Wohnkomfort. Photovoltaikmodule auf dem Dach runden das Energiekonzept ab.



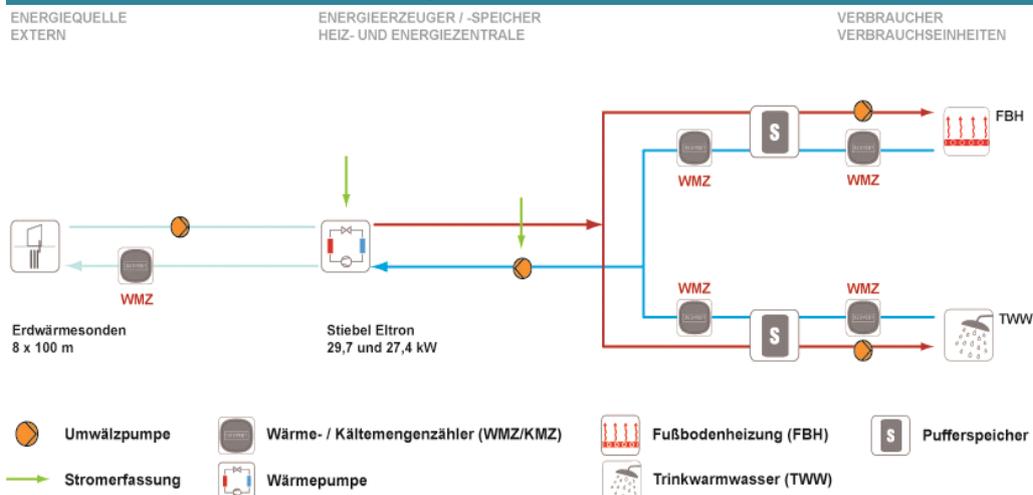
### Wärmepumpe

Hersteller	Stiebel-Eltron	Elekt. Nennleistung	6.12 / 6.32 kW
Wärmeleistung	29.7 + 27.4 kW	COP (B0/W35)	4.85 / 4.34
Kühlleistung	- kW		

### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Erdreich	Planung:	
Übertrager	Erdwärmesonden	Wärmeentzug	k.A. kWh/a
Anzahl	8 Stk	Wärmeeintrag	- kWh/a
Tiefe	100 m	spez. Entzugsleistung	k.A. W/m
Abstand	5 m	spez. Eintragsleistung	- W/m
Einbauort	neben Gebäude		

### Energie- und Messschema



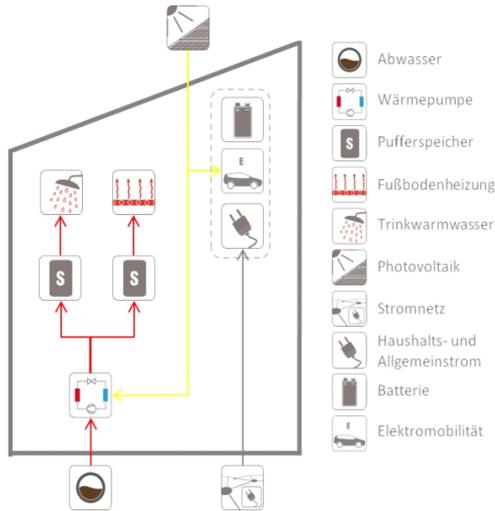


## Mehrfamilienhaus Frankfurt am Main (Geb. 10)

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten		
Baujahr	2015	Beheiztes Gebäudevolumen ( $V_E$ )	k.A.	$m^3$
Bruttogeschossfläche (BGF)	11.688 $m^2$	Jahresheizenergiebedarf ( $Q_H+Q_{TWW}$ )	k.A.	kWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	9.828 $m^2$	spez. Heizwärmebedarf ( $q_H+q_{TWW}$ )	31,5	kWh/ $m^2a$

### Gebäude

Das Mehrfamilienhaus hat 74 Wohn- und zwei Gewerbeeinheiten. Das Gebäude ist über einen Abwasserwärmeübertrager, welcher die Wärmepumpe mit Wärmeenergie versorgt, verbunden. Das Übertragungssystem ist im Abwasserkanal installiert. Die Wärmepumpe belädt die jeweiligen Speicher des Hoch- und Niedertemperaturnetzes. Die Photovoltaikanlage ist auf dem Dach und in die Gebäudefassade integriert. Ein Stromüberschuss wird in eine Batterie für spätere Entnahme gespeichert oder zur Beladung der Elektroautos genutzt. Das Gebäude ist zudem an das öffentliche Netz angeschlossen. Die einzelnen Wohneinheiten verfügen über eine dezentrale Lüftung und eine Frischwasserstation. Als redundanter Wärmeerzeuger ist ein Gaskessel integriert.



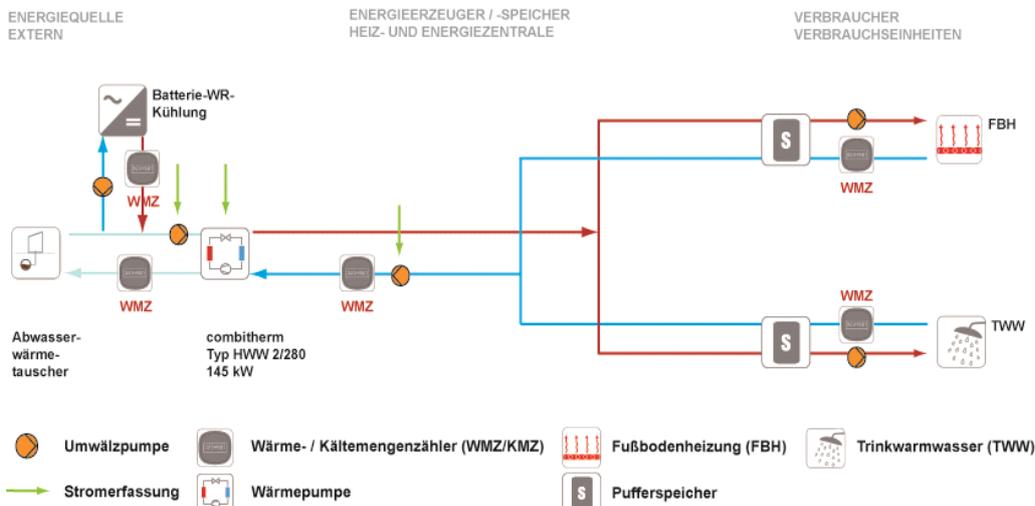
### Wärmepumpe

Hersteller	CombiTherm	Elekt. Nennleistung	29	kW
Wärmeleistung	145 kW	COP (B10/W35)	5	
Kühlleistung	- kW			

### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Abwasser	Planung:		
Übertrager	Abwasserwärmeübertrager	Wärmeentzug	k.A.	kWh/a
Größe	102 $m^2$	Wärmeeintrag	-	kWh/a
Einbauort	im Abwasserkanal	spez. Entzugsleistung	960	$W/m^2$
		spez. Eintragsleistung	-	$W/m^2$

### Messkonzept



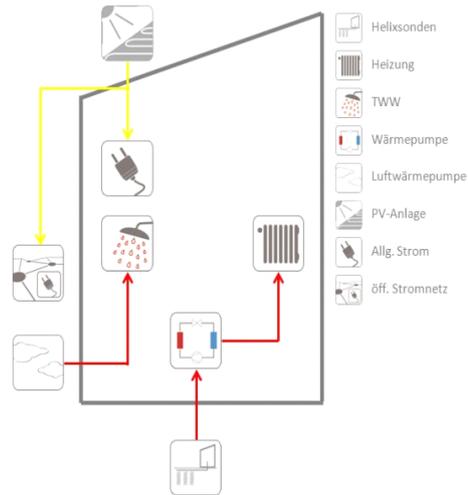


## Mehrfamilienhaus Neu-Ulm (Geb. 11)

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten	
Baujahr	1938 (Sanierung 2015)	Beheiztes Gebäudevolumen ( $V_E$ )	2.800 m <sup>3</sup>
Bruttogeschossfläche (BGF)	848,98 m <sup>2</sup>	Jahresheizenergiebedarf ( $Q_H+Q_{TWW}$ )	27.884 kWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	731 m <sup>2</sup>	spez. Heizwärmebedarf ( $q_H+q_{TWW}$ )	38,1 kWh/m <sup>2</sup> a

### Gebäude

Dieses 1938 erbaute Mehrfamilienhaus wurde 2015 saniert. Die Energieversorgung erfolgt zum Einen über auf dem Dach montierte PV-Module, die das Haus mit Strom für den allgemeinen Verbrauch versorgen und auch Strom ins öffentliche Netz einspeisen. Zum Anderen versorgen im Erdreich eingebrachte Helixsonden das Mehrfamilienhaus mit Heizwärme. Zudem wurde bei der Sanierung dezentrale Abluft-Wasser-Wärmepumpen für die Trinkwarmwasserversorgung in das Energiekonzept integriert.



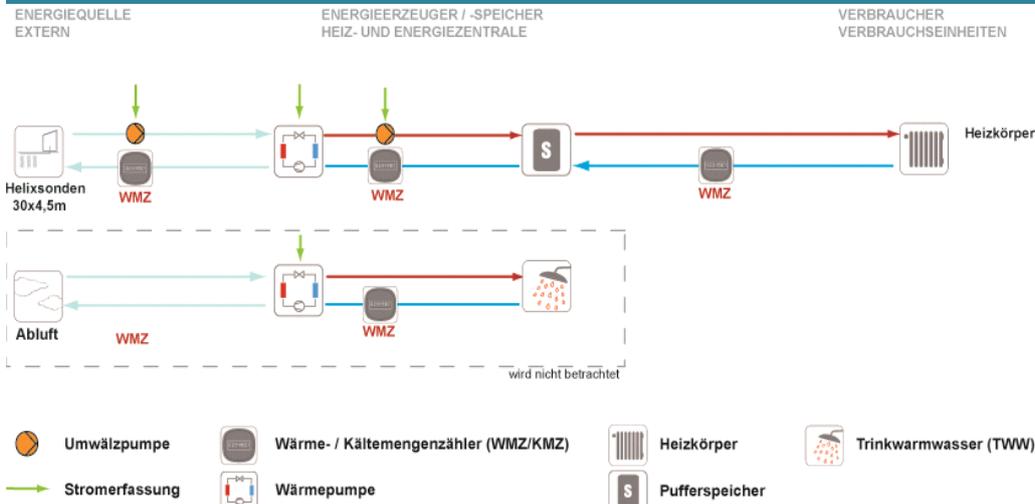
### Wärmepumpe

Hersteller	Stiebel Eltron	Elekt. Nennleistung	4,5	kW
Wärmeleistung	20	COP (B0/W35)	5,1	
Kühlleistung	-			

### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Erdreich	Planung:		
Übertrager	Helixsonden	Wärmeentzug	k.A.	kWh/a
Anzahl	30 Stk	Wärmeeintrag	k.A.	kWh/a
Tiefe	4,5 m	spez. Entzugsleistung	111,1	W/m
Abstand	3 m	spez. Eintragsleistung	k.A.	W/m
Einbauort	neben dem Gebäude			

### Messkonzept



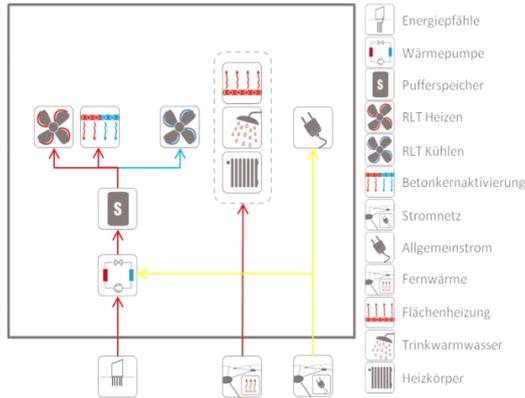


## Bürogebäude Lüneburg (Geb. 12)

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten	
Baujahr	2002	Beheiztes Gebäudevolumen ( $V_E$ )	11.657 m <sup>3</sup>
Bruttogeschossfläche (BGF)	4.548 m <sup>2</sup>	Jahresheizenergiebedarf ( $Q_H+Q_{TWW}$ )	127.4 kWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	3.957 m <sup>2</sup>	spez. Heizwärmebedarf ( $q_h+q_{TWW}$ )	32.2 kWh/m <sup>2</sup> a

### Gebäude

Das Bürogebäude wurde 2002 mit einem innovativen Energiekonzept ausgestattet. Die Systemkomponenten der Energieversorgung bestehen aus einer Wärmepumpe, die mit Energiepfählen gekoppelt ist, sowie dem Fernwärmeanschluss. Über die Wärmepumpe wird die RLT sowie die BKT für den Heiz- und Kühlfall versorgt. Im Kühlfall funktioniert die Wärmepumpe als Kältemaschine. Zudem ist eine freie Kühlung möglich. Der Fernwärmeanschluss stellt die Energie für die Flächenheizung im Eingangsbereich und die Heizkörper in den Büros zur Verfügung. Zudem ist ein Trinkwarmwassernetz im Gebäude durch die Fernwärme mit der notwendigen Energie versorgt.



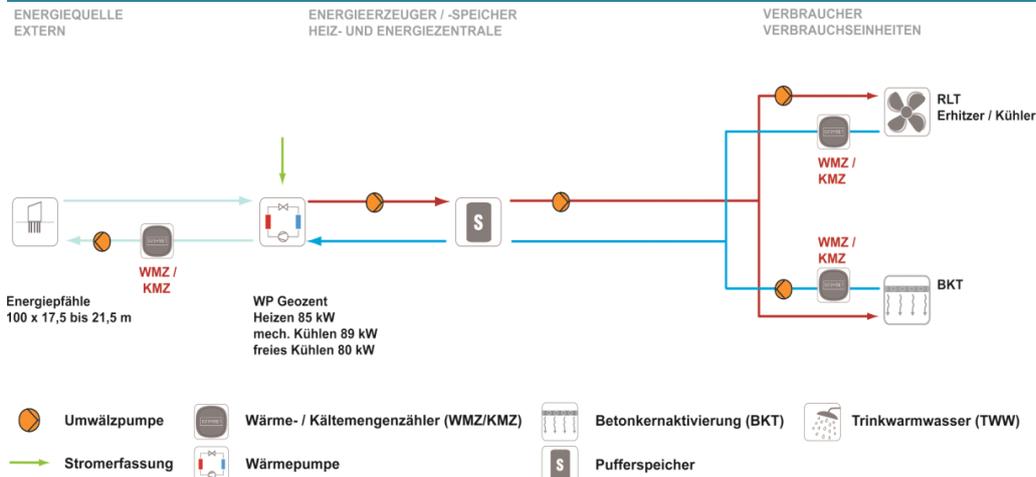
### Wärmepumpe

Hersteller	Zent-Frenger	Elekt. Nennleistung	k.A.	kW
Wärmeleistung	85 kW	COP (B0/W35)	5.47	
Kühlleistung (KM/FK)	89/80 kW			

### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Erdreich	Planung:		
Übertrager	Energiepfähle	Wärmeentzug	k.A.	kWh/a
Anzahl	101 Stk	Wärmeeintrag	k.A.	kWh/a
Tiefe	17,5 bis 21,5 m	spez. Entzugsleistung		31.5 W/m
Abstand	rund 2,5 m	spez. Eintragsleistung	k.A.	W/m
Einbauort	unterhalb des Gebäudes			

### Messkonzept





## Bürogebäude Gelsenkirchen (Geb. 13)

### Allgemeine Angaben

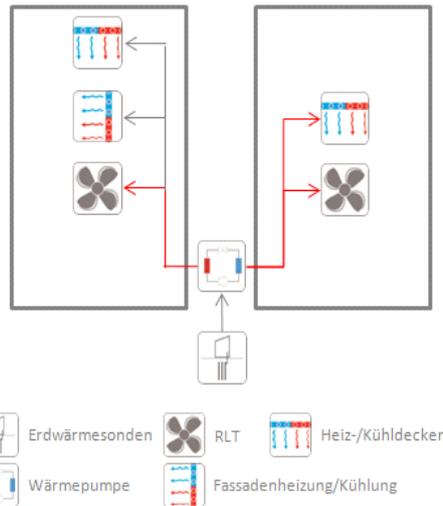
Baujahr	2004 (transparentes Haus zum Nebengebäude mit Erdwärme und Wärmepumpe gebaut. Über RLT, Fassadenheizung, Deckenheizung und Fußbodenheizung (im Eingangsbereich) wird das Gebäude beheizt. Die Kühlung der Gebäude erfolgt über RLT, Fassadenkühlung, Deckenkühlung und eine DCS-RLT Anlage. Das Energiekonzept besteht aus drei unterschiedlichen Versorgungsweisen - den Heiz-Kühl-Betrieb, einen reinen Kältemaschin- oder freie Kühlungsbetrieb - wird das Bürogebäude entsprechend versorgt. Das weiße Haus ist ebenfalls an die Energieversorgung angebunden.
Bruttogeschossfläche (BGF)	7.114 m <sup>2</sup>
Nettogeschossfläche (NGF)	6.189 m <sup>2</sup>

### Gebäudedaten

Beheiztes Gebäudevolumen (V <sub>E</sub> )	21.584 m <sup>3</sup>
Jahresheizenergiebedarf (Q <sub>H</sub> +Q <sub>TWW</sub> )	1.275 MWh/a
spez. Heizwärmebedarf (q <sub>h</sub> +q <sub>TWW</sub> )	206 kWh/m <sup>2</sup> a

### Gebäude

Das transparente Haus wurde 2004 als Zwilling zum Nebengebäude mit Erdwärme und Wärmepumpe gebaut. Über RLT, Fassadenheizung, Deckenheizung und Fußbodenheizung (im Eingangsbereich) wird das Gebäude beheizt. Die Kühlung der Gebäude erfolgt über RLT, Fassadenkühlung, Deckenkühlung und eine DCS-RLT Anlage. Das Energiekonzept besteht aus drei unterschiedlichen Versorgungsweisen - den Heiz-Kühl-Betrieb, einen reinen Kältemaschin- oder freie Kühlungsbetrieb - wird das Bürogebäude entsprechend versorgt. Das weiße Haus ist ebenfalls an die Energieversorgung angebunden.



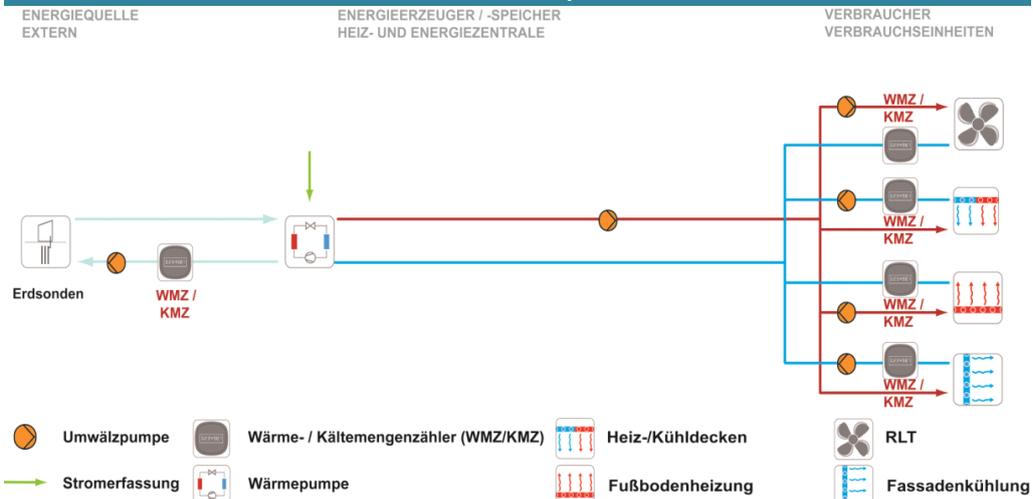
### Wärmepumpe

Hersteller	Klima-Plan	Elekt. Nennleistung	22.9 kW
Wärmeleistung	270 kW	COP	2.86
Kühlleistung (KM/FK)	320/200 kW		

### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Erdreich	Planung:	
Übertrager	Erdwärmesonden	Wärmeentzug	155 MWh/a
Anzahl	36	Wärmeeintrag	100 MWh/a
Tiefe	150 m	spez. Entzugsleistung	46.3 W/m
Abstand	8 m	spez. Eintragsleistung	k.A. W/m
Einbauort	neben dem Gebäude		

### Messkonzept



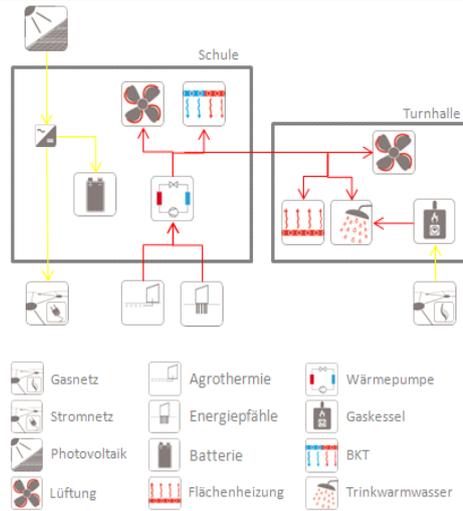


## Schule Neumarkt (Geb. 14)

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten		
Baujahr	2015	Beheiztes Gebäudevolumen ( $V_E$ )	k.A.	$m^3$
Bruttogeschossfläche (BGF)	20.097 $m^2$	Jahresheizenergiebedarf ( $Q_H+Q_{TWW}$ )	k.A.	kWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	15.600 $m^2$	spez. Heizwärmebedarf ( $q_h+q_{TWW}$ )	30,2	kWh/ $m^2$ a

### Gebäude

Das 2015 erbaute Gymnasium in Neumarkt verfügt über 96 aktivierte Bohrpfähle sowie einem 4.400  $m^2$  großen Agrothermiefeld, welche den Komplex über Wärmepumpen mit Energie für die Lüftung und Flächenheizung, sowohl im Schulgebäude als auch in der angrenzenden Sporthalle, versorgen. Zusätzlich verfügt das Gebäude über auf dem Dach montierte PV-Module, welche zum Einen über einen Wechselrichter das Aufladen von Elektrofahrzeugen ermöglichen und zum Anderen Strom in das öffentliche Netz einspeisen. Zur vollständigen Abdeckung des Energiebedarfs wird ein Gasbrennwertkessel zur Trinkwarmwasserbereitung verwendet.



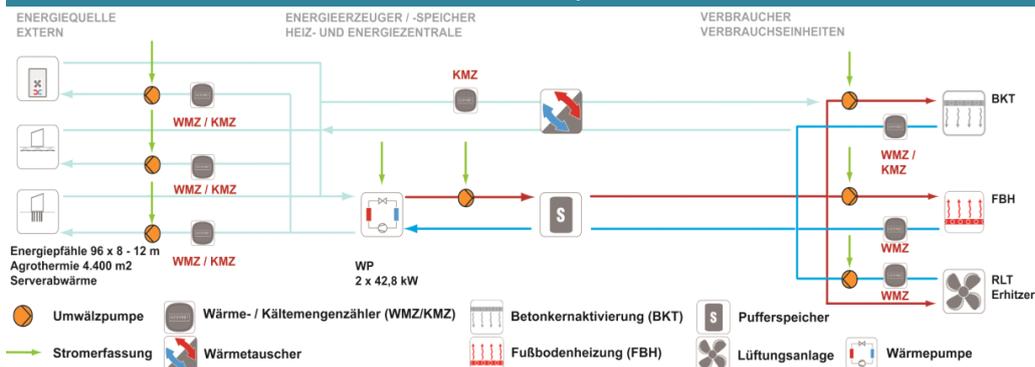
### Wärmepumpe

Hersteller	Viessmann	Elekt. Nennleistung	2 x 9.28 kW
Wärmeleistung	2 x 42.8 kW	COP (B0/W35)	4.6
Kühlleistung (FK)	200 kW		

### Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle 1	Erdreich	Planung	
Übertrager 1	Energiepfähle	Wärmeentzug Energiepfähle	61.5 MWh/a
Anzahl	96 Stk.	Wärmeeintrag Energiepfähle	70.7 MWh/a
Tiefe	8 - 12 m	spez. Entzugsleistung Energiepfähle	99.6 W/m
Abstand		spez. Eintragsleistung Energiepfähle	k.A. W/m
Einbauort	unterhalb des Gebäudes		
Quelle 2	Erdreich	Wärmeentzug Agrothermie	101.7 MWh/a
Übertrager 2	Agrothermie	Wärmeeintrag Agrothermie	102.3 MWh/a
Größe	4.400 $m^2$	spez. Entzugsleistung Agrothermie	22.6 W/ $m^2$
Einbauort	unterhalb des Sportplatz	spez. Eintragsleistung Agrothermie	k.A. W/ $m^2$

### Messskonzept



## 16.4 Monitoringergebnisse der Gebäude

Im folgenden Abschnitt werden zu allen im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten Gebäuden und Anlagen die ausgewerteten Messergebnisse aufgezeigt und analysiert.

### 16.4.1 Gebäude 1 - EFH

Die Wärmepumpe in dem 2008 erbauten Einfamilienhaus versorgt die Heizung und Trinkwarmwasserbereitung. Dazu wurden insgesamt 3 Erdwärmesonden à 21 m Länge abgeteuft.

#### Wärmebereitstellung

Abbildung 71 zeigt die Wärmebereitstellung gesplittet in Heizung und Trinkwarmwasser. Dem Gebäude wurden in der Messperiode rund 3.000 bis 4.000 kWh/a (11,6 bis 15,4 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>·a)) Wärme über die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt.

Die Wärmemenge wurde dem Gebäude zu 67 % über die statische Heizung und zu 33 % über Trinkwarmwasserbereitung zugeführt. (Tabelle 26)

Die Wärmebereitstellung für Heizung und Trinkwarmwasser folgt den Jahreszeiten und Außentemperaturen. In den Sommermonaten wird nur die Trinkwarmwasserbereitung versorgt, Heizenergie fällt nicht bzw. nur sehr gering an.

Die mittleren monatlichen Vor- und Rücklauftemperaturen sind in Abbildung 72 dargestellt. Die mittleren Vorlauftemperaturen liegen für die Raumheizung in Abhängigkeit der Außentemperaturen zwischen 23,5 und 27,0 °C. Das Trinkwarmwasser wird mit einer mittleren Vorlauftemperatur von 38,0 bis 44,1 °C versorgt.

Tabelle 26 Messdaten der Wärmebereitstellung Heizung und Trinkwarmwasser

	2015 (ab Feb.)	2016	2017 (bis Nov.)
Wärmebereitstellung gesamt [kWh/a]	5.080	3.990	2.590
Wärmebereitstellung Heizung [kWh/a]	3.980	2.590	1.250
spez. Energie Heizung [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	15,4	10	4,8
Wärmebereitstellung TWW [kWh/a]	1.100	1.400	1.340
spez. Energie TWW [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	4,2	5,4	5,2

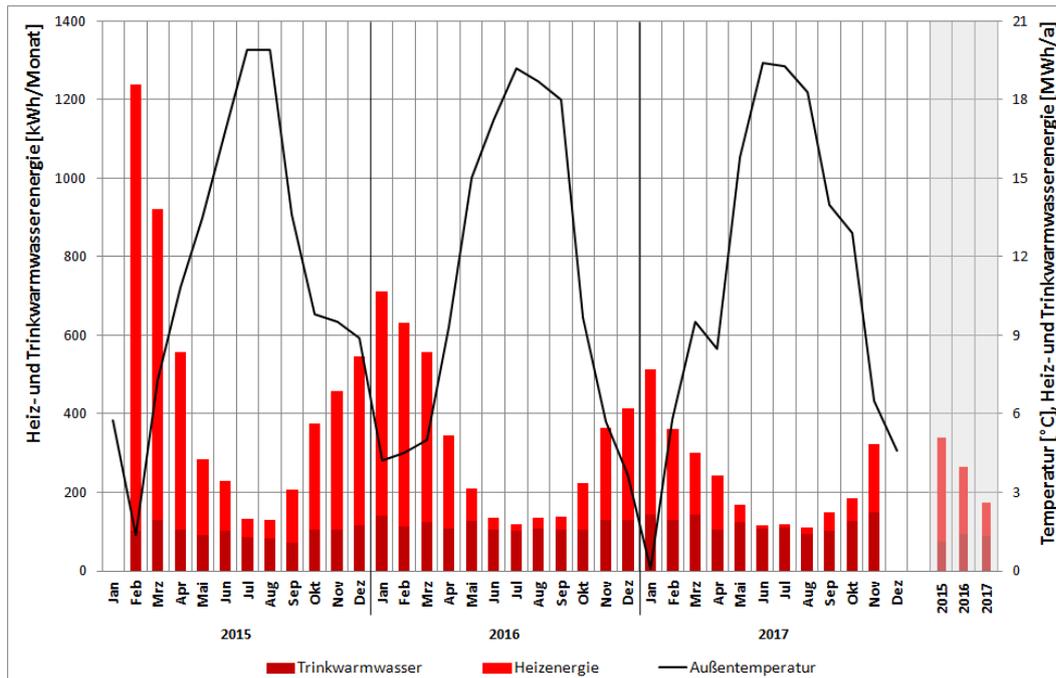


Abbildung 71 Monatlicher Wärmebereitstellung der Wärmepumpe (geothermischer Anteil) sowie Außentemperatur, 2015 – 2017

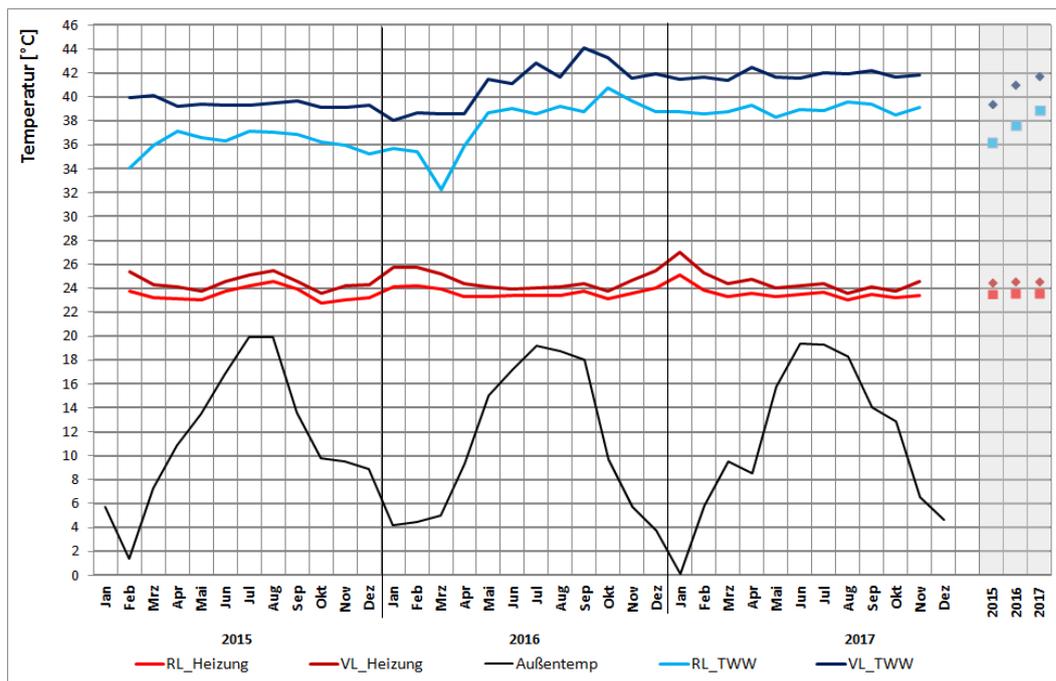


Abbildung 72 Monatsmittel der Vor- und Rücklauftemperaturen für die Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung, 2015 – 2017

### Wärmentzug Quelle

Im Messzeitraum wurde über den Wärmeübertrager im Durchschnitt 6.300 kWh/a (100 kWh/(m-a)) der Quelle Wärme entzogen. (Abbildung 73)

Die mittleren monatlichen Ein- und Austrittstemperaturen sind in Abbildung 74 dargestellt. Anhand der erfassten Fluidtemperaturen kann ein stabiler Temperaturverlauf zwischen Wärmentzug und Regeneration festgestellt werden. Die Temperaturen und der Wärmentzug weisen keine Unstimmigkeiten auf.

Tabelle 27 Messdaten des Wärmezugs

	2015 (ab Feb.)	2016	2017 (bis Nov)
Entzugsenergie [kWh/a]	5.610	7.150	6.000
spez. Entzugsenergie [kWh/(m-a)]	89,02	113,54	95,29
spez. mittlere Entzugsleistung [W/m]	15,7	33,3	30,9

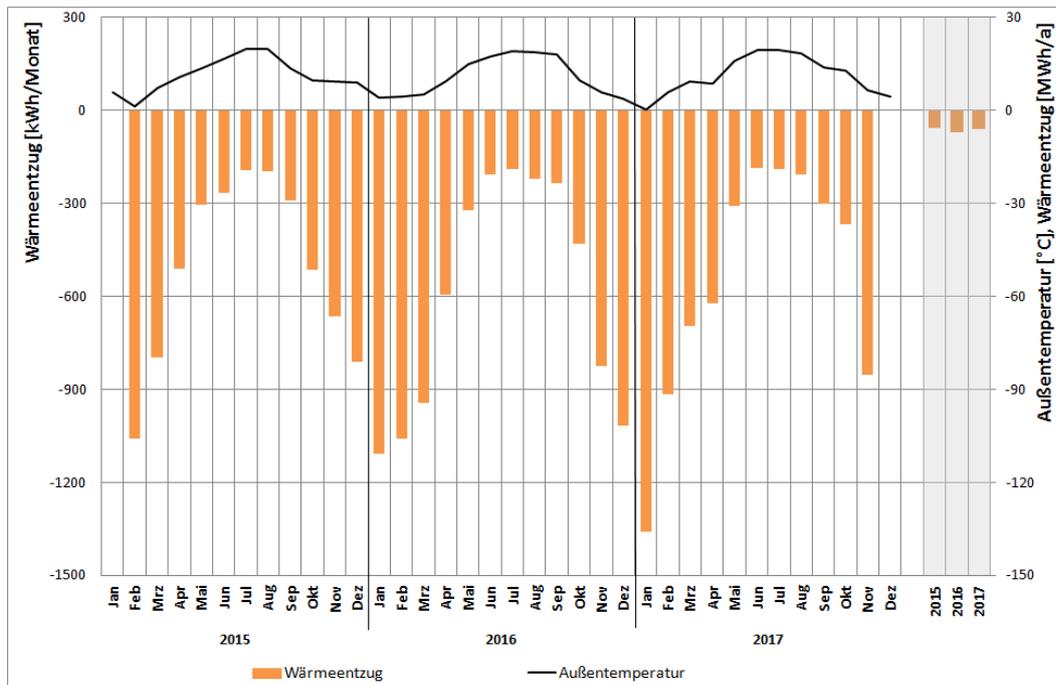


Abbildung 73 Monatlicher Wärmeentzug sowie Außentemperatur, 2015 – 2017

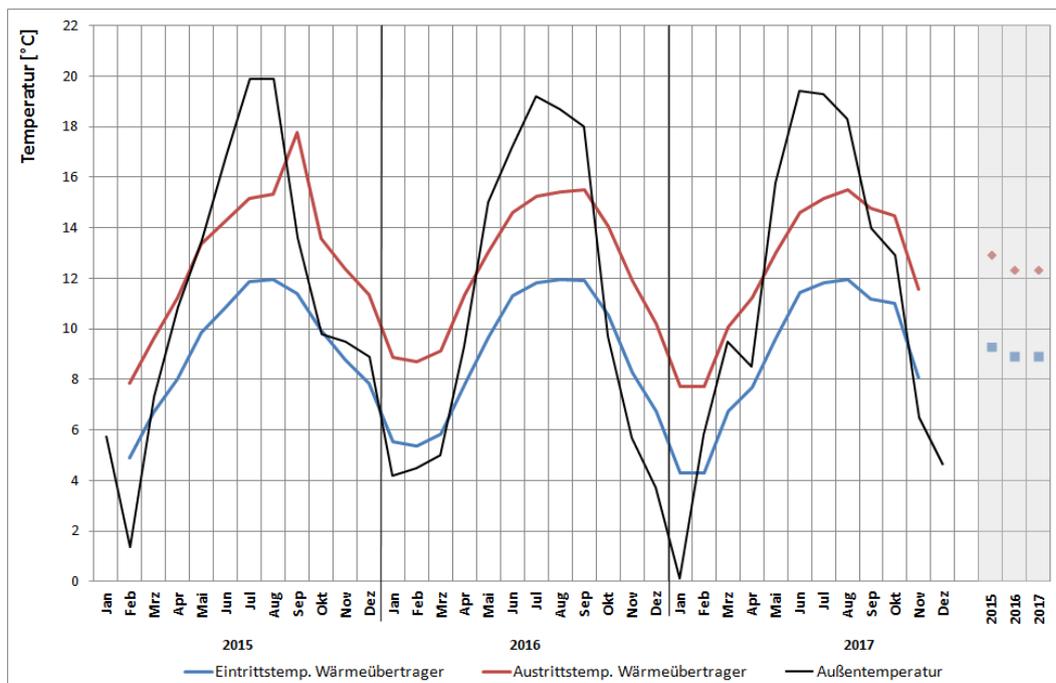


Abbildung 74 Monatsmittel der Ein- und Austrittstemperaturen des Wärmeübertragers und Außentemperatur, 2015 – 2017

## Wärmepumpe

Im Rahmen des Monitorings wurde festgestellt, dass die Wärmemengenzähler nicht ordnungsgemäß funktionieren müssen und auf Gebäudeseite einen geringeren Wärmeverbrauch erfassen, als verbraucht wurde. Für Die Auswertung der Arbeitszahl werden daher der Stromverbrauch der Wärmepumpe und der Wärmeentzug aus dem Erdreich herangezogen.

Im Durchschnitt konnte im Messzeitraum eine Jahresarbeitszahl von rund 4,0 erzielt werden. Der Zielwert von einem COP von 4,5 wird annähernd erreicht. Da die Randbedingungen in der Praxis nicht denen auf dem Prüfstand entsprechen, kann die Arbeitszahl höher oder niedriger ausfallen.

Anhand der Betriebsstunden in Abbildung 76 ist festzustellen, dass die Wärmepumpe im Durchschnitt pro Monat rund 580 Std. in Betrieb ist. In den Sommermonaten sinken die Betriebsstunden durch die alleinige Trinkwarmwasserbereitung. Anhand der Betriebsstunden ist festzustellen, dass die Anlage, insbesondere in den Sommermonaten, doch recht häufig läuft. Hier wären ggf. Optimierungen zu prüfen.

Tabelle 28 Messdaten der Wärmepumpe

	2015 (ab Feb.)	2016	2017 (bis Nov.)
Jahresarbeitszahl (JAZ1)	4,03	4,24	4,19
Betriebsstunden pro Jahr	6.930	7.094	6.742

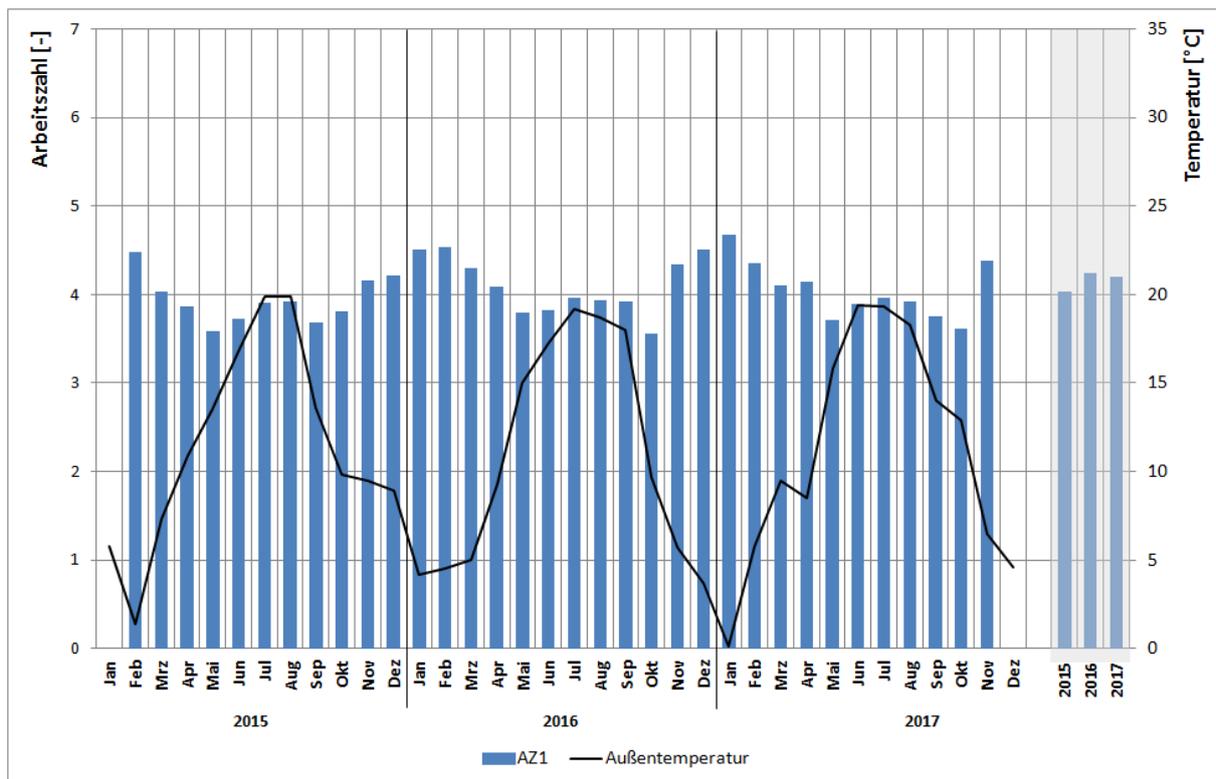


Abbildung 75 Monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpe, 2015 – 2017

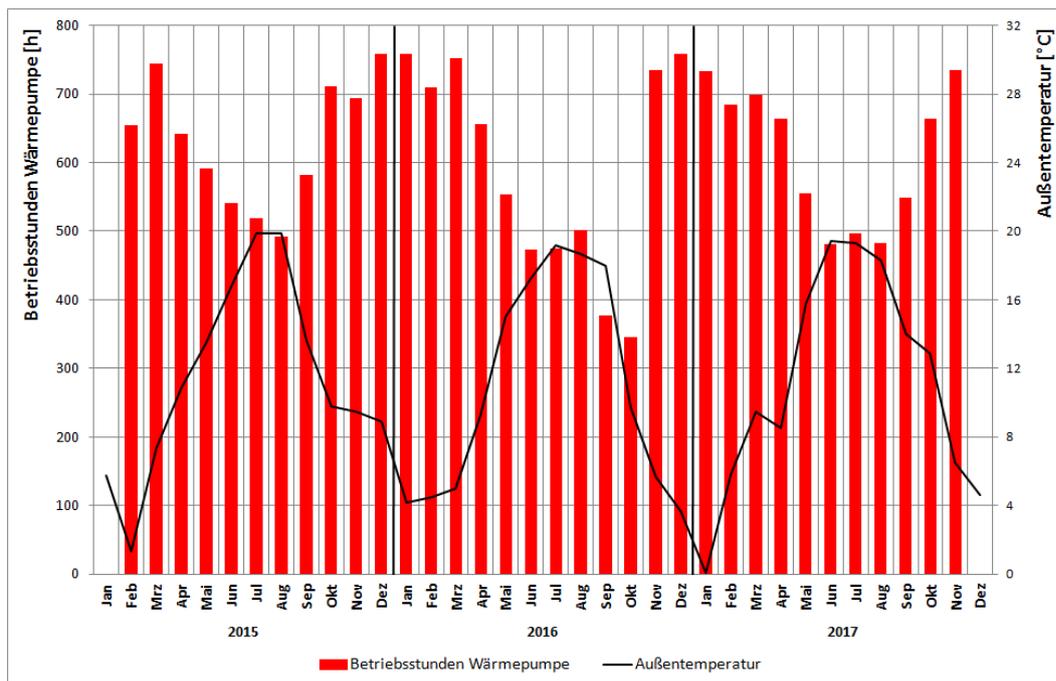


Abbildung 76 Monatliche Betriebsstunden der Wärmepumpe, 2015 – 2017

### 16.4.2 Gebäude 2 – EFH

Die Wärme und Energieversorgung des Gebäudes erfolgt über eine Wärmepumpe, einem Erdwärmespeicher (eTank), PVT- Modulen und einem wasserführenden Kamin. Der Stromüberschuss wird in eine Lithium-Ionen Batterie oder in das öffentliche Stromnetz gespeist.

#### Wärmebereitstellung

Abbildung 77 zeigt die Wärmebereitstellung gesplittet in Heizung und Trinkwarmwasser. Dem Gebäude wurden in der Messperiode  $\sim 6.000 \text{ kWh/a}$  ( $38 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ ) Wärme über die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt.

Die Wärmemenge wurde dem Gebäude zu 90 % über die statische Heizung und zu 10 % über Trinkwarmwasserbereitung zugeführt. (Tabelle 29)

Die Wärmebereitstellung für Heizung und Trinkwarmwasser folgt den Jahreszeiten und Außentemperaturen. In den Sommermonaten wird nur die Trinkwarmwasserbereitung versorgt, Heizenergie fällt nicht an.

Die mittleren monatlichen Vor- und Rücklauftemperaturen sind in Abbildung 78 dargestellt. Die Vorlauftemperaturen liegen für die Raumheizung in Abhängigkeit der Außentemperaturen zwischen 26 und 30 °C. Das Trinkwarmwasser wird mit einer Vorlauftemperatur von 28 bis 34 °C versorgt.

Tabelle 29 Messdaten der Wärmebereitstellung Heizung und Trinkwarmwasser

	2016 (ab Feb.)	2016	2018 (bis Juni)
Wärmebereitstellung gesamt [kWh/a]	4.760	6.370	3.790
Wärmebereitstellung Heizung [kWh/a]	4.210	6.260	3.530
spez. Energie Heizung [kWh]/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)	28,1	41,7	22,3
Wärmebereitstellung TWW [kWh/a]	550	400	267
spez. Energie TWW [kWh]/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)	0,55	0,4	1,7

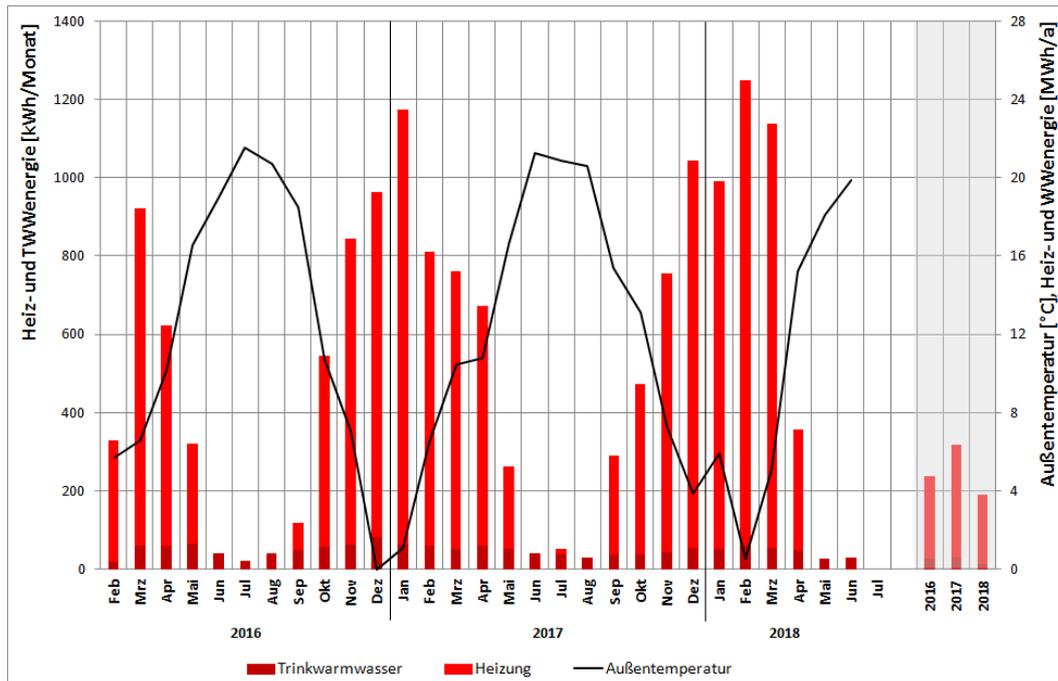


Abbildung 77 Monatliche Wärmebereitstellung Heizung und Trinkwarmwasser sowie Außentemperatur, 2016 – 2018

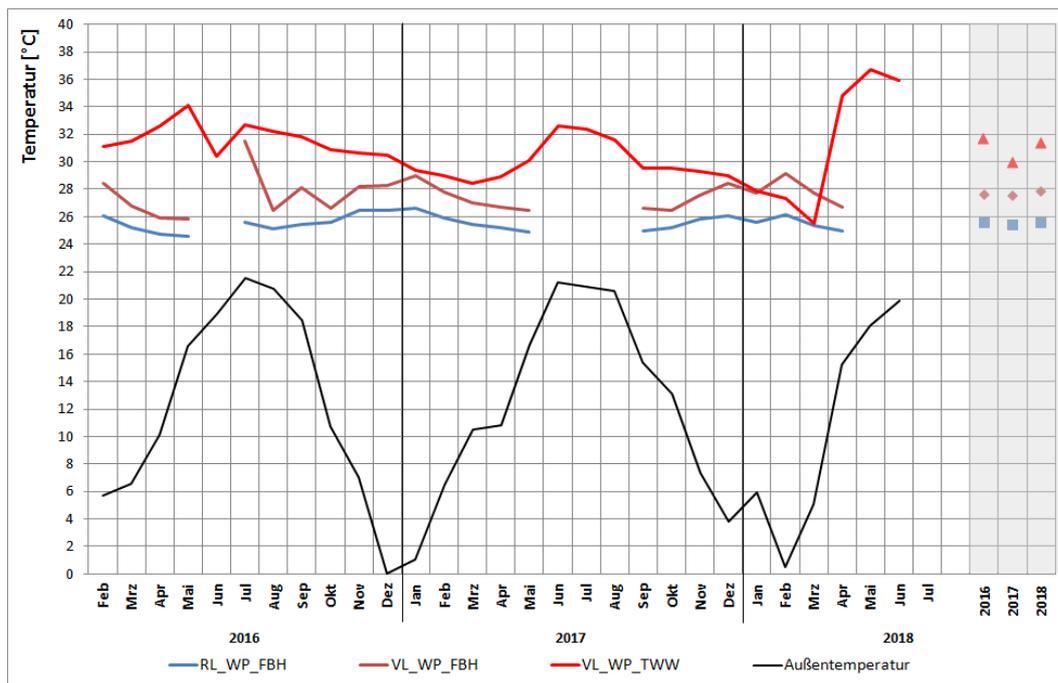


Abbildung 78 Monatsmittel der Vor- und Rücklauftemperaturen für die Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung, 2016 – 2018

### Wärmentzug Quelle

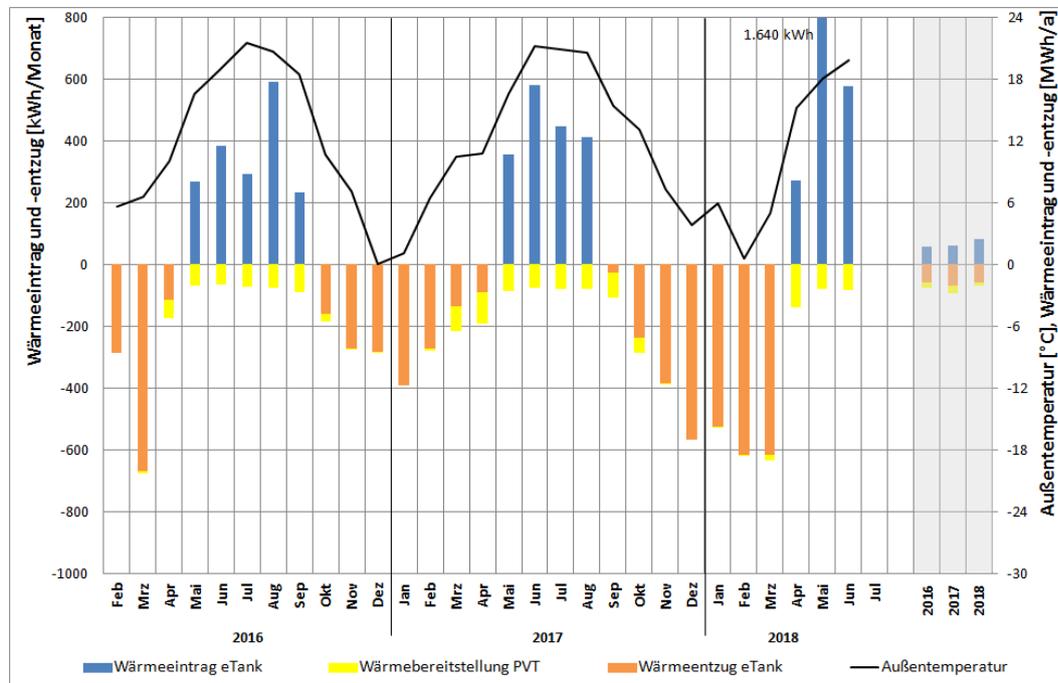
Im Messzeitraum wurde dem eTank im Durchschnitt 2.000 kWh/a ( $13 \text{ kWh}/(\text{m}^3 \cdot \text{a})$ ) Wärme entzogen und 1.800 bis 2.500 kWh/a ( $12 \text{ bis } 16,7 \text{ kWh}/(\text{m}^3 \cdot \text{a})$ ) Wärme zugeführt. (Abbildung 79)

Anhand der Messwerte ist ein jahreszeitlicher Verlauf festzustellen. Die Ein- und Austrittstemperaturen sind in Abbildung 80 dargestellt. Anhand der erfassten Fluidtemperaturen kann ein normaler Temperaturverlauf zwischen Wärmentzug und Regeneration festgestellt werden.

Der Verlauf liegt zwischen 6 °C in der Heizperiode bis zu 24 °C in den Sommermonaten, wenn der eTank beladen wird.

**Tabelle 30 Messdaten des Wärmentszugs**

	2016 (ab Feb.)	2017	2018 (bis Juni)
Eintragsenergie eTank [kWh/a]	1.770	1.800	2.490
spez. Eintragsenergie eTank [kWh/(m <sup>3</sup> ·a)]	11,8	12,0	16,6
spez. mittlere Eintragsleistung eTank [kW/m <sup>3</sup> ]	2,35	76,9	1,91
Entzugsenergie eTank [kWh/a]	1.780	2.100	1.750
spez. Entzugsenergie eTank [kWh/(m <sup>3</sup> ·a)]	11,8	14,0	11,7
spez. mittlere Entzugsleistung eTank [kW/m <sup>3</sup> ]	1,41	55,1	2,5
Wärmebereitstellung PVT ans Gebäude [kWh/a]	460	650	320



**Abbildung 79 Monatlicher Wärmeentzug und -eintrag der Systeme sowie Außentemperatur, 2016 – 2018**

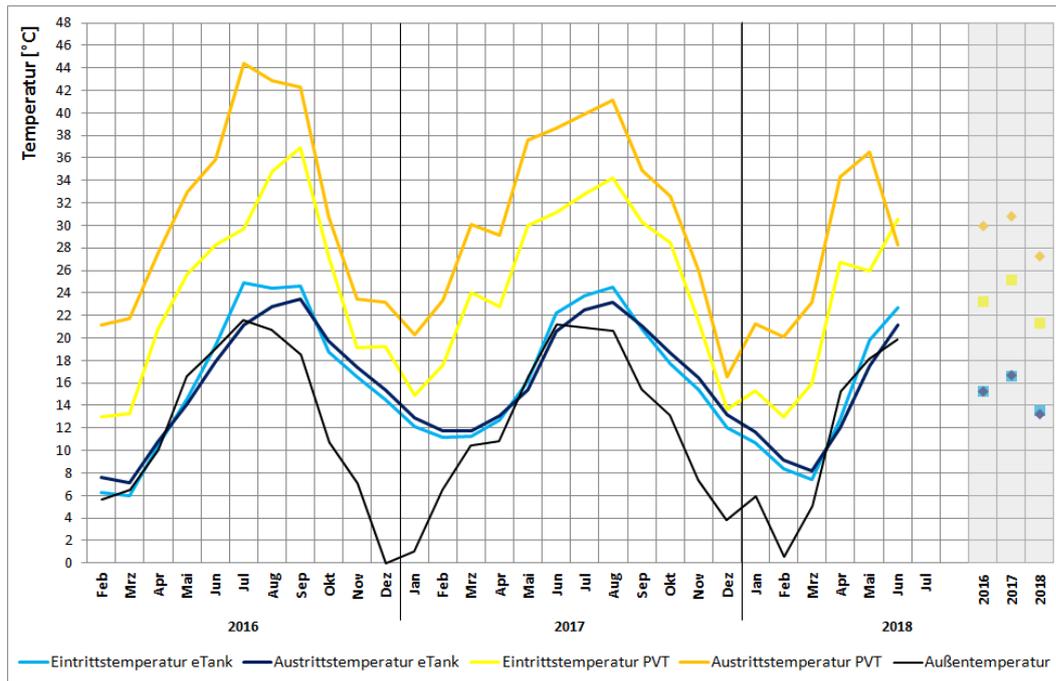


Abbildung 80 Monatsmittel der Ein- und Austrittstemperaturen der Übertrager, 2016 – 2018

## Wärmepumpe

Im Durchschnitt konnte im Messzeitraum Jahresarbeitszahlen > 5,0 erzielt werden. Werden die monatlichen Arbeitszahlen der Anlage betrachtet, so ist festzustellen, dass die Wärmepumpe durchgängig im effizienten Bereich arbeitet und die Zielwerte gemäß Datenblatt der Wärmepumpe mit einem COP von 4,28 deutlich übersteigt. In den Sommermonaten werden hohe Arbeitszahlen der Wärmepumpe erzielt. Durch den Regenerationsbetrieb und der alleinigen Trinkwarmwasserbereitung, wird die Anlage sehr effizient in ihrem Betrieb. Die AZ2 ist wiederum geringer, da hier die Beladung des eTanks mit eingerechnet wird und der dafür benötigte Umwälzpumpenbetrieb.

Es ist hervorzuheben, dass die Beladung des eTanks nur mit eigens produziertem PV-Strom erfolgt und somit der Betrieb wirtschaftlicher und ökologischer ist.

Anhand der Betriebsstunden in Abbildung 82 ist festzustellen, dass die Wärmepumpe in der Heizperiode bis zu 720 Std in Betrieb ist. In den Sommermonaten sinken die Betriebsstunden durch die alleinige Trinkwarmwasserbereitung.

Tabelle 31 Messdaten der Wärmepumpe

	2016 (ab Feb.)	2016	2018 (bis Juni)
Jahresarbeitszahl AZ1/AZ2	5,7/4,68	6,25/5,38	4,44 / 3,91
Betriebsstunden (gesamt)	4.038	5.165	2.392

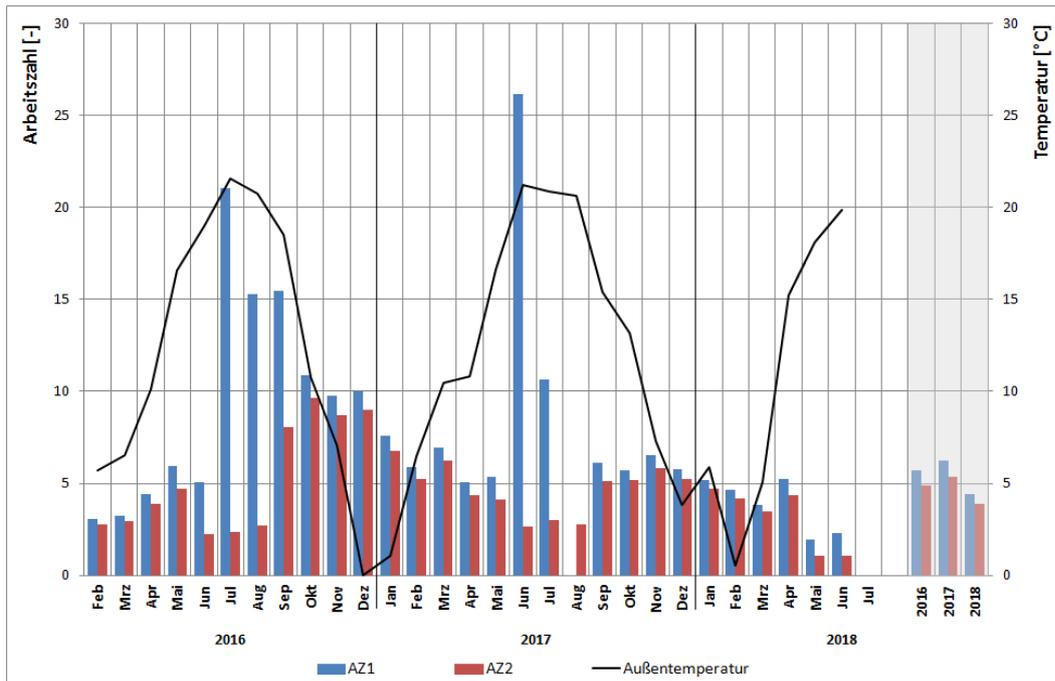


Abbildung 81 Monatliche Arbeitszahlen der Wärmepumpe, 2016 – 2018

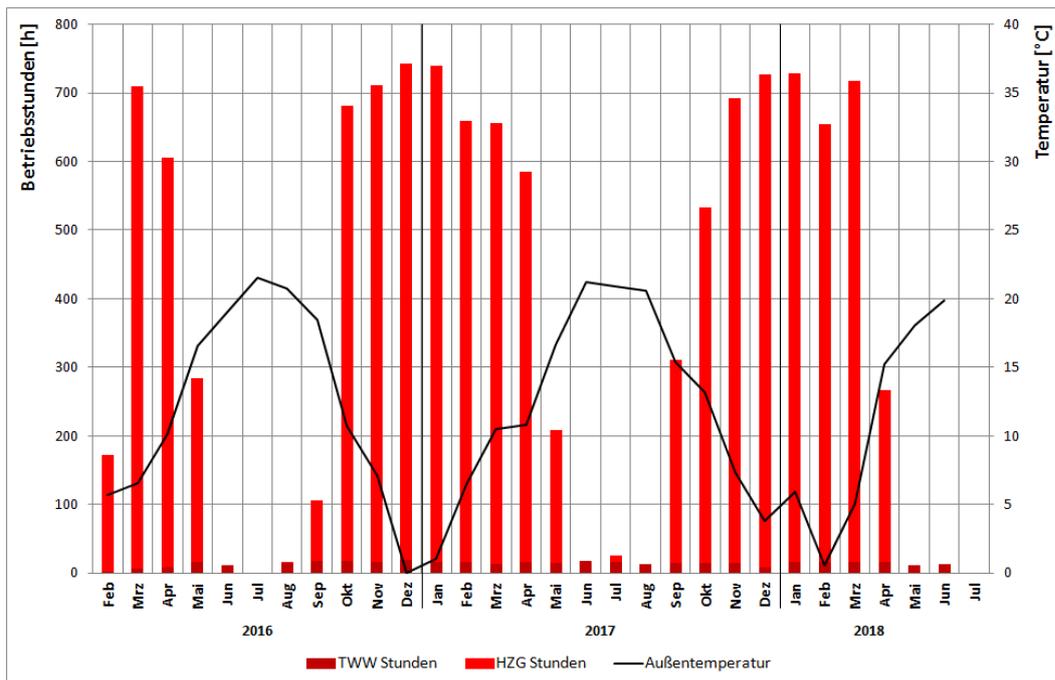


Abbildung 82 Monatliche Betriebsstunden der Wärmepumpe, 2016 – 2018

### 16.4.3 Gebäude 3 – EFH

Das Einfamilienhaus verwendet einen Energiezaun als Wärmeübertrager. Ein Teil des Zaunes befindet sich unter der Erdoberkante, um bei tiefen Lufttemperaturen die Erdwärme nutzen zu können. Die Wärmepumpe versorgt neben der Raumheizung auch die Trinkwassererwärmung.

#### Wärmebereitstellung

Abbildung 83 zeigt die Wärmebereitstellung gesplittet in Heizung und Trinkwarmwasser. Dem Gebäude wurden in der Messperiode 17.000 bis 18.000 kWh/a (81,7 bis 86,5 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>·a)) Wärme über die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt.

Die Wärmemenge wurde dem Gebäude zu 83 % über die statische Heizung und zu 17% über Trinkwarmwasserbereitung zugeführt. (Tabelle 32)

Die Wärmebereitstellung für Heizung und Trinkwarmwasser folgt den Jahreszeiten und Außentemperaturen. In den Sommermonaten wird nur die Trinkwarmwasserbereitung versorgt, Heizenergie fällt nicht an.

Die mittleren monatlichen Vor- und Rücklauftemperaturen sind in Abbildung 84 dargestellt. Die Vorlauftemperaturen liegen für die Raumheizung in Abhängigkeit der Außentemperaturen zwischen 24,4 und 34,6 °C. Das Trinkwarmwasser wird mit einer Vorlauftemperatur von 44,5 bis 46,3 °C versorgt.

**Tabelle 32** Messdaten der Wärmebereitstellung Heizung und Trinkwarmwasser

	2010 (ab Sep.)	2011	2012	2013 (bis Sep.)
Wärmebereitstellung gesamt [kWh/a]	7.910	17.000	18.250	12.280
Wärmebereitstellung Heizung [kWh/a]	6.870	13.930	15.180	10.110
spez. Energie Heizung [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	33	67	73	48,6
Wärmebereitstellung TWW [kWh/a]	1.050	3.070	3.070	2.170
spez. Energie TWW [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	5	14,7	14,7	10,4

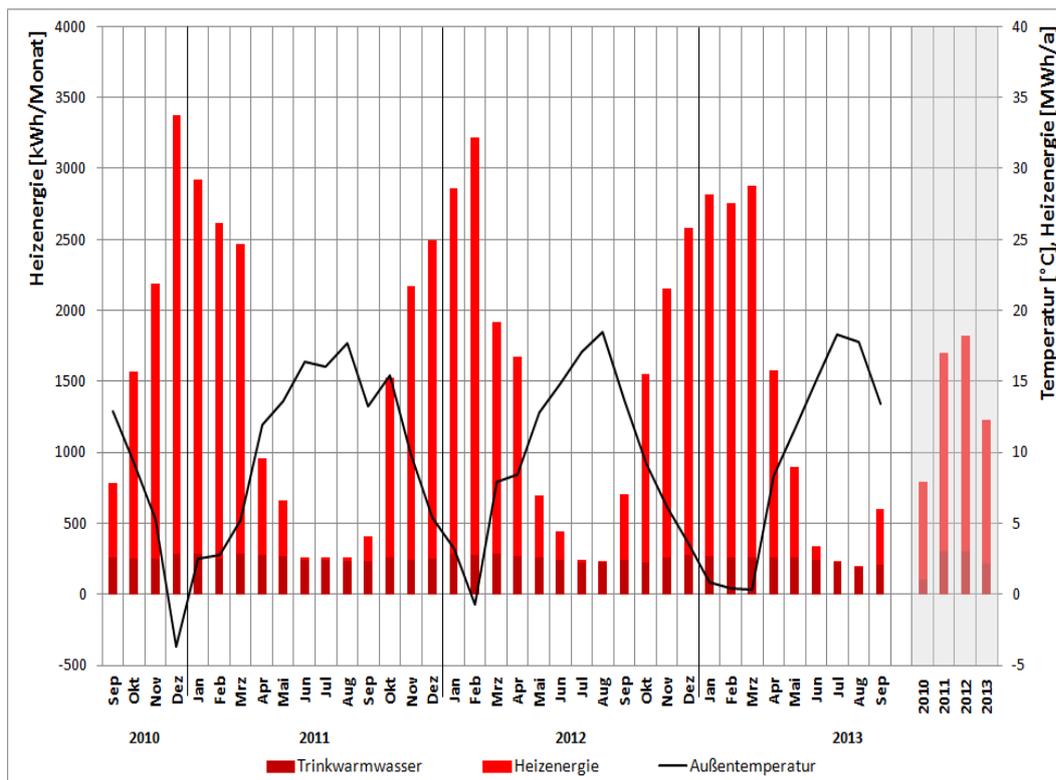


Abbildung 83 Monatlicher Wärmebereitstellung der Wärmepumpe sowie Außentemperatur, 2010 – 2013

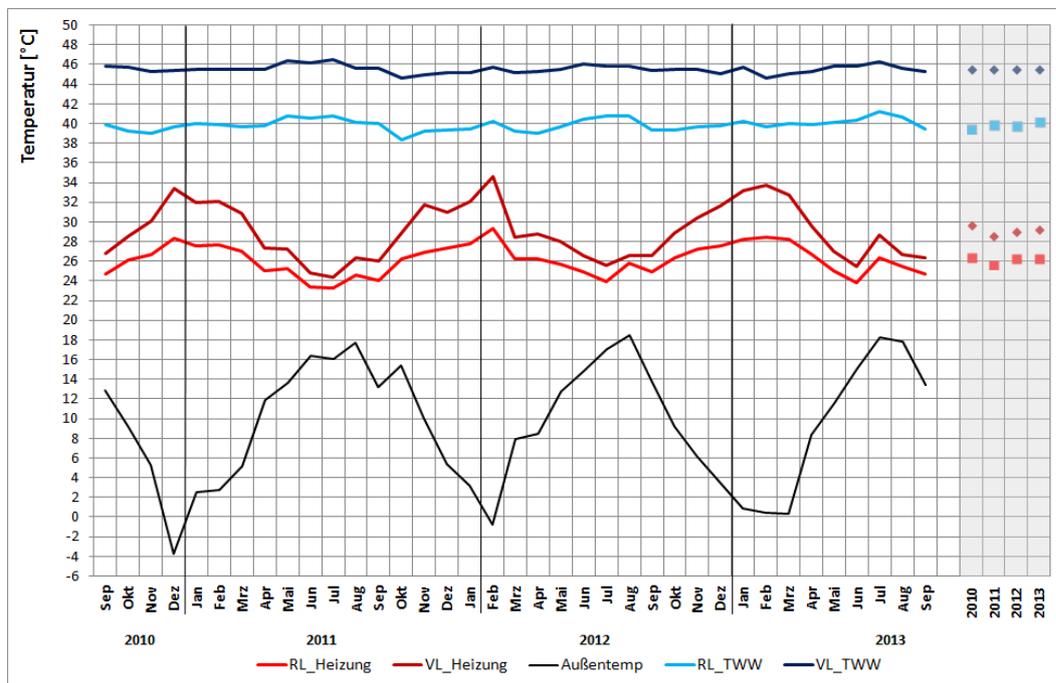


Abbildung 84 Monatsmittel der Vor- und Rücklauftemperaturen für die Fußbodenheizung und Trinkwarmwasserbereitung, 2010 – 2013

### Wärmentzug Quelle

Im Messzeitraum wurde über den Energiezaun im Durchschnitt 15.000 kWh/a (780 kWh/(m<sup>2</sup>·a)) Wärme entzogen. (Abbildung 85)

Anhand der Messwerte ist ein den Jahreszeiten abhängiger Verlauf festzustellen. Die mittleren monatlichen Ein- und Austrittstemperaturen sind in Abbildung 86 dargestellt. Anhand der erfassten Fluidtemperaturen ist ein eingeschwungener Betrieb festzustellen. Die Austrittstemperaturen liegen zwischen  $-2^{\circ}\text{C}$  im Winter und  $22^{\circ}\text{C}$  im Sommer.

Tabelle 33 Messdaten des Wärmezugs

	2010 (ab Sep.)	2011	2012	2013 (bis Sep)
Entzugsenergie [kWh/a]	6.440	14.540	15.160	10.560
spez. Entzugsenergie [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	335,4	757,3	789,6	550
spez. mittlere Entzugsleistung [W/m <sup>2</sup> ]	224,5	204,2	205,2	195,3

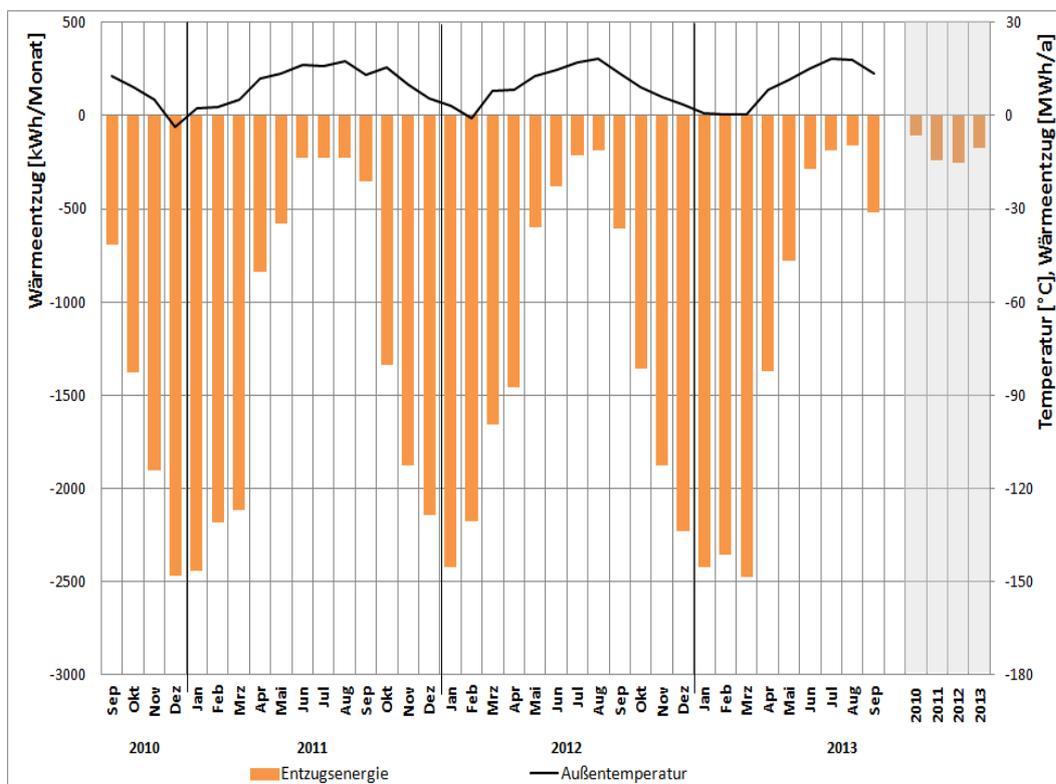


Abbildung 85 Monatlicher Wärmeentzug sowie Außentemperatur, 2010 – 2013

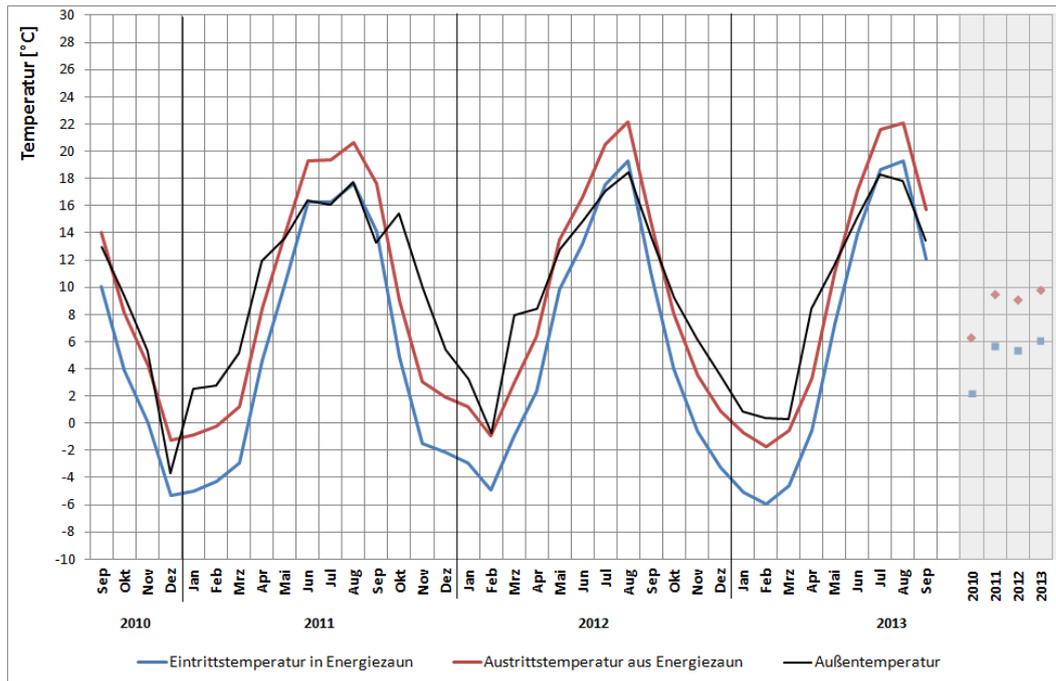


Abbildung 86 Monatsmittel der Ein- und Austrittstemperaturen Energiezaun, 2010 – 2013

## Wärmepumpe

Im Durchschnitt konnte im Messzeitraum eine Jahresarbeitszahl (JAZ1) von  $\sim 4,0$  erzielt werden. Werden die monatlichen Arbeitszahlen (AZ 1 und AZ2) der Anlage betrachtet, so ist festzustellen, dass die Wärmepumpe durchgängig im effizienten Bereich arbeiten und die Zielwerte gemäß Datenblatt der Wärmepumpe mit einem gesamt COP von 4,8 annähernd erreicht werden.

Anhand der Betriebsstunden in Abbildung 88 ist festzustellen, dass die Wärmepumpe gemäß den Außentemperaturen und Betriebszuständen zwischen 30 und 350 Stunden pro Monat läuft. In den Sommermonaten sinken die Betriebsstunden durch die alleinige Trinkwarmwasserbereitung. Anhand der Betriebsstunden sind keine Unstimmigkeiten abzuleiten. Die Anlage läuft ordnungsgemäß.

Tabelle 34: Messdaten der Wärmepumpe

	2010 (ab Sep.)	2011	2012	2013 (bis Sep)
Jahresarbeitszahl AZ1/AZ2	3,56/3,30	4,05/3,71	3,91/3,61	6,02/5,50
Betriebsstunden (gesamt)	2.959	6.487	7.271	4.580

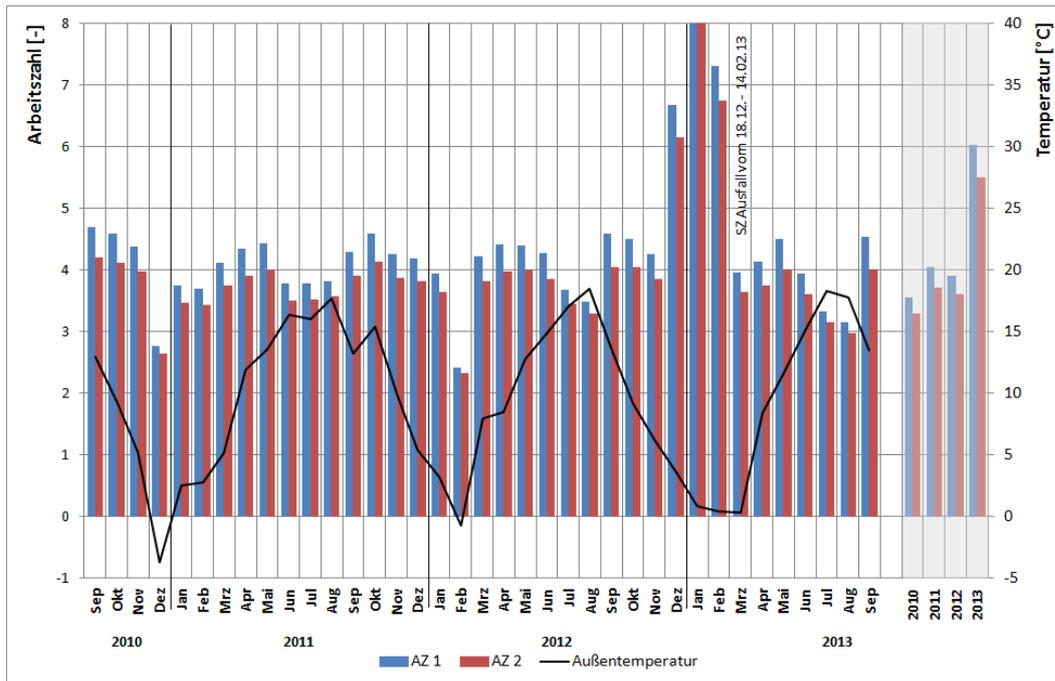


Abbildung 87 Monatliche Arbeitszahlen der Wärmepumpe, 2010 – 2013

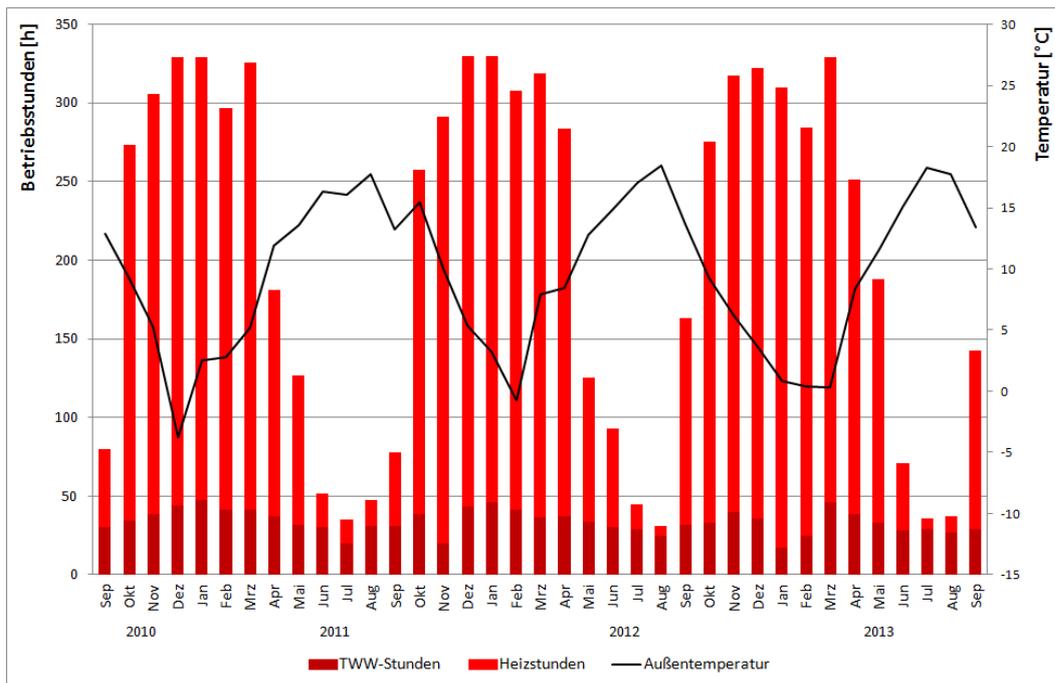


Abbildung 88 Monatliche Betriebsstunden der Wärmepumpe, 2010 – 2013

### 16.4.4 Gebäude 4 – EFH

Das Einfamilienhaus wurde im Jahr 2015 teilsaniert. Es sind sechs Erdwärmesonden an die Wärmepumpe angebunden. Diese belädt den Speicher, welcher die Heizkörper und das Trinkwassersystem versorgt.

#### Wärmebereitstellung

Abbildung 89 zeigt die Wärmebereitstellung über die Wärmepumpe für Heizung und Trinkwarmwasser. Dem Gebäude wurden in der Messperiode 5.000 bis 20.000 kWh/a (40 bis 155 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>·a)) Wärme über die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt. In 2017 wird ein deutlich geringerer Wärmeverbrauch erfasst als die Jahre zuvor. Es werden Messfehler bzw. Ausfall der Messtechnik vermutet, da der Betrieb sich sonst zu den Vorjahren nicht geändert hat und auch keine Optimierungen vorgenommen wurden. Der Betreiber wurde informiert.

Die mittleren monatlichen Vor- und Rücklauftemperaturen sind in Abbildung 90 dargestellt. Die Vorlauftemperaturen der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Außentemperaturen liegen zwischen 27 und 43 °C.

Tabelle 35 Messdaten der Wärmebereitstellung Heizung und Trinkwarmwasser

	2015 (ab Feb.)	2016	2017 (bis Nov.)
Wärmebereitstellung Heiz- und Trinkwarmwasser [kWh/a]	20.150	14.960	5.040
spez. Heiz- und Trinkwarmwasserenergie [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	154,96	115,08	38,80

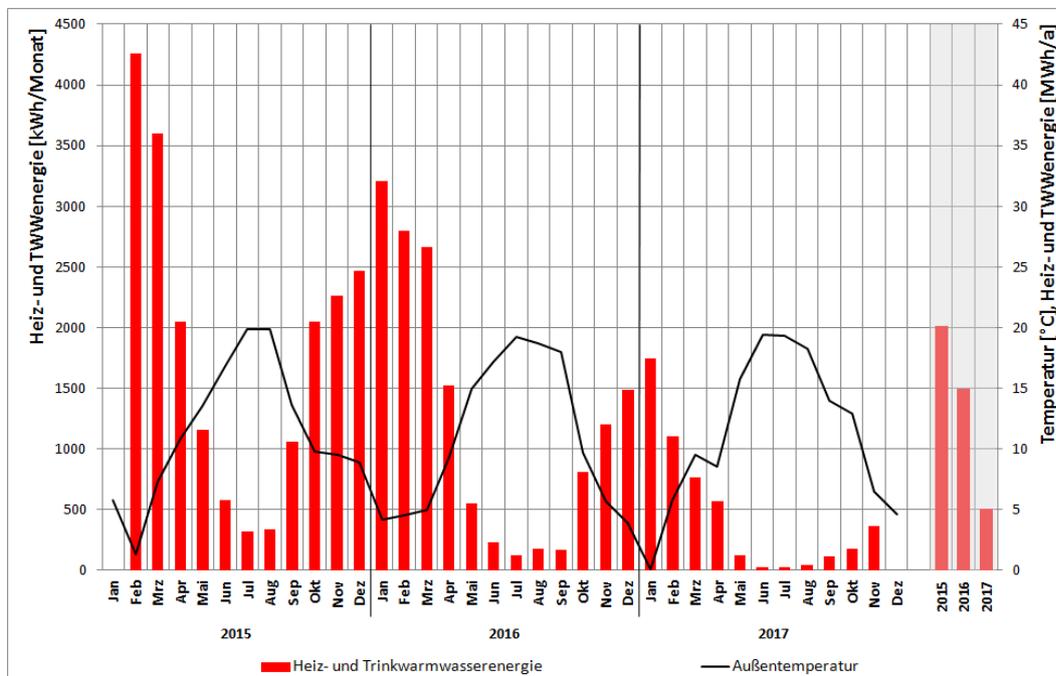


Abbildung 89 Monatlicher Wärmebereitstellung der Wärmepumpe sowie Außentemperatur, 2015 – 2017

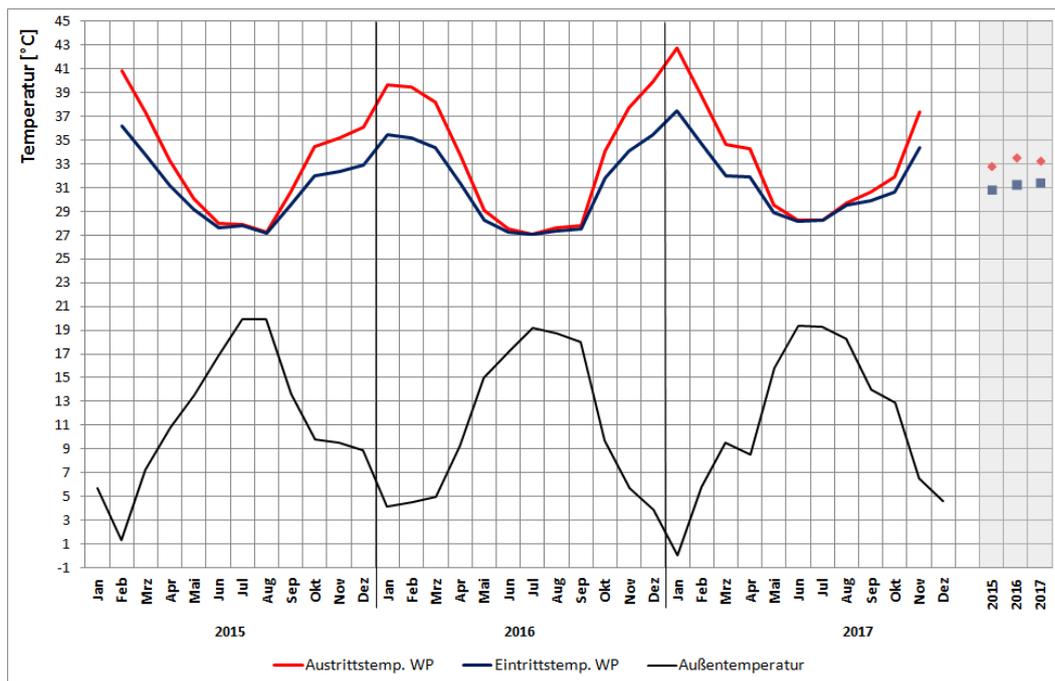


Abbildung 90 Monatsmittel der Vor- und Rücklauftemperaturen Wärmepumpe, 2015 – 2017

### Wärmentzug Quelle

Im Messzeitraum wurde über die Erdwärmesonden im Durchschnitt 21.000 kWh/a (146 kWh/(m-a)) dem Erdreich Wärme entzogen. (Abbildung 91)

Die mittleren monatlichen Ein- und Austrittstemperaturen sind in Abbildung 92 dargestellt. Anhand der erfassten mittleren Fluidtemperaturen kann eingespielter Temperaturverlauf zwischen Wärmenutzung und Regeneration festgestellt werden. Die Austrittstemperaturen liegen zwischen 3 und 15 °C.

Tabelle 36 Messdaten des Wärmentzugs

	2015 (ab Feb.)	2016	2017 (bis Nov.)
Entzugsenergie [kWh/a]	19.290	23.280	17.800
spez. Entzugsenergie [kWh/(m-a)]	133,96	161,65	123,59
spez. mittlere Entzugsleistung [W/m]	45,5	45,2	45,0

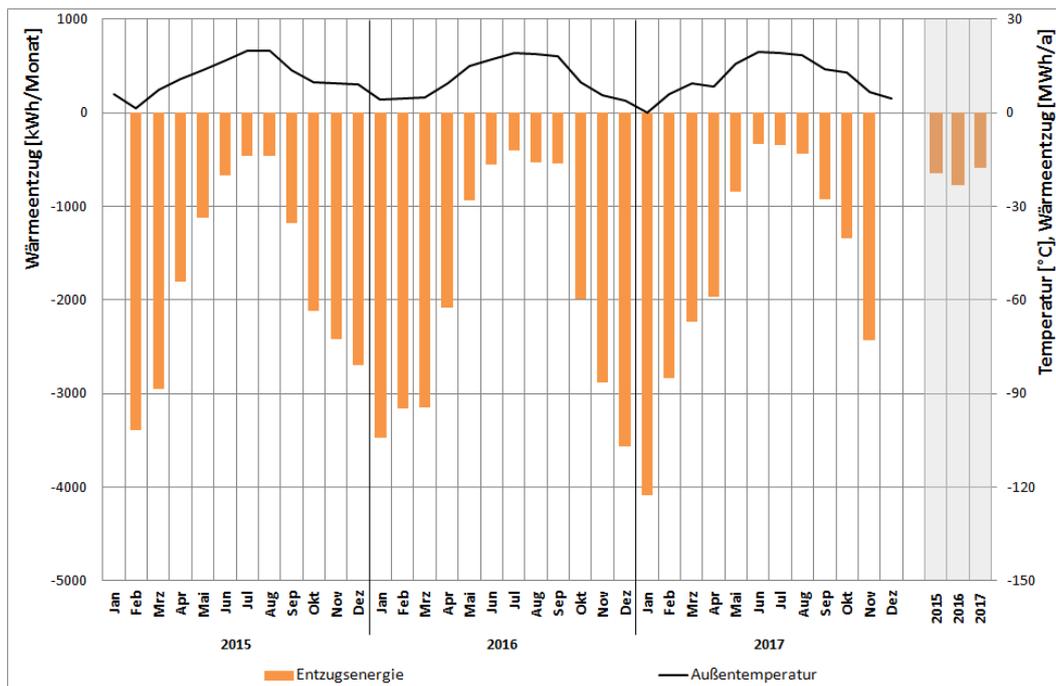


Abbildung 91 Monatlicher Wärmeentzug sowie Außentemperatur, 2015 – 2017

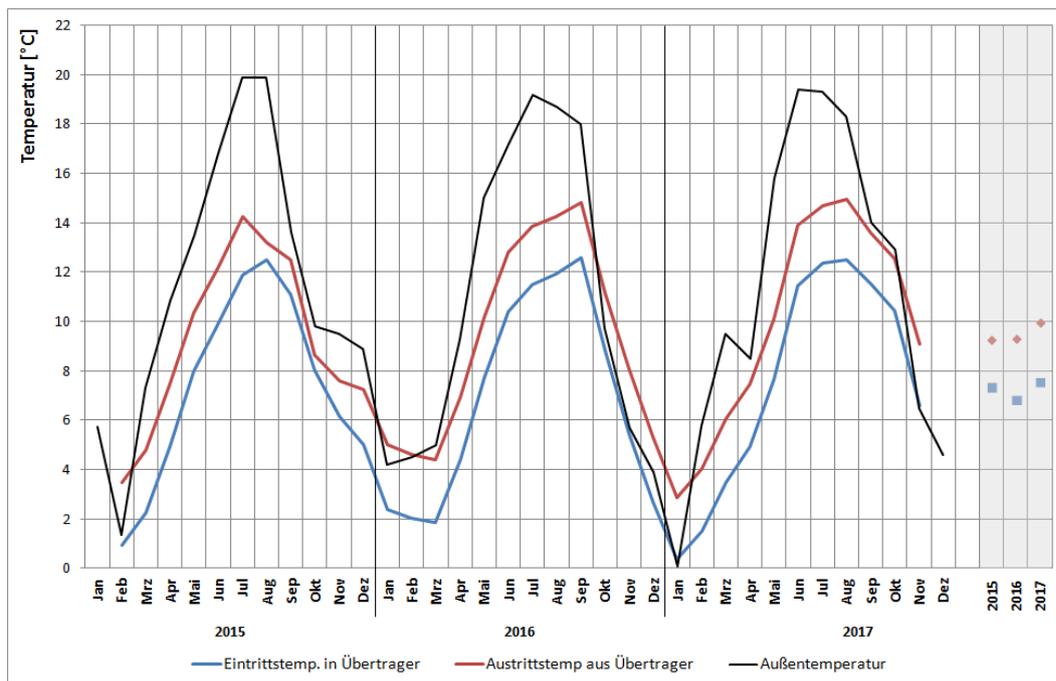


Abbildung 92 Monatsmittel der Ein- und Austrittstemperaturen der Erdwärmesonden, 2015 – 2017

## Wärmepumpe

Im Rahmen des Monitorings wurde festgestellt, dass die Wärmemengenzähler 2017 nicht mehr ordnungsgemäß funktionieren müssen. Trotz der gleichbleibenden Randbedingungen – Betriebsstunden und Temperaturen – sinken die Arbeitszahlen monatlich ab. Dem Betreiber wurden die Unstimmigkeiten mitgeteilt.

Im Durchschnitt konnte im Messzeitraum eine Jahresarbeitszahl für von 3,85 bis unter 0,5 gemessen werden. Anhand der Betriebsstunden in Abbildung 94 ist festzustellen, dass die Wärmepumpe

kontinuierlich durchläuft und selbst in den Sommermonaten, bei reinem Trinkwarmwasserbedarf, hohe Betriebsstunden aufweist. Es wird empfohlen hier genauer auf die Regelung und eingestellten Sollwerte zu achten sowie die Pufferspeicherdimensionierung zu kontrollieren.

Tabelle 37 Messdaten der Wärmepumpe

	2015 (ab Feb.)	2016	2017 (bis Nov.)
Jahresarbeitszahl	3,36	2,02	0,87
Betriebsstunden (gesamt)	8.328	8.959	8.172

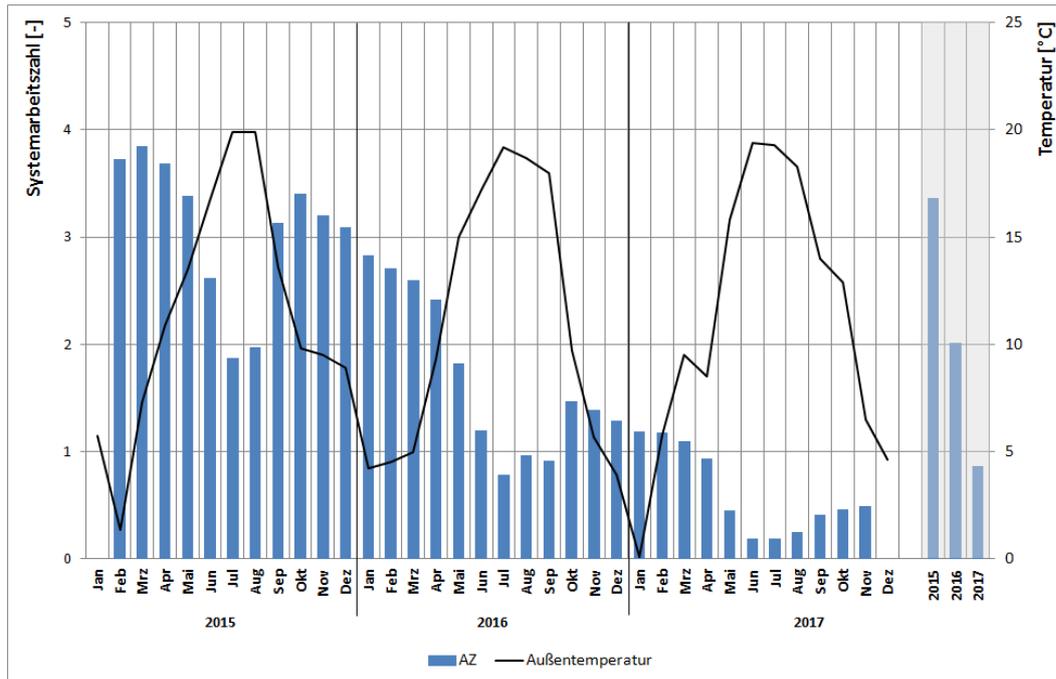


Abbildung 93 Monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpe, 2015 – 2017

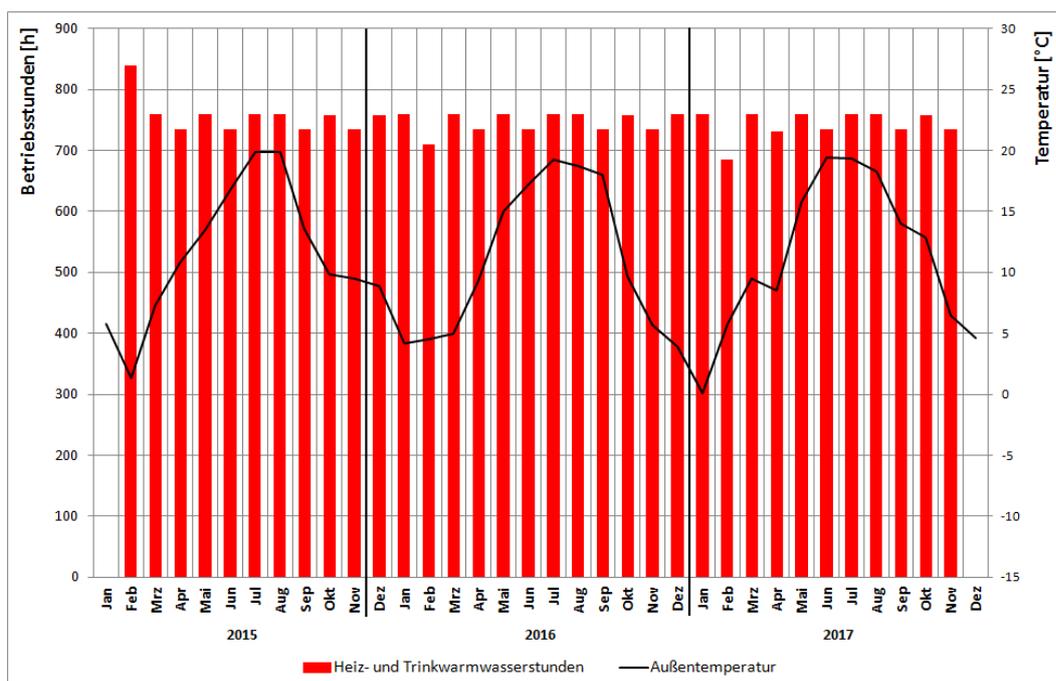


Abbildung 94 Monatliche Betriebsstunden der Wärmepumpe, 2015 – 2017

### 16.4.5 Gebäude 5 – EFH

Das Einfamilienhaus wurde 2013 saniert und eine Wärmepumpe als Erzeuger eingebaut. Die Wärmepumpe ist mit einem Eisspeicher und Solar- und Luftabsorbern gekoppelt und versorgt im Gebäude die Raumheizung und das Trinkwarmwasser.

#### Wärmebereitstellung

Abbildung 95 zeigt die Wärmebereitstellung gesplittet in Heizung und Trinkwarmwasser. Dem Gebäude wurden in der Messperiode ~10.500 kWh/a ( $71 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ ) Wärme über die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt.

Die Wärmemenge wurde dem Gebäude zu 75 % über die statische Heizung und zu 25 % über Trinkwarmwasserbereitung zugeführt. (Tabelle 38)

Die Wärmebereitstellung für Heizung und Trinkwarmwasser folgt den Jahreszeiten und Außentemperaturen. In den Sommermonaten wird nur die Trinkwarmwasserbereitung versorgt, Heizenergie fällt nicht an.

Die mittleren monatlichen Vor- und Rücklauftemperaturen sind in Abbildung 96 dargestellt. Die Vorlauftemperaturen liegen für die Raumheizung in Abhängigkeit der Außentemperaturen zwischen 23 und 42,0 °C. Das Trinkwarmwasser wird mit einer Vorlauftemperatur von 44,0 bis 51 °C versorgt.

Tabelle 38 Messdaten der Wärmebereitstellung Heizung und Trinkwarmwasser

	2013 (ab Nov.)	2014	2015 (bis. Sep)
Wärmebereitstellung gesamt [kWh/a]	4.300	10.300	7.270
Wärmebereitstellung Heizung [kWh/a]	3.690	7.730	5.280
spez. Energie Heizung [kWh/( $\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a}$ )]	25,1	52,6	35,9
Wärmebereitstellung TWW [kWh/a]	610	2570	1990
spez. Energie TWW [kWh/( $\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a}$ )]	4,1	17,5	13,5

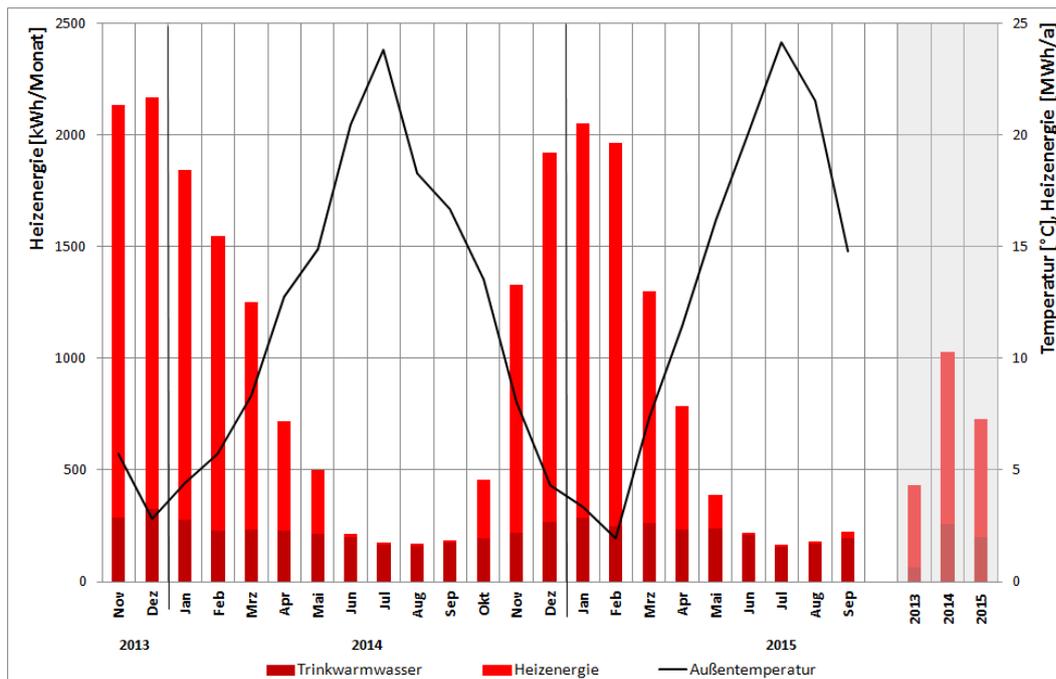


Abbildung 95 Monatlicher Wärmebereitstellung der Wärmepumpe sowie Außentemperatur, 2013 – 2015

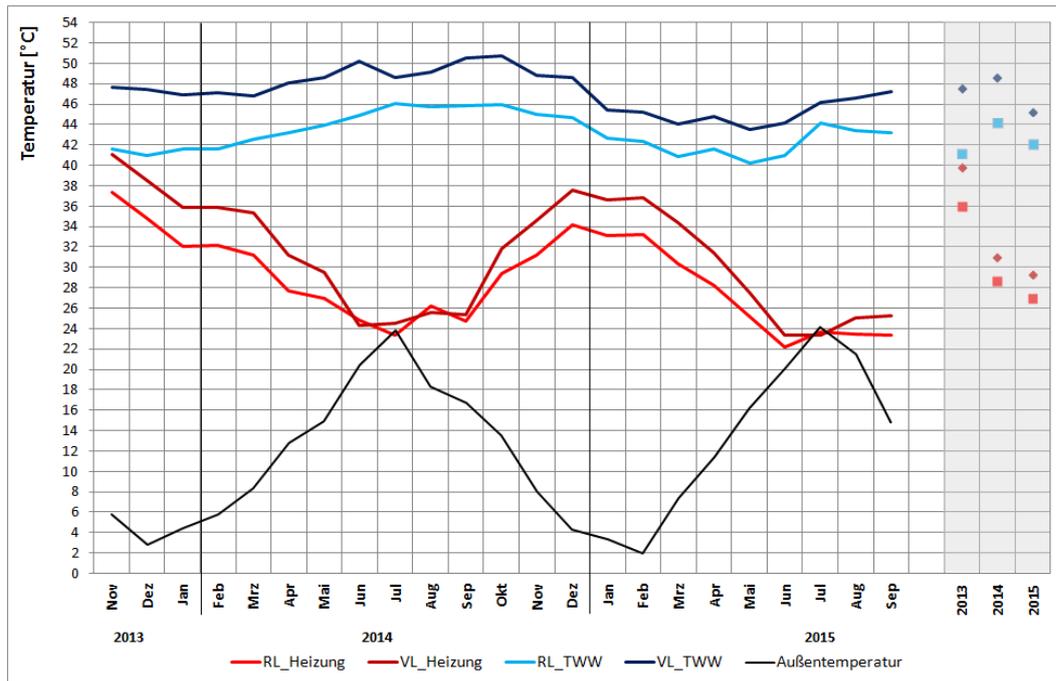


Abbildung 96 Monatsmittel der Vor- und Rücklauftemperaturen für die Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung, 2013 – 2015

### Wärmentzug Quelle

Aufgrund der installierten Messtechnik ist nur eine Erfassung des Gesamtwärmeentzugs aus Eisspeicher und Absorber möglich. Eine Trennung der Übertrager und die Beladung des Eisspeichers kann nicht ausgewertet werden.

Im Messzeitraum wurde über die Wärmeübertrager zusammen im Durchschnitt 8.000 kWh/a Wärme entzogen. (Abbildung 97)

Die mittleren monatlichen Ein- und Austrittstemperaturen der beiden Übertragersysteme sind in Abbildung 98 dargestellt. Anhand der erfassten Fluidtemperaturen kann gezeigt werden, dass die Austrittstemperaturen aus dem Eisspeicher zwischen 2 und 18 °C und beim Luftabsorber zwischen 2 und 27 °C liegt.

Tabelle 39 Messdaten des Wärmentzugs

Wärmeentzug	2013 (ab Nov.)	2014	2015 (bis. Sep)
Entzugsenergie Eisspeicher und Absorber [kWh/a]	2.870	7.840	5.440
mittlere Entzugsleistung Eisspeicher und Absorber [kW]	6,56	5,98	5,65

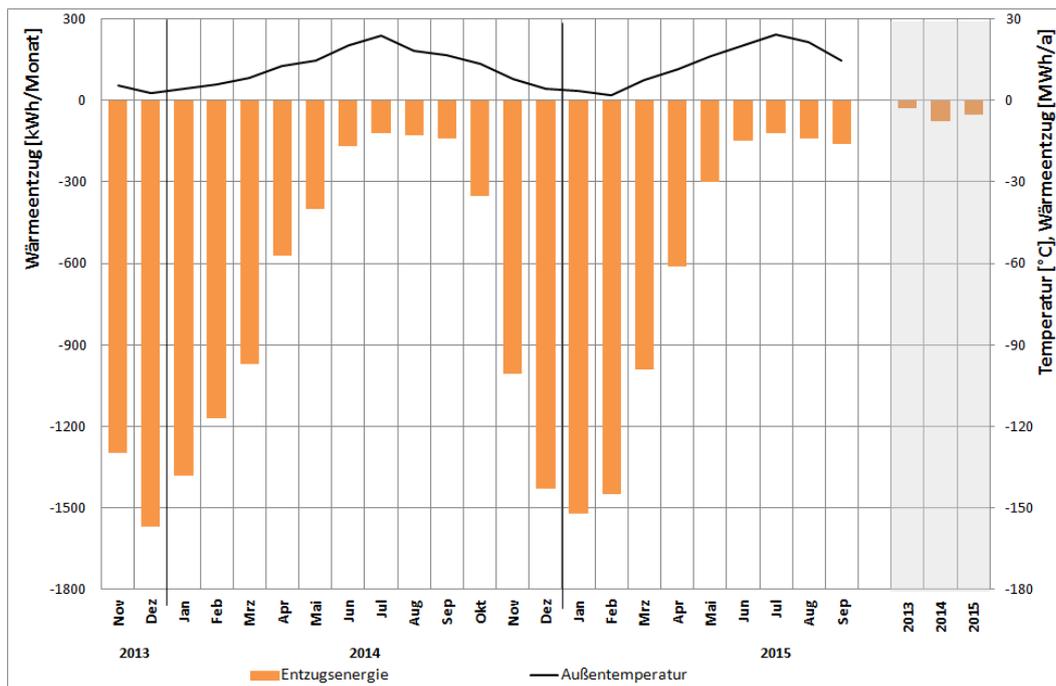


Abbildung 97 Monatlicher Wärmeentzug sowie Außentemperatur, 2013 – 2015

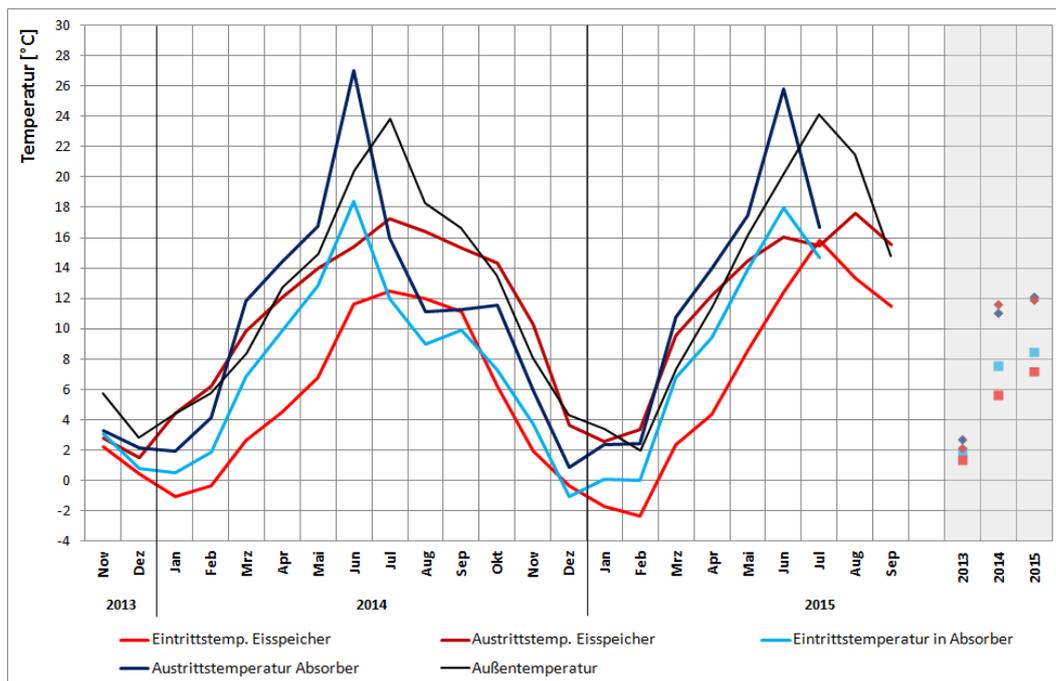


Abbildung 98 Monatsmittel der Ein- und Austrittstemperaturen der Luftabsorber und des Eisspeichers, 2013 – 2015

## Wärmepumpe

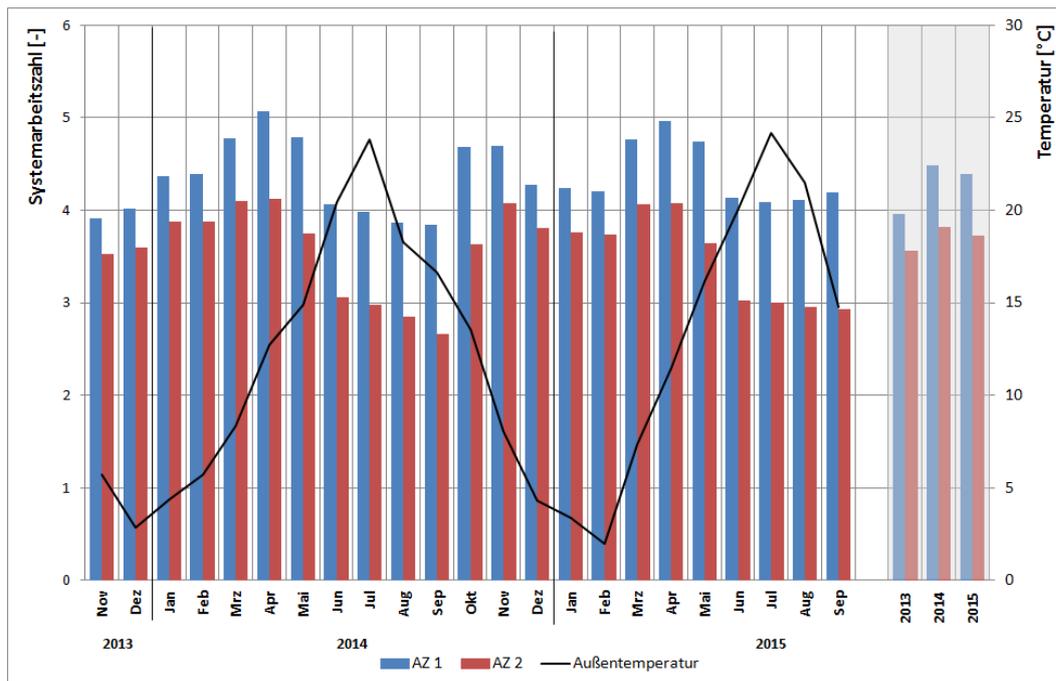
Im Durchschnitt konnte im Messzeitraum eine Jahresarbeitszahl von  $> 4,0$  erzielt werden. Werden die monatlichen Arbeitszahlen der Anlage betrachtet, so ist festzustellen, dass die Wärmepumpe durchgängig im effizienten Bereich arbeiten und die Zielwerte gemäß Datenblatt der Wärmepumpen mit einem gesamt COP von 4,59 annähernd erreicht werden.

Anhand der Betriebsstunden in Abbildung 100 ist festzustellen, dass die Wärmepumpe in den Wintermonaten höhere Betriebsstunden aufzeigt und in den Sommermonaten die Betriebsstunden

durch die alleinige Trinkwarmwasserbereitung entstehen. Anhand der Betriebsstunden sind keine Unstimmigkeiten abzuleiten. Die Anlage läuft ordnungsgemäß.

**Tabelle 40 Messdaten der Wärmepumpe**

	2013 (ab Nov.)	2014	2015 (bis. Sep)
Jahresarbeitszahl AZ1/AZ2	3,96/3,56	4,48/3,82	4,40/3,72
Betriebsstunden (gesamt)	1.200	2.525	1.864,5



**Abbildung 99 Monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpe, 2013 – 2015**

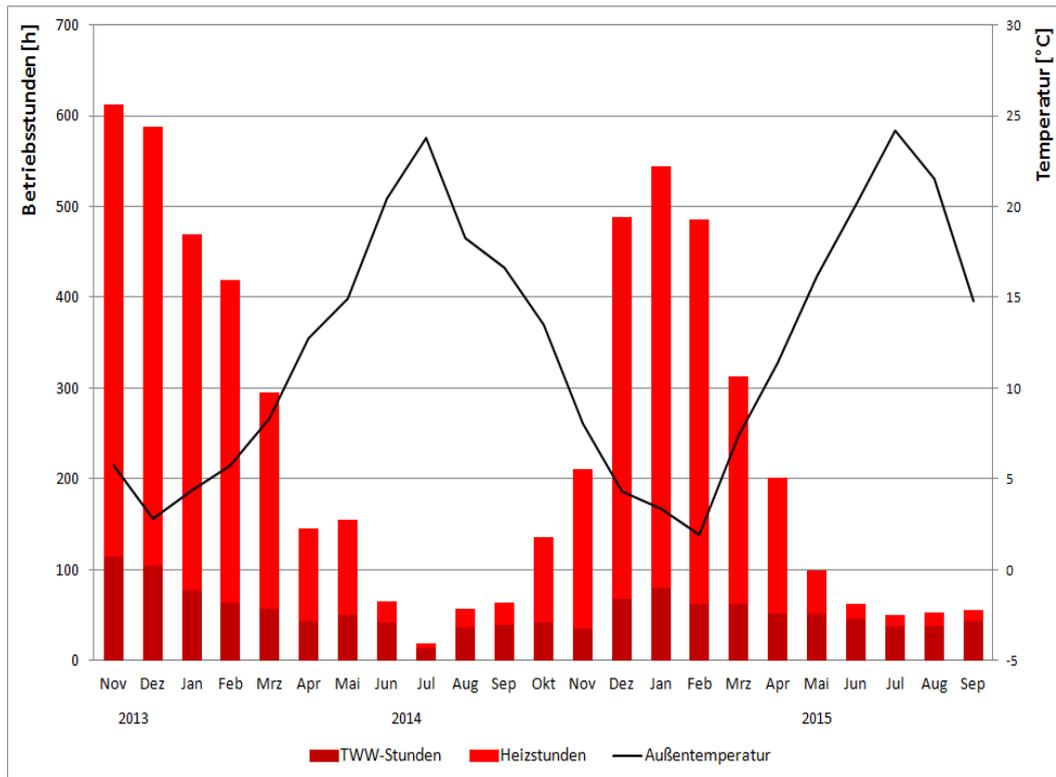


Abbildung 100 Monatliche Betriebsstunden der Wärmepumpe, 2013 – 2015

### 16.4.6 Gebäude 6 – MFH

Die benötigte Energie für Brauchwasser und Heizung wird in dem Mehrfamilienhaus mit Wohn- und Gewerbefläche über Erdwärmesonden, die an eine Wärmepumpe gekoppelt sind, bereit gestellt.

#### Wärmebereitstellung

Abbildung 101 zeigt die Wärmebereitstellung gesplittet in Heizung und Trinkwarmwasser. Dem Gebäude wurden in der Messperiode  $\sim 140.000$  kWh/a ( $70 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ ) Wärme über die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt.

Die Wärmemenge wurde dem Gebäude zu 80 % über die statische Heizung und zu 20% über Trinkwarmwasserbereitung zugeführt. (Tabelle 41)

In den Sommermonaten wird nur die Trinkwarmwasserbereitung versorgt, Heizenergie fällt in geringen Mengen an.

Die mittleren monatlichen Vor- und Rücklauftemperaturen sind in Abbildung 102 dargestellt. Die mittleren Vorlauftemperaturen liegen für die Raumheizung in Abhängigkeit der Außentemperaturen zwischen 26 und 34 °C. Das Trinkwarmwasser wird mit einer Vorlauftemperatur von 32 bis 42 °C versorgt.

Tabelle 41 Messdaten der Wärmebereitstellung Heizung und Trinkwarmwasser

	2015 (ab Feb.)	2016	2017 (bis Nov.)
Wärmebereitstellung gesamt [kWh/a]	116.610	151.040	120.440
Wärmebereitstellung Heizung [kWh/a]	91.910	122.340	95.840
spez. Energie Heizung [kWh]/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)	45,96	61,17	47,92
Wärmebereitstellung TWW [kWh/a]	24.700	28.700	24.600
spez. Energie TWW [kWh]/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)	12,35	14,35	12,30

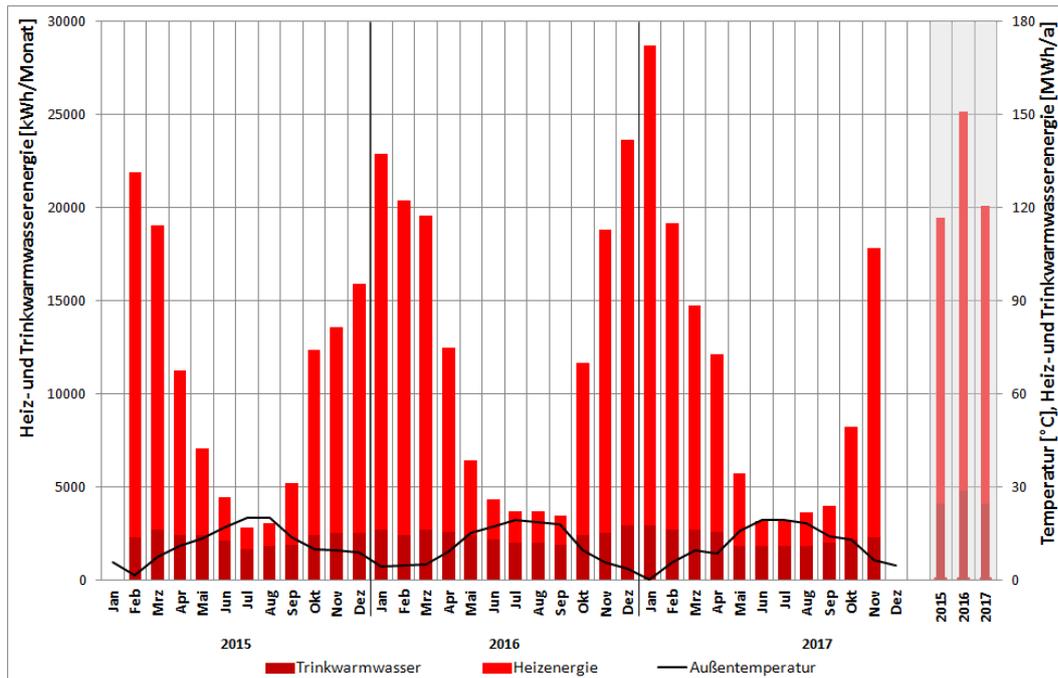


Abbildung 101 Monatlicher Wärmebereitstellung der Wärmepumpe (geothermischer Anteil) sowie Außentemperatur, 2015 – 2017

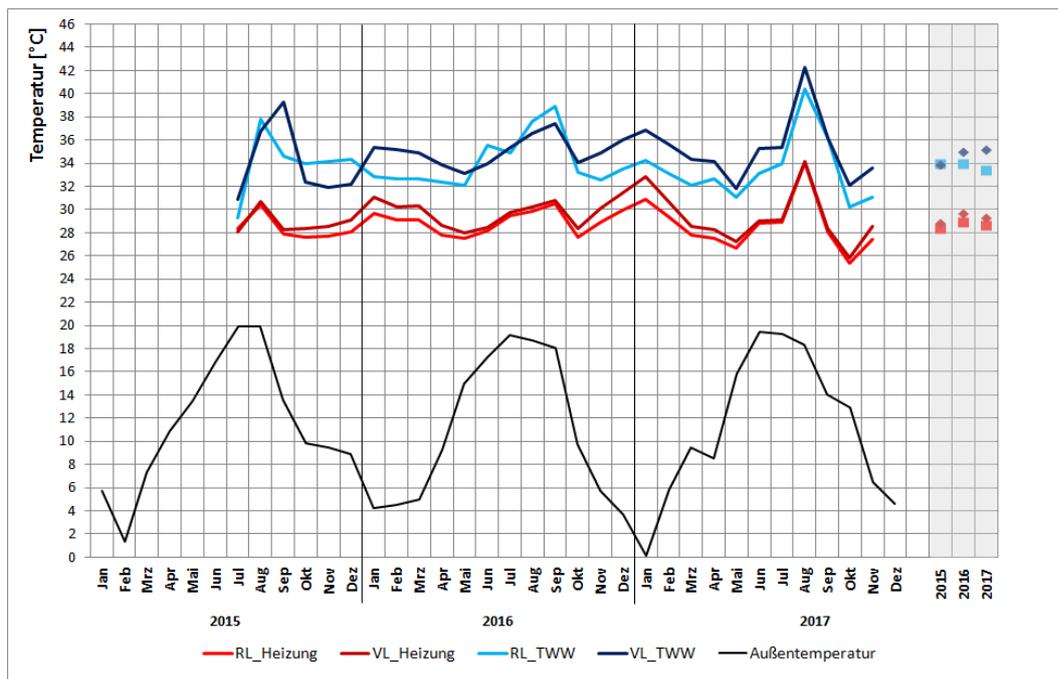


Abbildung 102 Monatsmittel der Vor- und Rücklauftemperaturen für die Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung, 2015 – 2017

### Wärmentzug Quelle

Im Messzeitraum wurde über die Erdwärmesonden im Durchschnitt 90.000 kWh/a (94 kWh/(m-a)) Wärme dem Erdreich entzogen. (Abbildung 103)

Die mittleren monatlichen Ein- und Austrittstemperaturen sind in Abbildung 104 dargestellt. Anhand der erfassten Fluidtemperaturen kann ein normaler Temperaturverlauf zwischen Wärmentzug und Regeneration festgestellt werden. Das Temperaturniveau im Austritt liegt zwischen 6 und 14 °C.

Tabelle 42 Messdaten des Wärmezugs

	2015 (ab Feb.)	2016	2017 (bis Nov.)
Entzugsenergie [kWh/a]	77.560	99.960	77.580
spez. Entzugsenergie [kWh/(m·a)]	80,79	104,13	80,81
spez. mittlere Entzugsleistung [W/m]	1,44	11,03	12,03

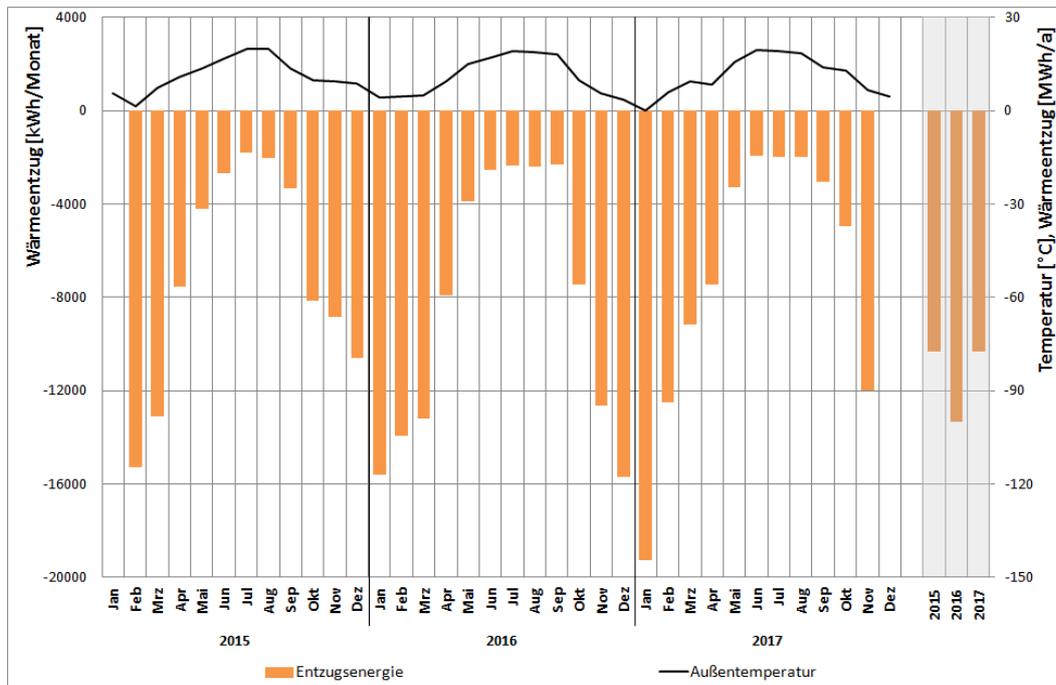


Abbildung 103 Monatlicher Wärmeentzug sowie Außentemperatur, 2015 – 2017

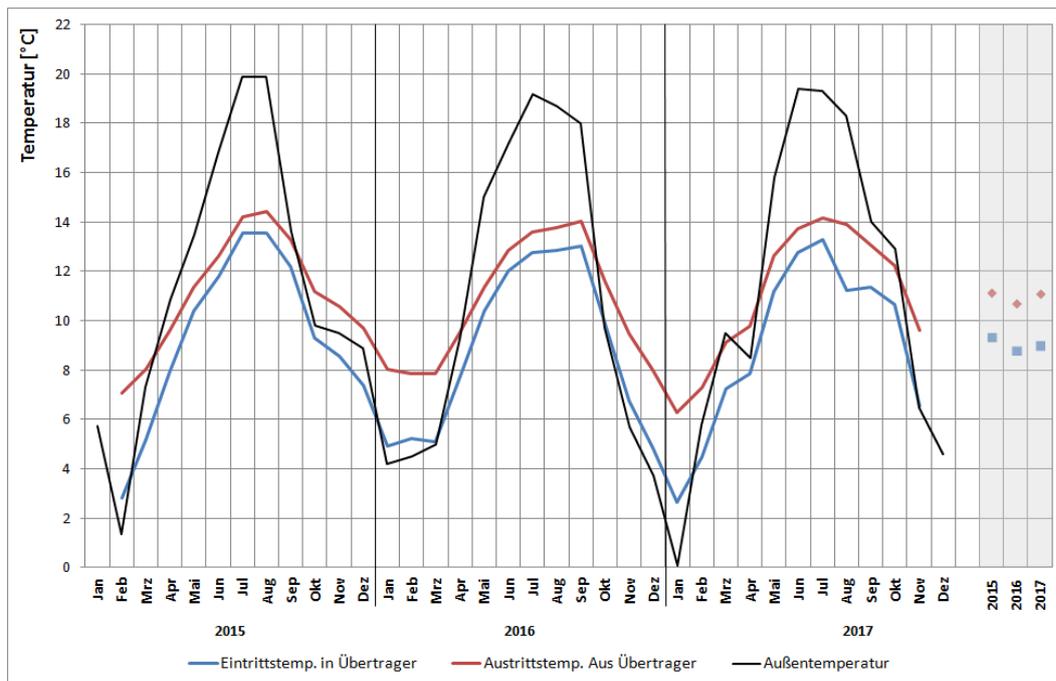


Abbildung 104 Monatsmittel der Ein- und Austrittstemperaturen der Erdwärmesonden, 2015 – 2017

## Wärmepumpe

Im Durchschnitt konnte im Messzeitraum eine Jahresarbeitszahl für von  $\sim 3,8$  erzielt werden. Werden die monatlichen Arbeitszahlen der Anlage betrachtet, so ist festzustellen, dass die Wärmepumpe durchgängig im effizienten Bereich arbeitet und die Zielwerte gemäß Datenblatt der Wärmepumpen mit einem gesamt COP von 4,4 annähernd erreicht werden. Es ist zu berücksichtigen, dass der COP auf den Betriebspunkt Soleeintritt  $0^{\circ}\text{C}$  und Vorlauf-Gebäude  $35^{\circ}\text{C}$  ausgelegt ist. Abweichungen von der Soleeintrittstemperatur oder der Vorlauftemperatur können sich höhere oder geringere JAZ ergeben.

Anhand der Betriebsstunden in Abbildung 106 ist festzustellen, dass die Wärmepumpe kontinuierlich durchläuft und selbst in den Sommermonaten, bei reinem Trinkwarmwasserbedarf, hohe Betriebsstunden aufweist. Es wird empfohlen, hier genauer auf die Regelung und eingestellten Sollwerte zu achten sowie die Pufferspeicherdimensionierung zu kontrollieren.

Tabelle 43 Messdaten der Wärmepumpe

	2015 (ab Feb.)	2016	2017 (bis Nov.)
Jahresarbeitszahl	5,27	3,75	3,69
Betriebsstunden (gesamt)	7189	8803	8061

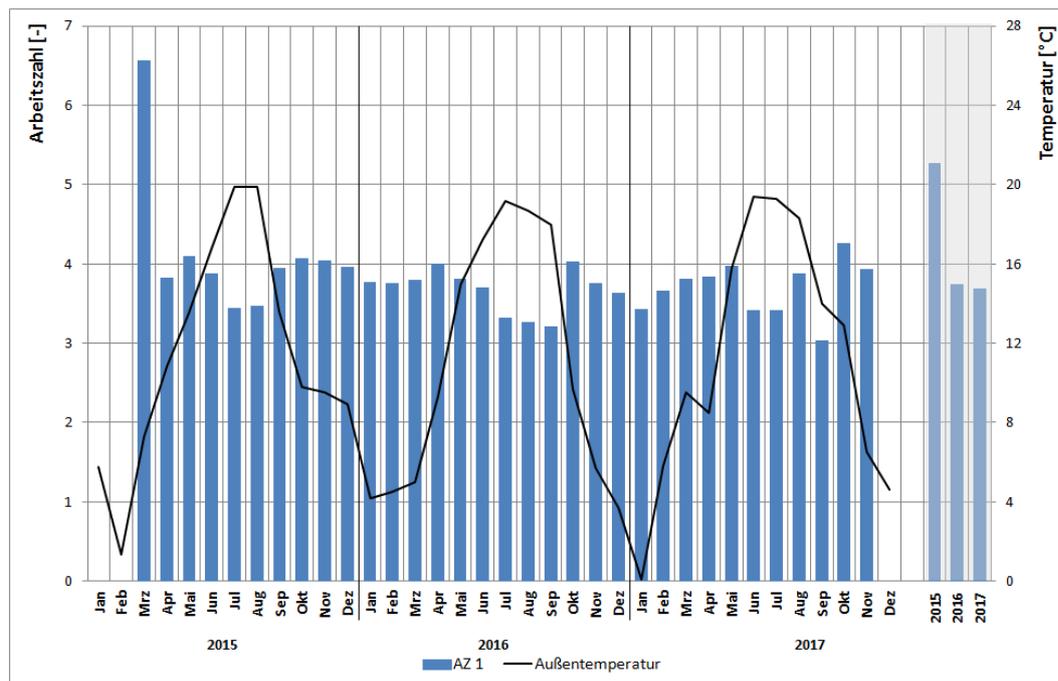


Abbildung 105 Monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpe, 2015 – 2017

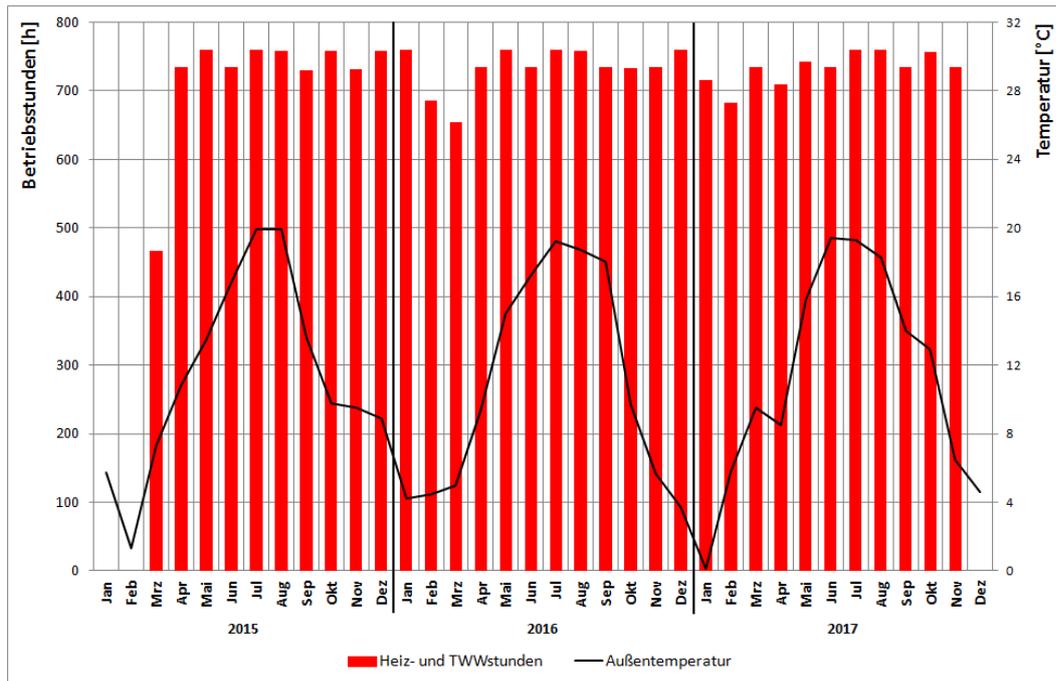


Abbildung 106 Monatsliche Betriebsstunden der Wärmepumpe, 2015 – 2017

### 16.4.7 Gebäude 7 – MFH

Das Mehrfamilienhaus nutzt eine Wärmepumpe, die einen Eisspeicher und einen Solar- und Luftabsorber als Energiequellen als Quelle verwendet. Die Wärmepumpe versorgt die Raumlufttechnik genauso wie die Raumheizung und die Trinkwarmwasserbereitung. Der Eisspeicher wird im Sommer zur passiven Kühlung verwendet.

#### Wärmebereitstellung

Abbildung 107 zeigt die Wärmebereitstellung gesplittet in Heizung und Trinkwarmwasser. Dem Gebäude wurden in der Messperiode  $\sim 105.000$  kWh/a ( $65,7$  kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>·a)) Wärme über die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt. (Tabelle 44)

In den Sommermonaten geht die Wärmebereitstellung zurück, da hier nur noch die Trinkwarmwasserbereitung versorgt werden muss.

Die mittleren monatlichen Vor- und Rücklauftemperaturen sind in Abbildung 108 dargestellt. Die Vorlauftemperaturen liegen für die Raumheizung- und Trinkwarmwasserbereitung in Abhängigkeit der Außentemperaturen zwischen 34 und 59 °C.

Tabelle 44 Messdaten der Wärmebereitstellung Heizung und Trinkwarmwasser und passive Kühlung

	2015 (ab Nov.)	2016	2017	2018 (bis Juli)
Wärmebereitstellung HZG und TWW [kWh/a]	72.370	116.690	93.670	60.470
spez. Energie HZG und TWW [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	45,26	72,98	58,58	37,82
Kältebereitstellung Eisspeicher [kWh/a]	0	9.500	7.430	5.590

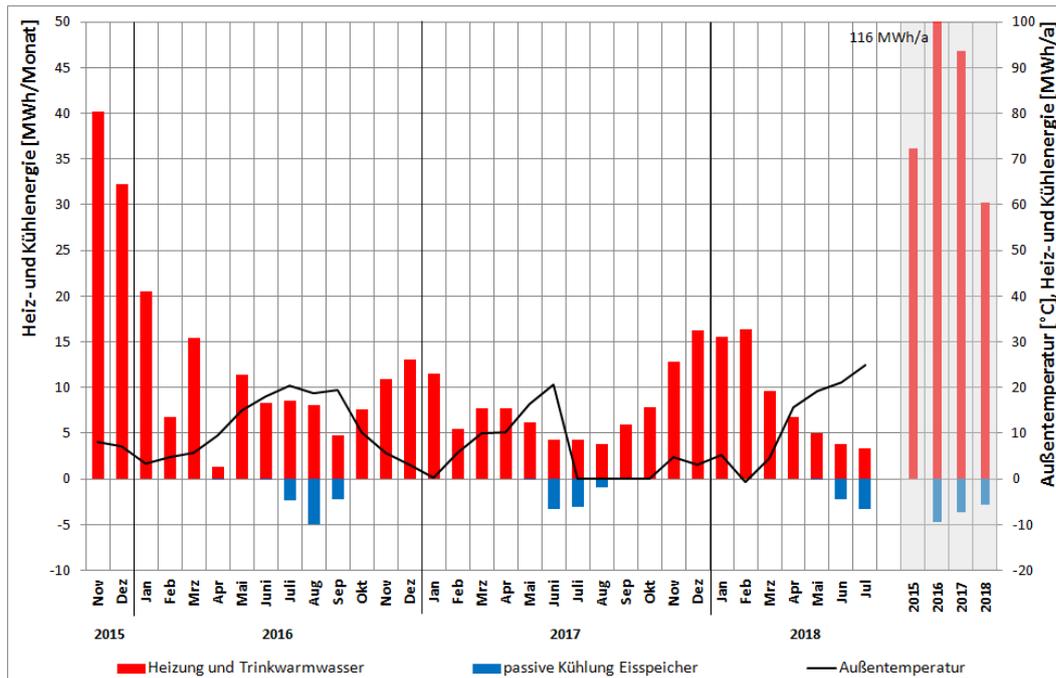


Abbildung 107 Monatlicher Wärmebereitstellung der Wärmepumpe sowie passive Kühlung durch den Eisspeicher und Außentemperatur, 2015 – 2018

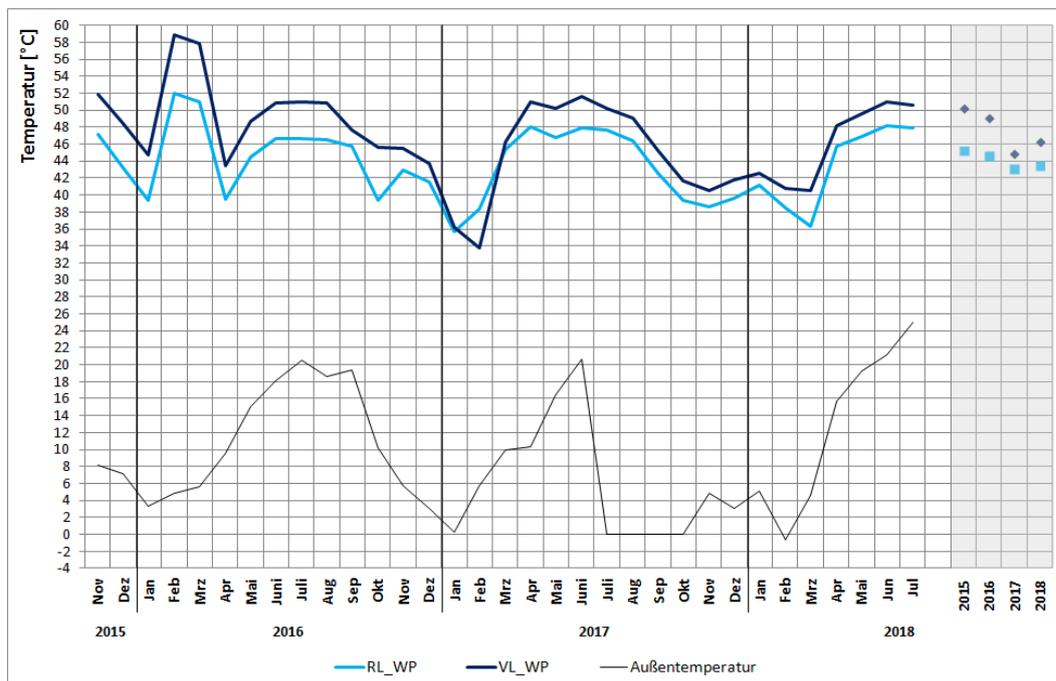


Abbildung 108 Monatsmittel der Vor- und Rücklauftemperaturen für die Wärmepumpe, 2015 – 2018

### Wärmeentzug Quelle

Im Messzeitraum wurde dem Eisspeicher im Durchschnitt 40.000 kWh/a (408 kWh/(m<sup>3</sup>·a)) und den Luftabsorbern > 25.000 kWh/a (294 kWh/(m<sup>2</sup>·a)) Wärme entzogen. (Abbildung 109)

Die mittleren monatlichen Ein- und Austrittstemperaturen der beiden Übertragungssysteme sind in Abbildung 110 dargestellt. Anhand der erfassten Fluidtemperaturen kann beim Eisspeicher ein Entzugstemperaturniveau von -5 bis 18 °C und bei den Luftabsorbern von -5 bis 28 °C erfasst werden.

Tabelle 45 Messdaten des Wärmentszugs

	2015 (ab Nov.)	2016	2017	2018 (bis Juli)
Entzugsenergie Eisspeicher [kWh/a]	35.220	47.800	31.610	16.600
spez. Entzugsenergie Eisspeicher an WP [kWh/(m <sup>3</sup> ·a)]	359,38	487,75	322,57	169,38
spez. mittlere Entzugsleistung Eisspeicher [W/m <sup>3</sup> ]	270,8	167	109,5	78,5
Entzugsenergie Absorber [kWh/a]	0	5.030	27.500	23.340
spez. Entzugsenergie Absorber [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	0	59,16	323,54	274,59
spez. mittlere Entzugsleistung Absorber [W/m <sup>2</sup> ]	3,18	37,6	100,2	28,1

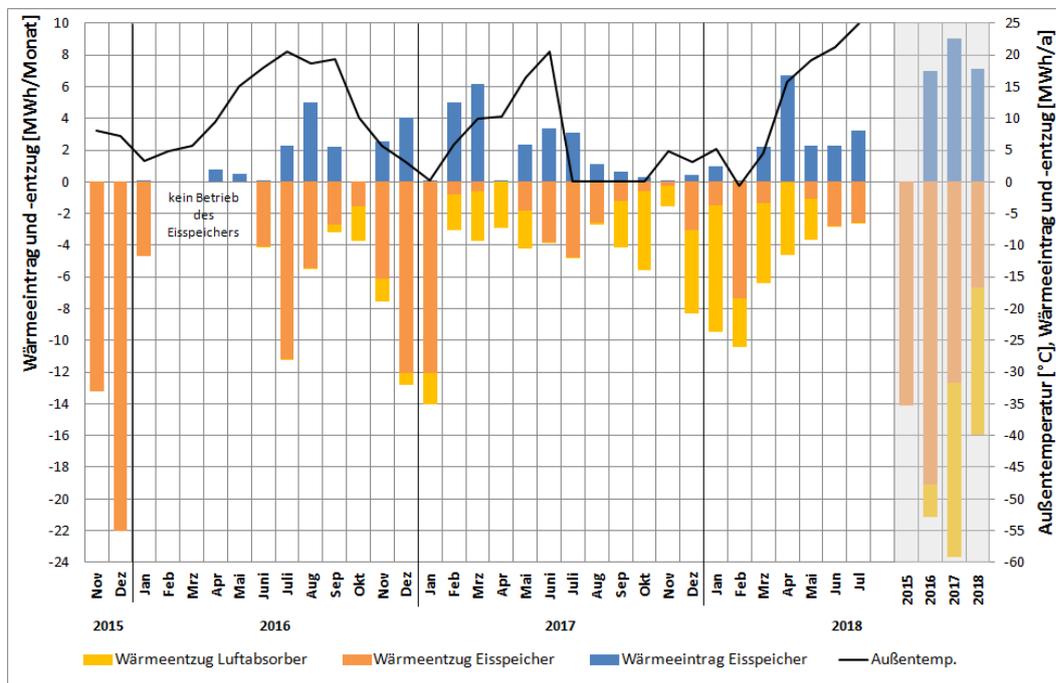


Abbildung 109 Monatlicher Wärmeentzug und Wärmeeintrag sowie Außentemperatur, 2015 – 2018

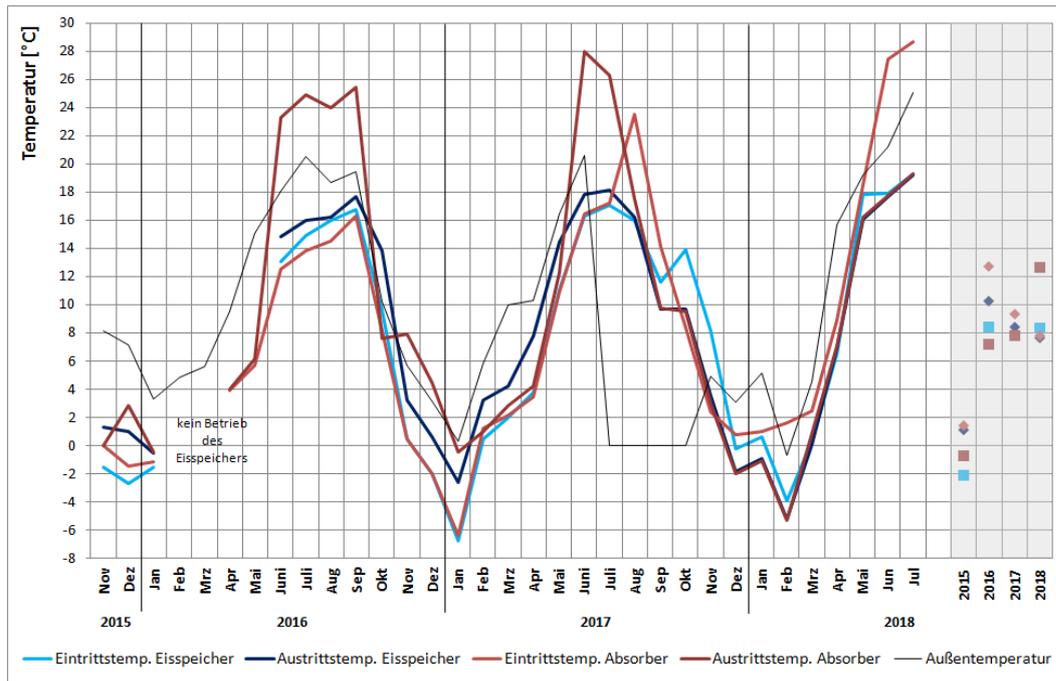


Abbildung 110: Monatsmittel der Ein- und Austrittstemperaturen der Luftabsorber und des Eisspeichers, 2015 – 2018

## Wärmepumpe

Im Durchschnitt konnte im Messzeitraum nur eine Jahresarbeitszahl für von rund 2,0 erzielt werden. Die Zielwerte gemäß Datenblatt der Wärmepumpen mit einem gesamt COP von 4,49 werden nicht erreicht. Die Gründe für die niedrige Arbeitszahl liegen darin, dass zum einen hauptsächlich der Eisspeicher als Quelle für die Wärmepumpe fungiert und dieser nur niedrige Quelltemperaturen liefert. Zum anderen liegt auf der Gebäudeseite eine hohe Dauerlast durch die Trinkwarmwasserbereitung an (Zirkulationsverluste).

Anhand der Betriebsstunden in Abbildung 112 ist festzustellen, dass die Betriebsstunden der Wärmepumpe in den Sommermonaten sinken, da in dieser Zeit allein die Trinkwarmwasserbereitung ansteht.

Tabelle 46 Messdaten der Wärmepumpe

	2015 (ab Nov.)	2016	2017	2018 (bis Juli)
Jahresarbeitszahl	5,56	2,76	2,24	2,16
Betriebsstunden (gesamt)	1.286	4.960	7.382	2.308

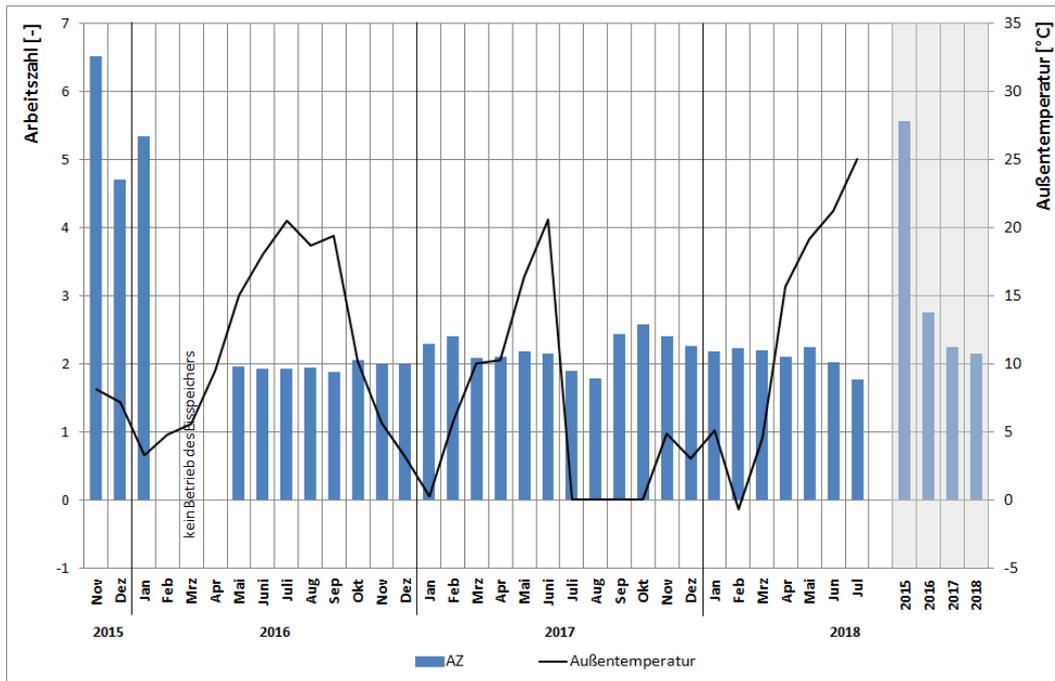


Abbildung 111 Monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpe, 2015 – 2018

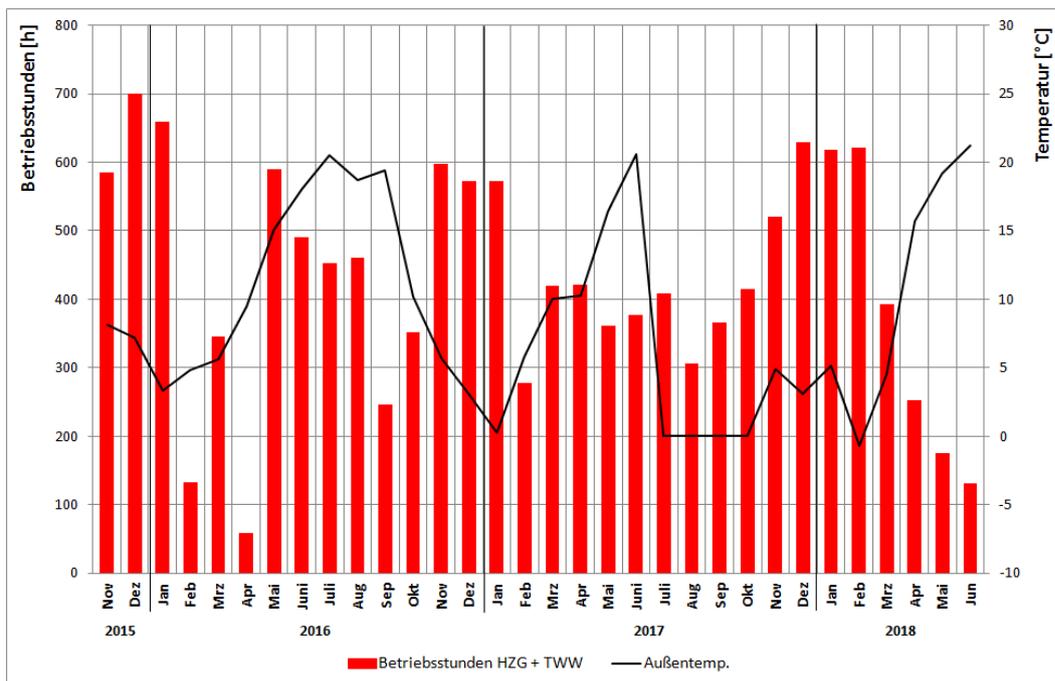


Abbildung 112 Monatliche Betriebsstunden der Wärmepumpe, 2015 – 2018

### 16.4.8 Gebäude 8 – MFH

Das Mehrfamilienhaus hat neben den einer Luft-Wasser-Wärmepumpe auch noch einen Gasbrennwertkessel zur Wärmebereitstellung. Die Wärme wird im Gebäude über eine Fußbodenheizung und dem Trinkwarmwasser verteilt.

## Wärmebereitstellung

Abbildung 113 zeigt die Wärmebereitstellung gesplittet in Heizung und Trinkwarmwasser. Dem Gebäude wurden in der Messperiode  $\sim 42.000 \text{ kWh/a}$  ( $36,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a})$ ) Wärme über die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt.

Die Wärmemenge wurde dem Gebäude zu 45 % über die Fußbodenheizung und zu 55 % über Trinkwarmwasserbereitung zugeführt. (Tabelle 47)

In den Sommermonaten wird vorrangig die Trinkwarmwasserbereitung versorgt, Heizenergie fällt in geringen Mengen an.

Die mittleren monatlichen Vor- und Rücklauftemperaturen sind in Abbildung 102 dargestellt. Die mittleren Vorlauftemperaturen liegen in Abhängigkeit der Außentemperaturen zwischen 46 und 56 °C.

Tabelle 47 Messdaten der Wärmebereitstellung Heizung und Trinkwarmwasser

	2016 (ab Okt.)	2017	2018 (bis Juli)
Wärmebereitstellung gesamt [kWh/a]	28.220	41.070	22.420
Wärmebereitstellung Heizung [kWh/a]	25.490	18.280	8.250
spez. Energie Heizung [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	22,4	16,0	7,2
Wärmebereitstellung TWW [kWh/a]	2.730	22.790	14.180
spez. Energie TWW [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	2,4	20,0	12,4

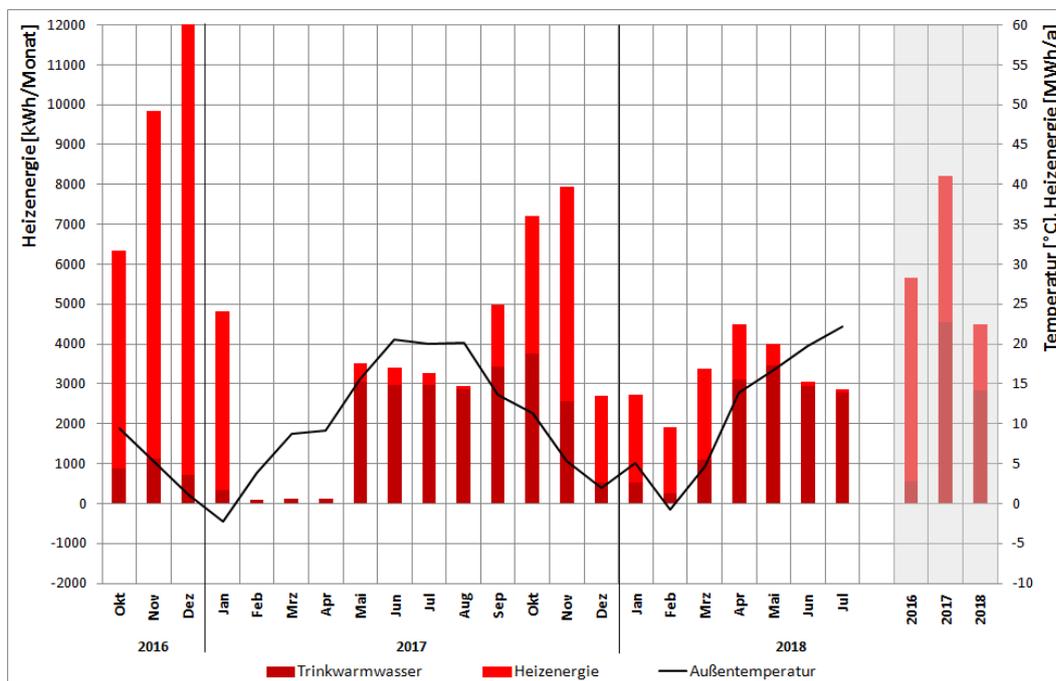


Abbildung 113 Monatlicher Wärmebereitstellung der Wärmepumpe sowie Außentemperatur, 2016 – 2018

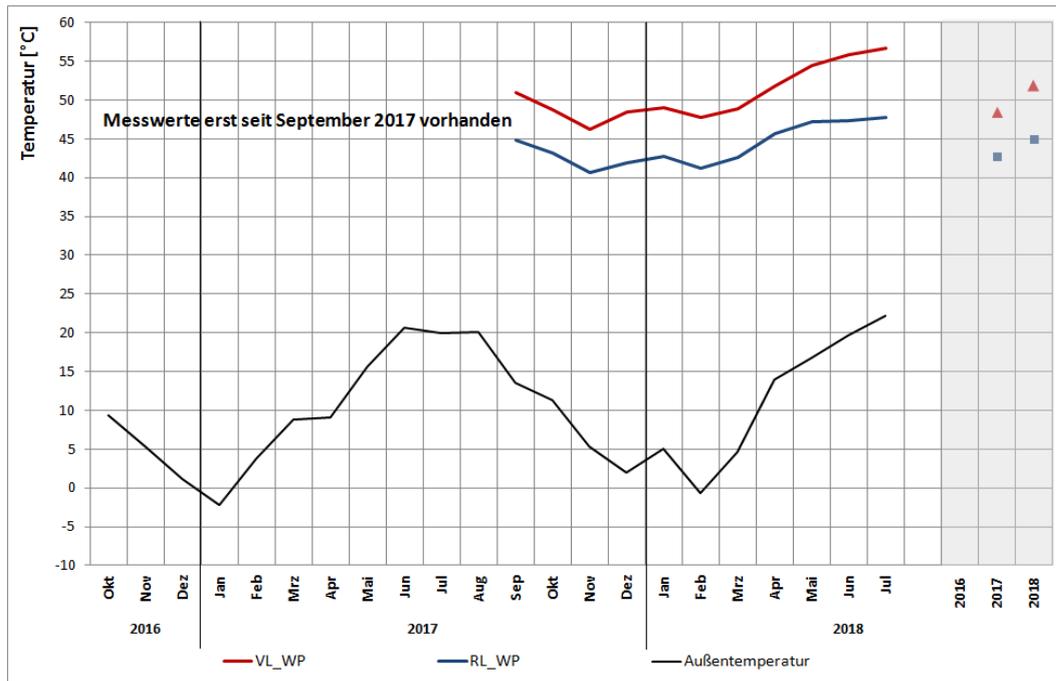


Abbildung 114 Monatsmittel der Vor- und Rücklauftemperaturen für die Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung, 2016 – 2018

## Wärmepumpe

Im Durchschnitt konnte im Messzeitraum eine Jahresarbeitszahl für von > 2,6 erzielt werden. Werden die monatlichen Arbeitszahlen der Anlage betrachtet, so ist festzustellen, dass die Wärmepumpe durchgängig gleichbleibende Arbeitszahlen liefert. Der Zielwert gemäß Datenblatt der Wärmepumpe mit einem gesamt COP von 3,14 wird nicht erreicht. Es ist zu berücksichtigen, dass der COP auf den Betriebspunkt Außenluft -7 °C und Vorlauftemperatur 35°C ausgelegt ist. Abweichungen zu einer höheren Vorlauftemperatur können geringere JAZ ergeben.

Anhand der Betriebsstunden in Abbildung 116 ist festzustellen, dass die Wärmepumpe in der Heizperiode viele Betriebsstunden aufweist und zum Sommer weniger in Betrieb ist. In den Sommermonaten wird nur die Trinkwarmwasserbereitung bedient.

Tabelle 48 Messdaten der Wärmepumpe

	2016 (ab Okt.)	2017	2018 (bis Juli)
Jahresarbeitszahl	2,72	2,65	2,63
Betriebsstunden (gesamt)	keine Werte	2.468	3.475

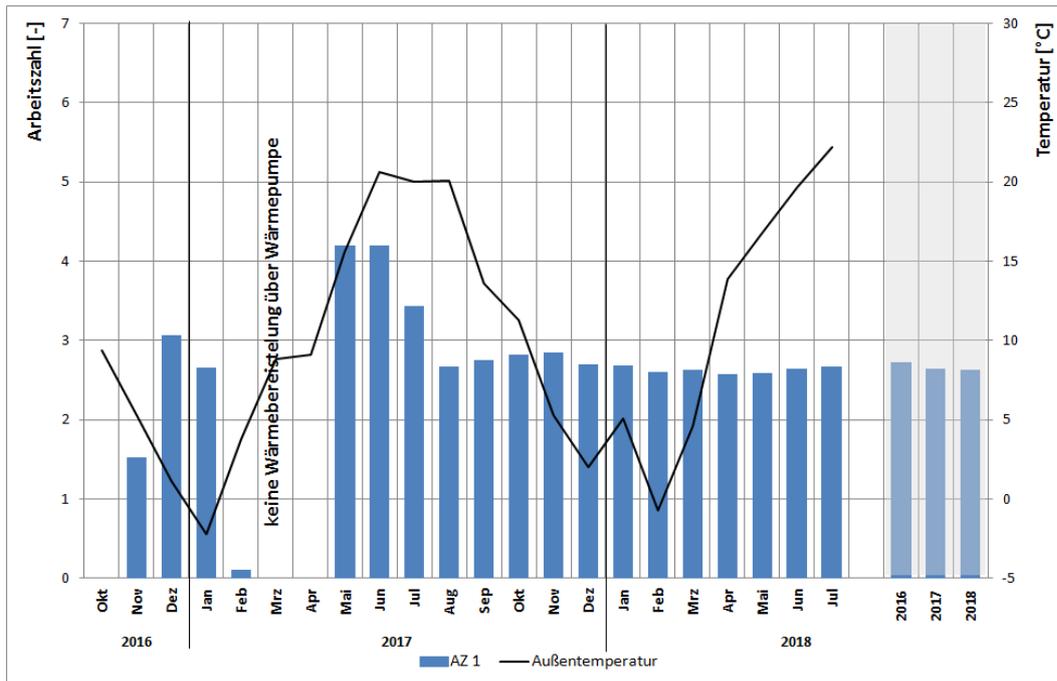


Abbildung 115 Monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpe, 2016 – 2018

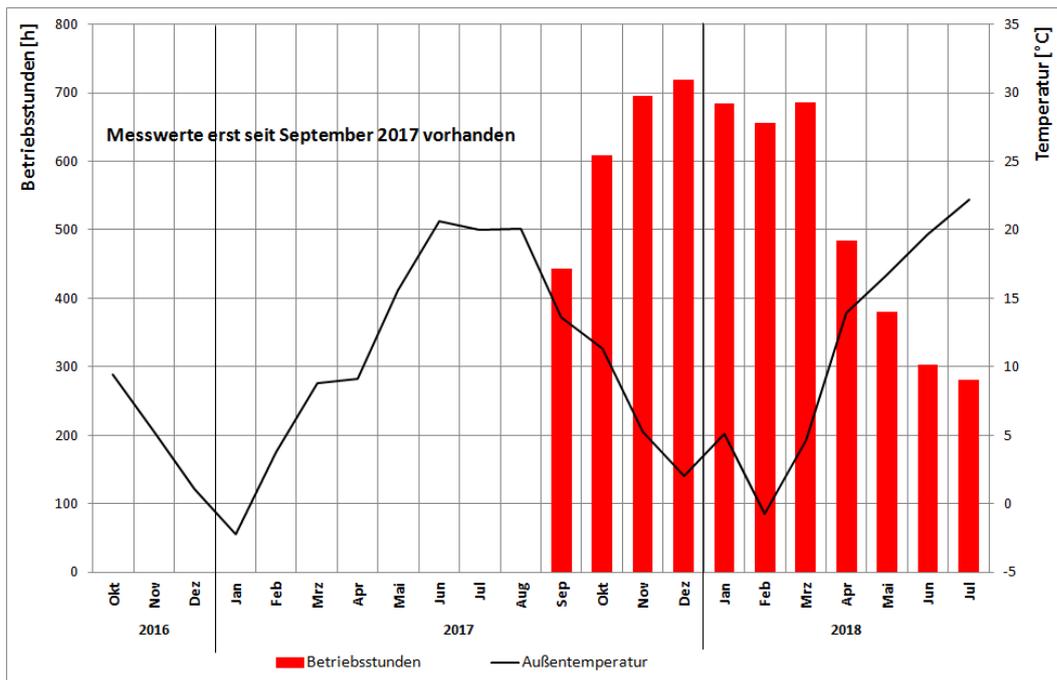


Abbildung 116 Monatliche Betriebsstunden der Wärmepumpe, 2016 – 2018

### 16.4.9 Gebäude 9 – MFH

Das Mehrfamilienhaus hat ist mit einer Wärmepumpe ausgestattet, die mit acht Erdwärmesonden à 100 m gekoppelt wurde. Die Wärme wird im Gebäude über eine Fußbodenheizung und dem Trinkwarmwasser verteilt.

#### Wärmebereitstellung

Abbildung 117 zeigt die Wärmebereitstellung gesplittet in Heizung und Trinkwarmwasser. Dem Gebäude wurden in der Messperiode rund 125.000 kWh/a ( $109,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ ) Wärme über die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt.

Die Wärmemenge wurde dem Gebäude zu 70 % über die Fußbodenheizung und zu 30% über die Trinkwarmwasserbereitung zugeführt. (Tabelle 49)

In den Sommermonaten wird nur die Trinkwarmwasserbereitung versorgt, Heizenergie fällt in geringen Mengen an.

Die mittleren monatlichen Vor- und Rücklauftemperaturen sind in Abbildung 118 dargestellt. Die mittleren Vorlauftemperaturen liegen für die Raumheizung in Abhängigkeit der Außentemperaturen zwischen 33 und 45 °C. Das Trinkwarmwasser wird mit einer Vorlauftemperatur von 47 bis 52 °C versorgt.

Tabelle 49 Messdaten der Wärmebereitstellung Heizung und Trinkwarmwasser

	2016 (ab Sep.)	2017	2018 (bis Juli)
Wärmebereitstellung gesamt [kWh/a]	25.410	130.330	62.970
Wärmebereitstellung Heizung [kWh/a]	17.790	92.570	42.740
spez. Energie Heizung [ $\text{kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ ]	15,6	81,2	37,5
Wärmebereitstellung TWW [kWh/a]	7.620	37.750	20.230
spez. Energie TWW [ $\text{kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ ]	6,7	33,1	17,7

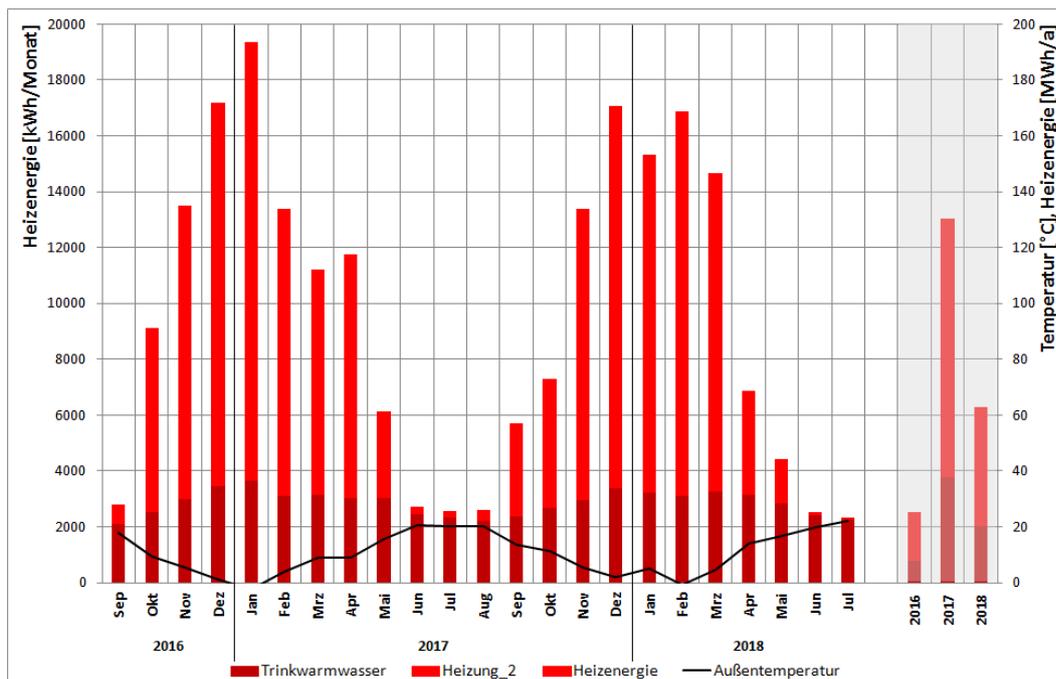


Abbildung 117 Monatlicher Wärmebereitstellung der Wärmepumpe (geothermischer Anteil) sowie Außentemperatur, 2016 – 2018

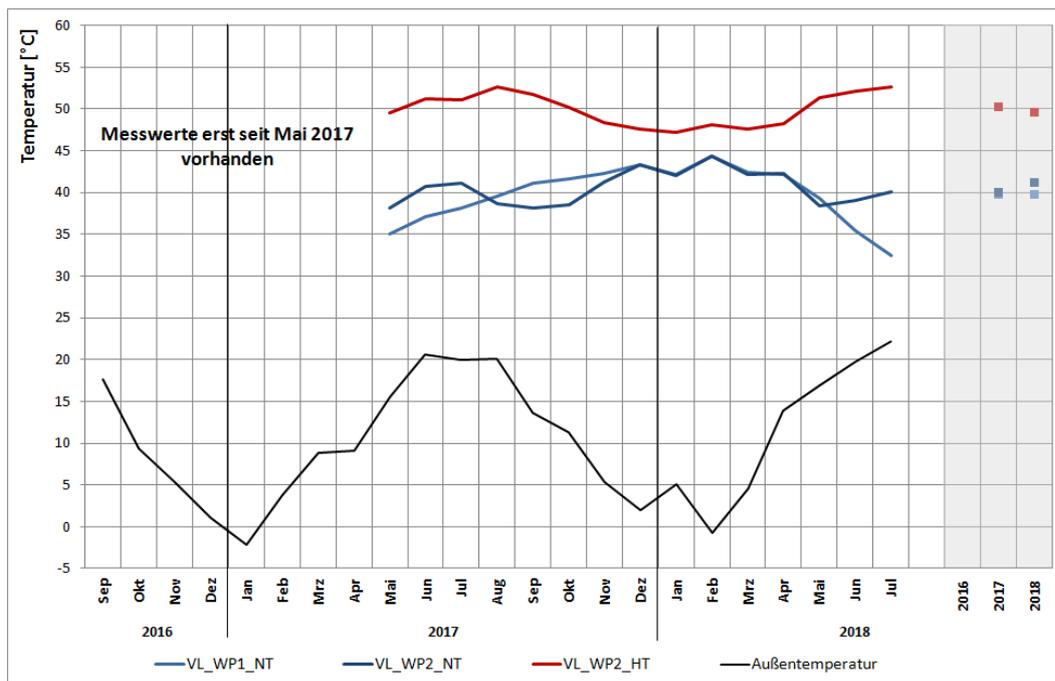


Abbildung 118 Monatsmittel der Vor- und Rücklauftemperaturen für die Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung, 2016 – 2018

### Wärmentzug Quelle

Im Messzeitraum wurde über die Erdwärmesonden im Durchschnitt 140.000 kWh/a (175 kWh/(m·a)) Wärme dem Erdreich entzogen. (Abbildung 119)

Die mittleren monatlichen Ein- und Austrittstemperaturen sind in Abbildung 120 dargestellt. Anhand der erfassten Fluidtemperaturen kann ein üblicher Temperaturverlauf zwischen Wärmentzug und Regeneration festgestellt werden. Das Temperaturniveau im Austritt liegt zwischen 6 und 15 °C.

Tabelle 50 Messdaten des Wärmentzugs

	2016 (ab Sep.)	2017	2018 (bis Juli)
Entzugsenergie [kWh/a]	38.580	143.740	98.860
spez. Entzugsenergie [kWh/(m·a)]	48,2	179,7	123,6

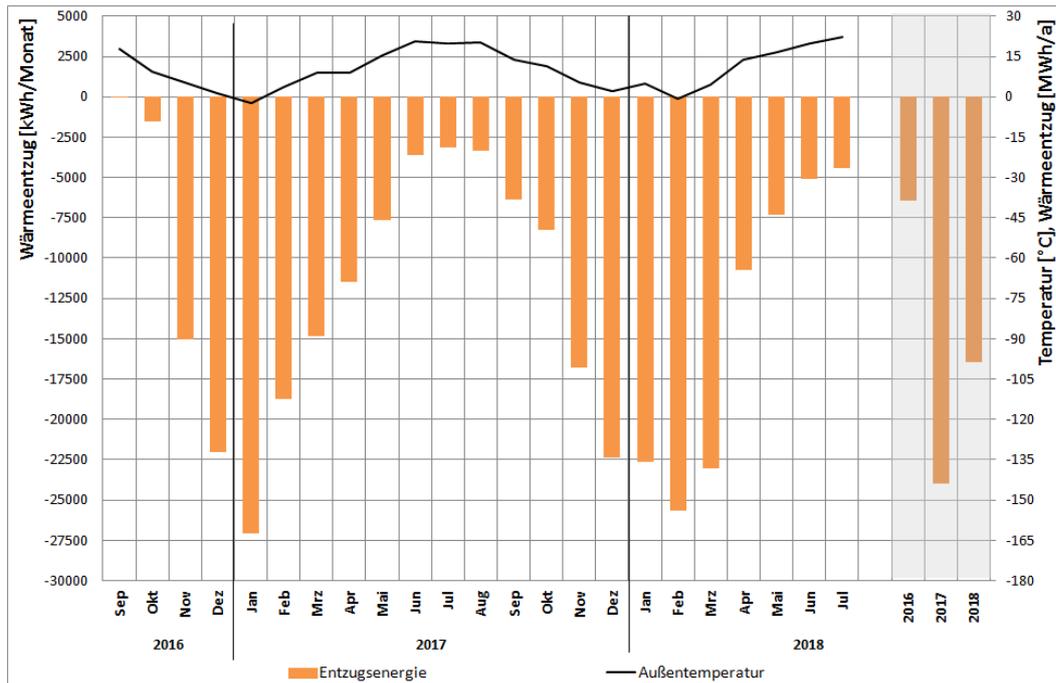


Abbildung 119 Monatlicher Wärmeentzug sowie Außentemperatur, 2016 – 2018

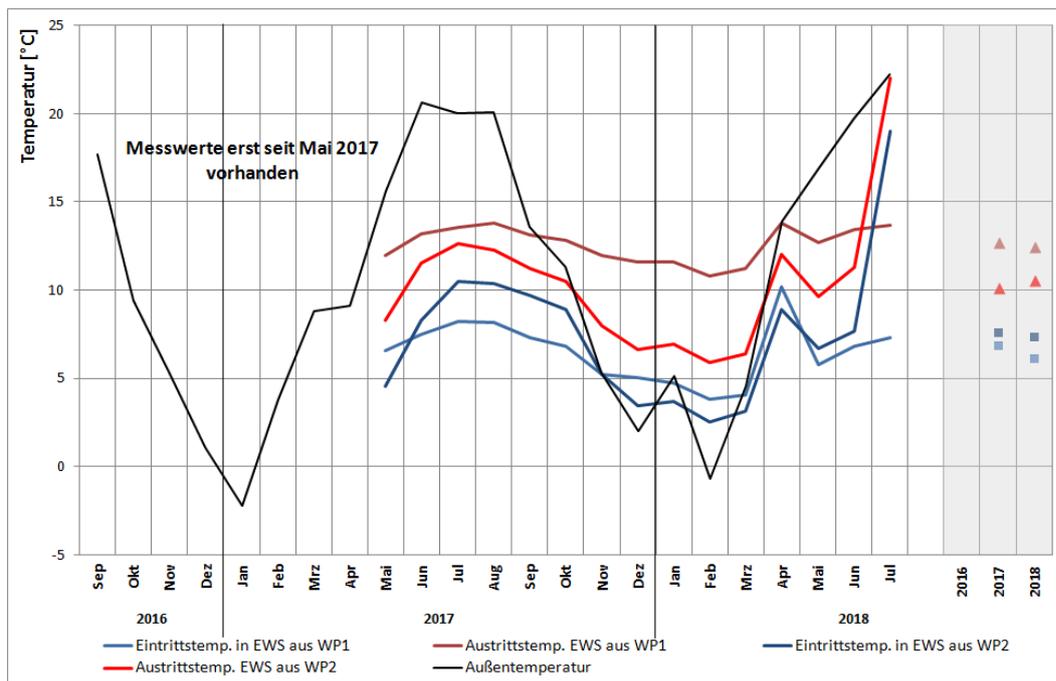


Abbildung 120 Monatsmittel der Ein- und Austrittstemperaturen der Erdwärmesonden, 2016 – 2018

## Wärmepumpe

Im Durchschnitt konnte im Messzeitraum eine Jahresarbeitszahl für von 3 bis 5 erzielt werden. Werden die monatlichen Arbeitszahlen der Anlage betrachtet, so ist festzustellen, dass die Wärmepumpe WP2 geringere Arbeitszahlen aufweist als die WP1, dies ist bedingt durch die Versorgung der Trinkwarmwasserbereitung und dem höheren Temperaturniveau. Die Zielwerte gemäß Datenblättern der Wärmepumpen von einem COP von 4,85 bzw. 4,34 werden von der WP1 erreicht. WP2 liegt unterhalb des COP aufgrund der höheren Vorlauftemperaturen für die Trinkwarmwasserbereitung.

Anhand der Betriebsstunden in Abbildung 122 ist festzustellen, dass die Wärmepumpen in den Sommermonaten die Trinkwarmwasserbereitung versorgen und in den Wintermonaten höhere Betriebsstunden aufzeigen durch die Versorgung der Fußbodenheizung. Anhand der Betriebsstunden sind keine Unstimmigkeiten abzuleiten.

Tabelle 51 Messdaten der Wärmepumpe

	2016 (ab Sep.)	2017	2018 (bis Juli)
Jahresarbeitszahl WP1 / WP2	5,12 / 2,85	4,5 / 3,45	4,01 / 3,26
Betriebsstunden (gesamt)	keine Werte	5.417	6.237

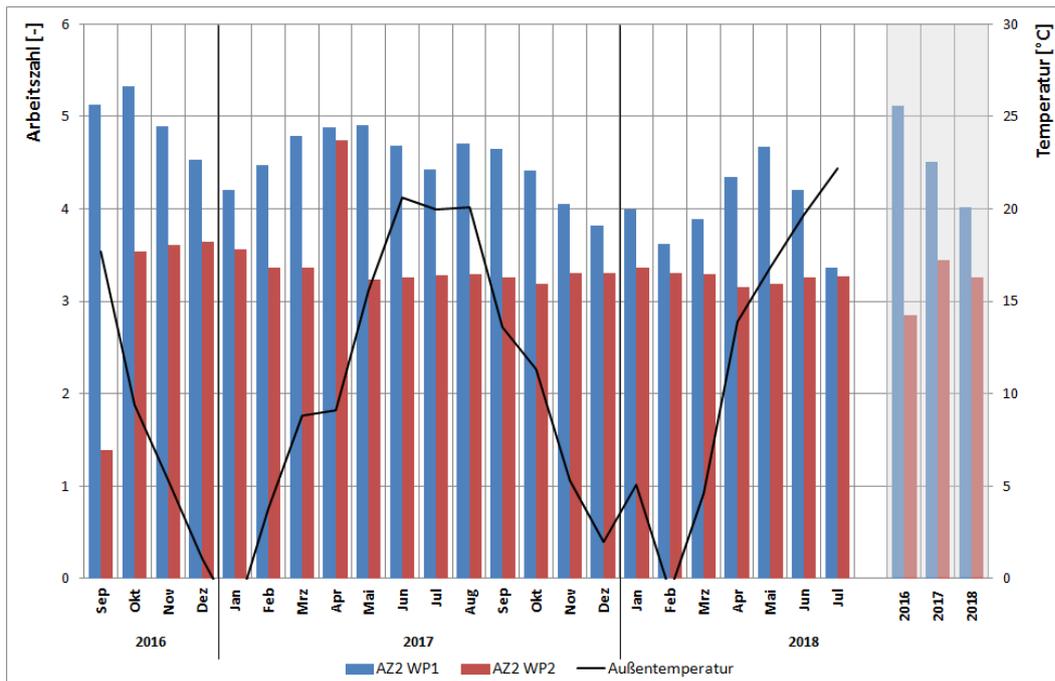


Abbildung 121 Monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpe, 2016 – 2018

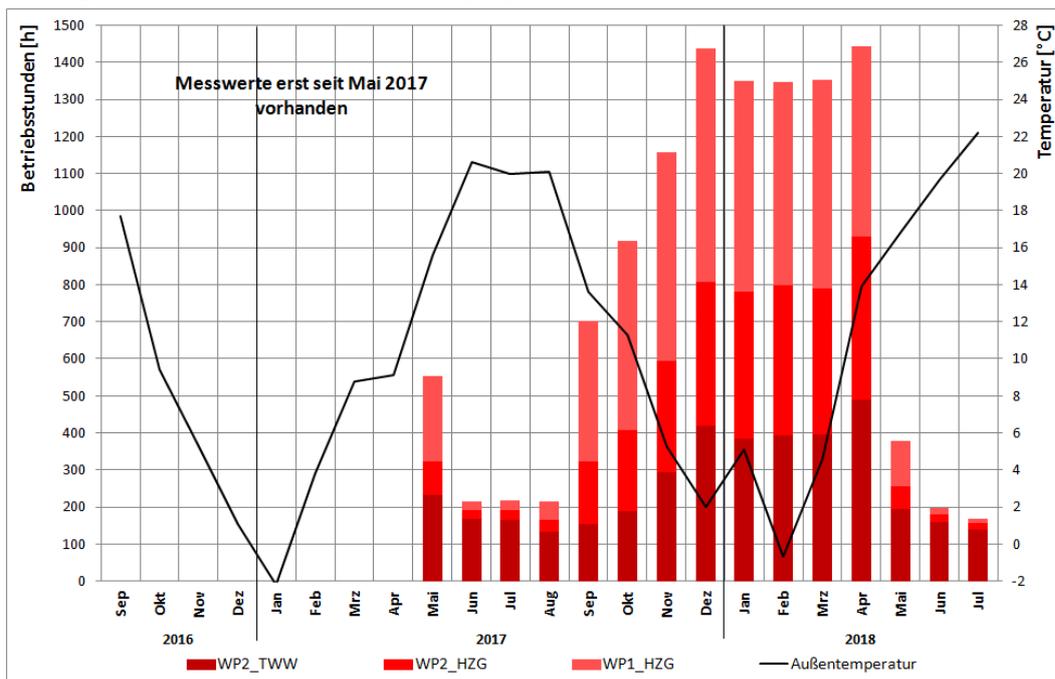


Abbildung 122 Monatliche Betriebsstunden der Wärmepumpe, 2016 – 2018

### 16.4.10 Gebäude 10 – MFH

Das Mehrfamilienhaus ist mit einer Wärmepumpe ausgestattet, die an einen Abwasserwärmeübertrager angeschlossen ist. Die Wärmepumpe versorgt die Fußbodenheizung und Trinkwarmwasserbereitung. Als redundanter Versorger ist ein Gasbrennwertkessel installiert.

#### Wärmebereitstellung

Abbildung 123 zeigt die Wärmebereitstellung gesplittet in Heizung und Trinkwarmwasser. Dem Gebäude wurden in der Messperiode ~310.000 kWh/a (31,5 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>·a)) Wärme über die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt.

Die Wärmemenge wurde dem Gebäude zu 55 % über die Fußbodenheizung und zu 45 % über Trinkwarmwasserbereitung zugeführt. (Tabelle 52)

Die Wärmebereitstellung für Heizung und Trinkwarmwasser folgt den Jahreszeiten und Außentemperaturen. In den Sommermonaten wird nur die Trinkwarmwasserbereitung versorgt, Heizenergie fällt nicht an.

Die Vor- und Rücklauftemperaturen sind in Abbildung 124 dargestellt. Die Vorlauftemperaturen aus der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Außentemperaturen liegen zwischen 38 und 51 °C.

Tabelle 52: Messdaten der Wärmebereitstellung Heizung und Trinkwarmwasser über die Wärmepumpe

	2015 (ab Sep.)	2016	2017	2018 (bis Juni)
Wärmebereitstellung gesamt [kWh/a]	105.970	339.980	310.280	96.220
Wärmebereitstellung Heizung [kWh/a]	64.680	185.020	164.850	96.120
spez. Energie Heizung [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	6,6	18,8	16,8	9,8
Wärmebereitstellung TWW [kWh/a]	41.290	154.960	145.430	100
spez. Energie TWW [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	4,2	15,8	14,8	0,01

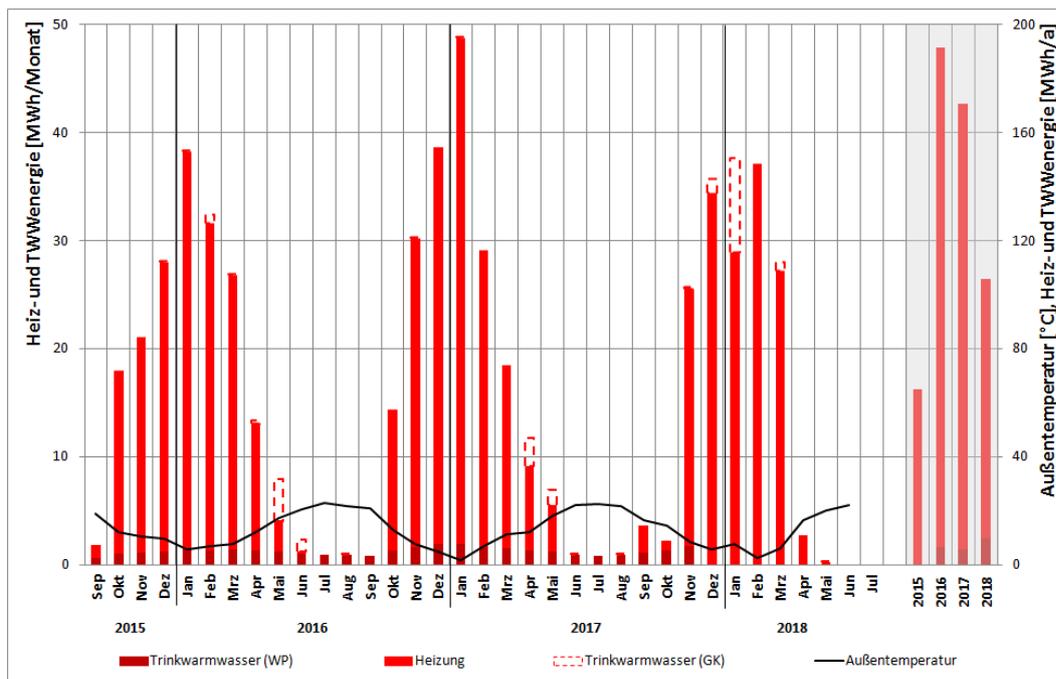


Abbildung 123: Monatlicher Wärmebereitstellung der Wärmepumpe (geothermischer Anteil) sowie Außentemperatur, 2015 – 2018

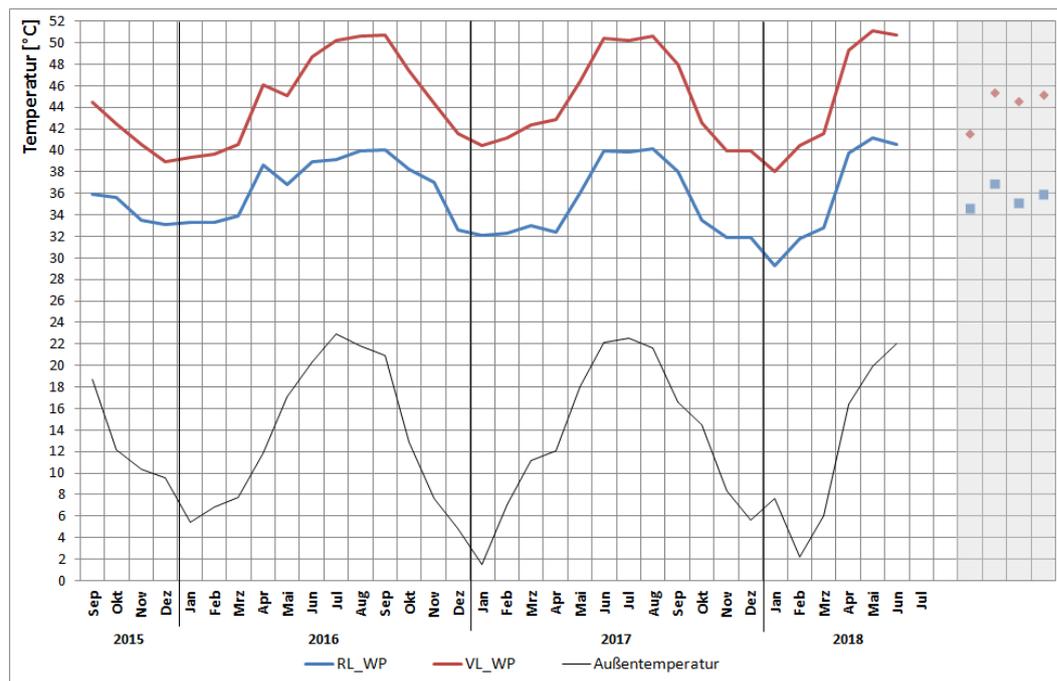


Abbildung 124: Monatsmittel der Vor- und Rücklauftemperaturen für die Wärmepumpe, 2015 – 2018

### Wärmentzug Quelle

Im Messzeitraum wurde über den Abwasserwärmeübertrager im Durchschnitt 270.000 kWh/a (2.647 kWh/(m<sup>2</sup>·a)) Wärme entzogen. (Abbildung 125)

Anhand der Messwerte ist den Jahreszeiten abhängiger Verlauf festzustellen. Die mittleren monatlichen Ein- und Austrittstemperaturen sind in Abbildung 126 dargestellt. Die mittleren Monatlichen Austrittstemperaturen aus dem Abwasserwärmeübertrager betragen 15 bis 21 °C. Die mittleren Temperaturen und der Wärmeentzug weisen keine Unstimmigkeiten auf.

Tabelle 53: Messdaten des Wärmentzugs

	2015 (ab Sep.)	2016	2017	2018 (bis Juni)
Entzugsenergie [kWh/a]	87.340	273.650	273.150	144.390
spez. Entzugsenergie [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	856,3	2.682,8	2.677,9	1.415,58
spez. mittlere Entzugsleistung [W/m <sup>2</sup> ]	106,5	292,3	520,6	739,1

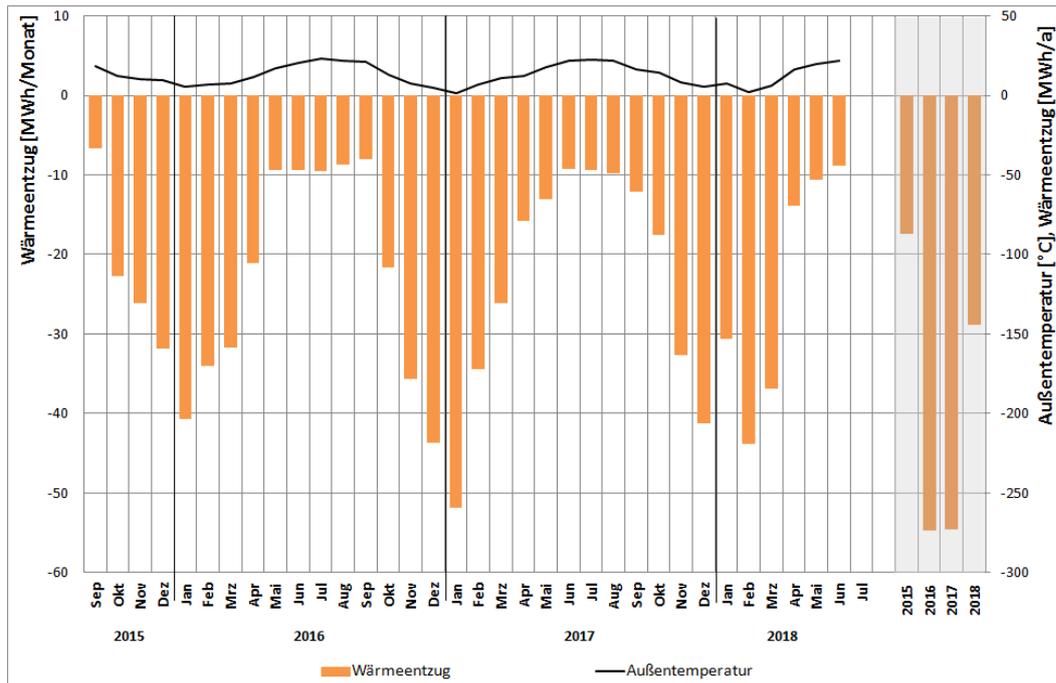


Abbildung 125 Monatslicher Wärmeentzug sowie Außentemperatur, 2015 – 2018

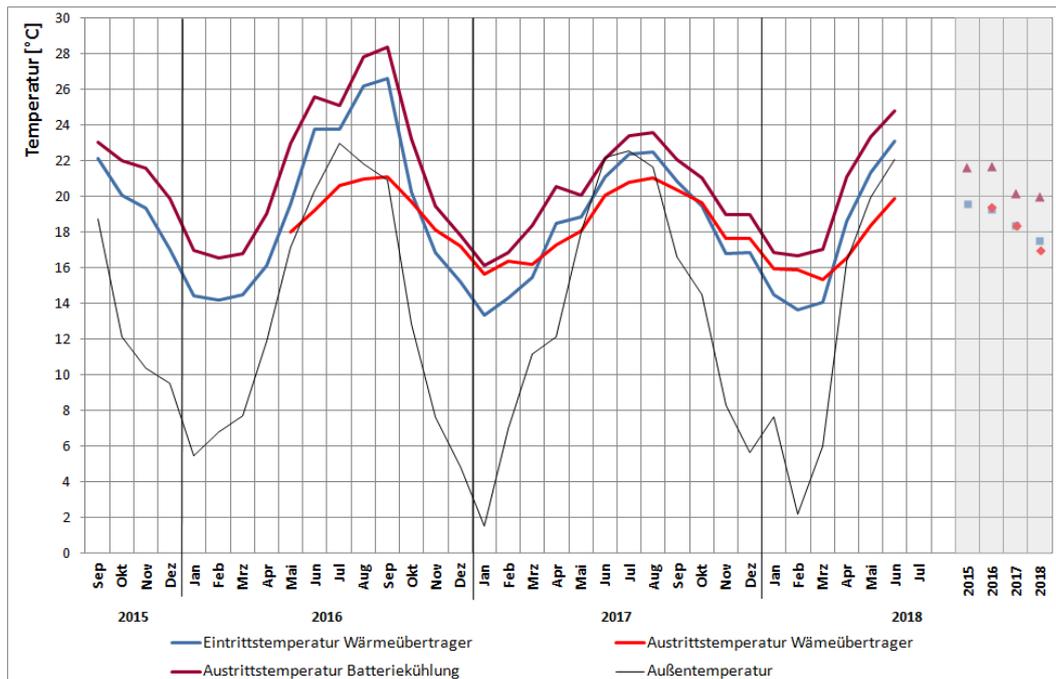


Abbildung 126: Monatsmittel der Ein- und Austrittstemperaturen des Wärmeübertragers und die Austrittstemperatur der Batteriekühlung, 2015 – 2018

## Wärmepumpe

Im Durchschnitt konnte im Messzeitraum eine Jahresarbeitszahl (JAZ1) > 4,0 erzielt werden. Werden die monatlichen Arbeitszahlen der Anlage betrachtet, so ist festzustellen, dass die Wärmepumpe durchgängig im effizienten Bereich arbeiten und die Zielwerte gemäß Datenblatt der Wärmepumpen mit einem gesamt COP von 5,0 annähernd erreicht werden. Es ist zu berücksichtigen, dass der COP auf den Betriebspunkt Soleeintritt 0°C und Vorlauf-Gebäude 35°C ausgelegt ist. Abweichungen von der Soleeintrittstemperatur oder der Vorlauftemperatur können sich höhere oder geringere JAZ ergeben.

Anhand der Betriebsstunden in Abbildung 128 ist festzustellen, dass die Wärmepumpe das ganze Jahr über rund 650 Stunden pro Monat in Betrieb ist. Die Gründe liegen u. a. darin, dass auf der Gebäudeseite eine hohe Dauerlast durch die Trinkwarmwasserbereitung ansteht (Zirkulationsverluste).

Tabelle 54: Messdaten der Wärmepumpe

	2015 (ab Sep.)	2016	2017	2018 (bis Juni)
Jahresarbeitszahl AZ1/AZ2	4,47/4,29	4,60/4,28	4,21/3,94	4,61/4,31
Betriebsstunden (gesamt)	2.354	7.829	7.917	3.947

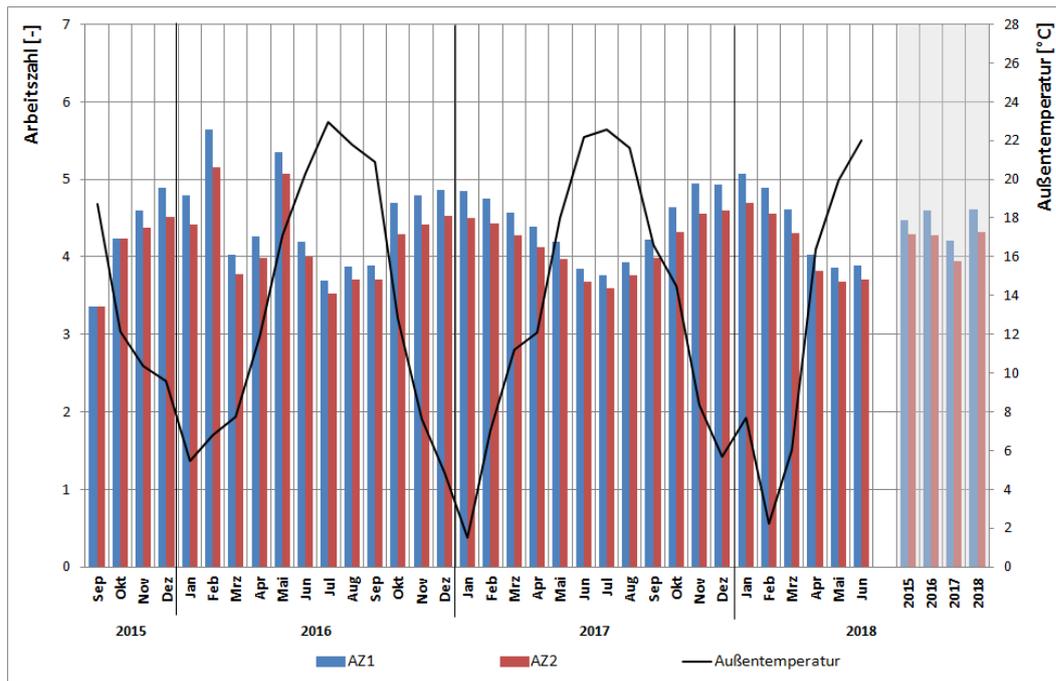


Abbildung 127 Monatliche Arbeitszahlen der Wärmepumpe, 2015 – 2018

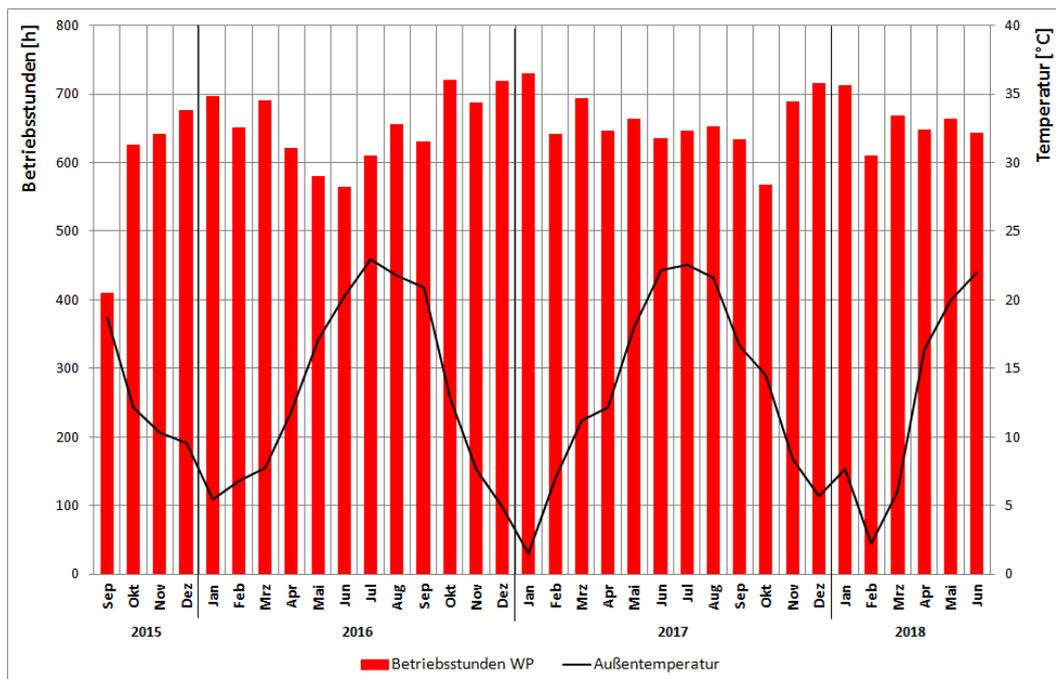


Abbildung 128 Monatliche Betriebsstunden der Wärmepumpe, 2015 – 2018

### 16.4.11 Gebäude 11 – MFH

2015 ist das Mehrfamilienhaus vollsanziert worden. In dem Zuge ist eine Wärmepumpe integriert, die an 30 Helixsonden mit einer Länge von 4,5 m gekoppelt wurde. Die erdgekoppelte Wärmepumpe versorgt die statischen Heizkörper im Gebäude. Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt separat über dezentrale Abluftwärmepumpe.

#### Wärmebereitstellung

Abbildung 129 zeigt die Wärmebereitstellung der Wärmepumpe für die Raumheizung. Dem Gebäude wurden in der Messperiode 40.000 kWh/a ( $54,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ ) Wärme über die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt. (Tabelle 55)

Die Wärmebereitstellung für Heizung folgt den Jahreszeiten und Außentemperaturen. In den Sommermonaten wird keine Heizenergie benötigt.

Die mittleren monatlichen Vor- und Rücklauftemperaturen sind in Abbildung 130 dargestellt. Die Vorlauftemperaturen liegen für die Raumheizung in Abhängigkeit der Außentemperaturen zwischen 30 und 46 °C.

Tabelle 55 Messdaten der Wärmebereitstellung Heizung

	2016 (ab Okt.)	2017	2018 (bis Juli)
Wärmebereitstellung WP an Speicher HZG [kWh/a]	19.200	40.880	17.930
spez. Energie WP an Speicher HZG [ $\text{kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ ]	26,3	56,0	24,56

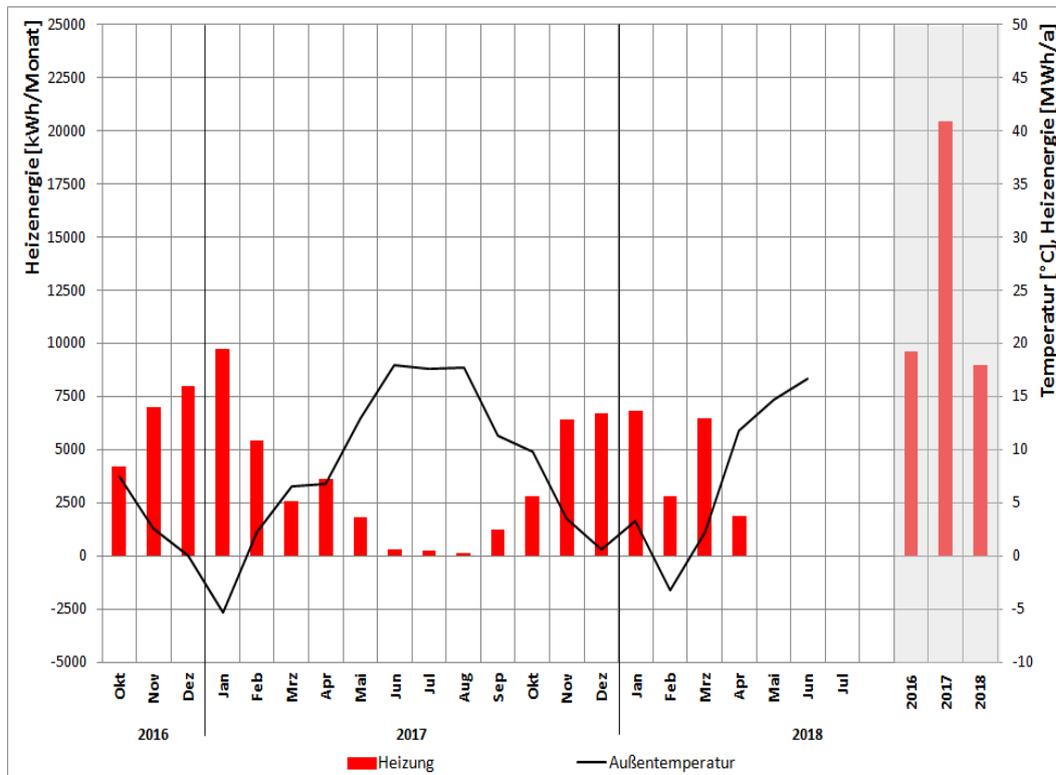


Abbildung 129 Monatlicher Wärmebereitstellung der Wärmepumpe sowie Außentemperatur, 2016 – 2018

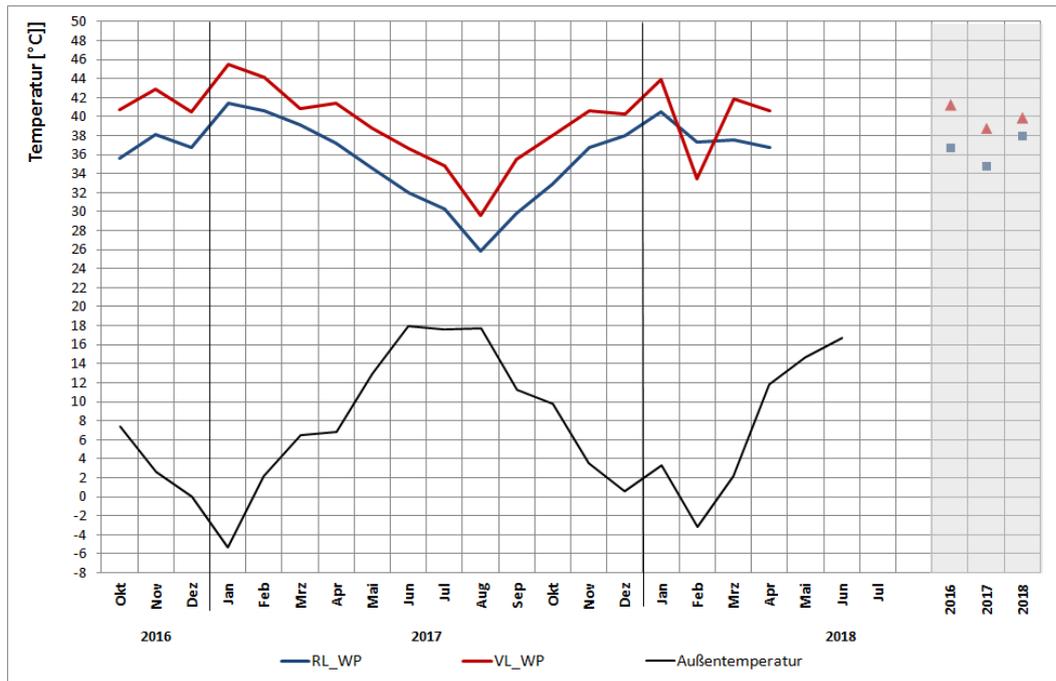


Abbildung 130 Monatsmittel der Vor- und Rücklauftemperaturen für Speicher und Wärmepumpe, 2016 – 2018

### Wärmentzug Quelle

Im Messzeitraum wurde über Helixsonden im Durchschnitt 18.000 kWh/a (133,3 kWh/(m·a)) der Quelle Wärme entzogen. (Abbildung 131)

Anhand der Messwerte ist den Jahreszeiten abhängiger Verlauf festzustellen. Die mittleren monatlichen Ein- und Austrittstemperaturen sind in Abbildung 132 dargestellt. Anhand der erfassten Fluidtemperaturen kann ein normaler Temperaturverlauf zwischen Wärmeentzug und Regeneration festgestellt werden. Die mittleren Austrittstemperaturen liegen zwischen -5 und 11 °C. Die Temperaturen und der Wärmeentzug weisen keine Unstimmigkeiten auf.

Tabelle 56 Messdaten des Wärmentzugs

	2016 (ab Okt.)	2017	2018 (bis Juli)
Entzugsenergie [kWh/a]	9.180	18.880	7.980
spez. Entzugsenergie [kWh/(m·a)]	68,0	139,9	59,1
spez. mittlere Entzugsleistung [W/m]	34,2	44,3	38,7

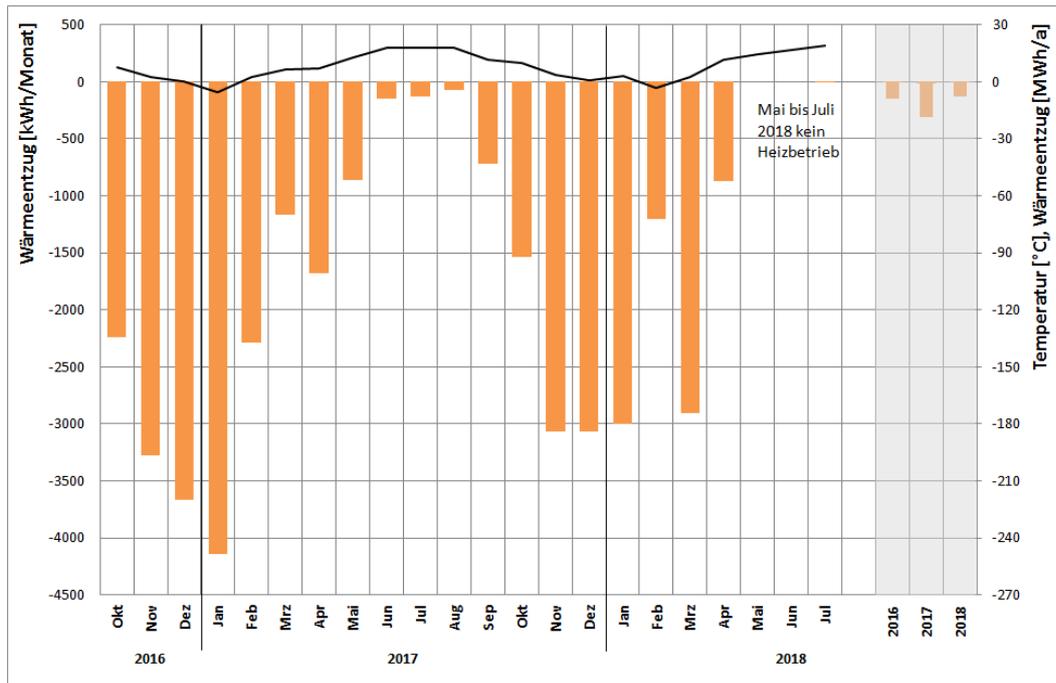


Abbildung 131 Monatlicher Wärmeentzug sowie Außentemperatur, 2016 – 2018

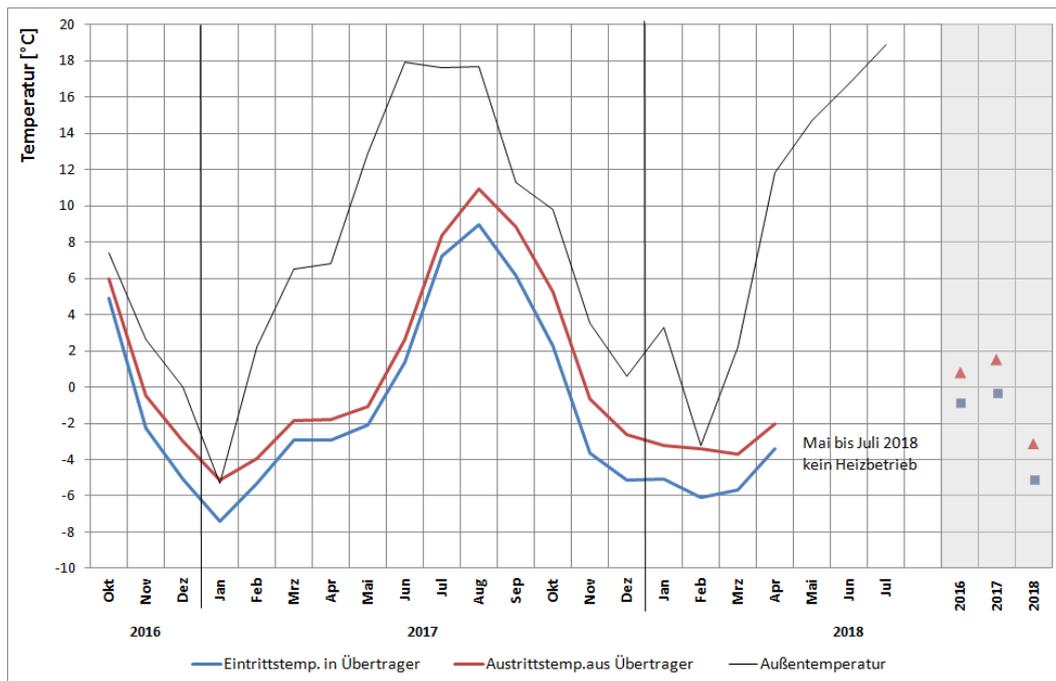


Abbildung 132 Monatsmittel der Ein- und Austrittstemperaturen des Übertragers, 2016 – 2018

## Wärmepumpe

Im Durchschnitt konnte im Messzeitraum nur eine Jahresarbeitszahl um 2,0 erzielt werden. Werden die monatlichen Arbeitszahlen der Anlage betrachtet, so ist festzustellen, dass die Wärmepumpe sogar Arbeitszahlen kleiner 1,0 erzielt. Die niedrigen Arbeitszahlen sind darauf begründet, dass sich im Gebäude sehr hohe Verteilverluste ergeben, die gedeckt werden müssen und zum anderen die Quelltemperaturen sehr gering sind (teilweise  $< 0^{\circ}\text{C}$  und einfrieren der Verteiler). Die niedrigen Temperaturen sind wiederum die Ursache eines sehr hohen Energieentzugs aus den Sonden, der zuvor nicht in dem Maße absehbar war.

Anhand der Betriebsstunden in Abbildung 134 ist festzustellen, dass die Wärmepumpe im Heizbetrieb hohe Betriebsstunden hat und dann in den Sommermonaten außer Betrieb ist, da kein Heizwärmebedarf ansteht.

Tabelle 57 Messdaten der Wärmepumpe

	2016 (ab Okt.)	2017	2018 (bis Juli)
Jahresarbeitszahlen AZ1/AZ2	2,85/2,6	1,98/1,87	1,21/1,16
Betriebsstunden (gesamt)	1.962	4.339	2.090

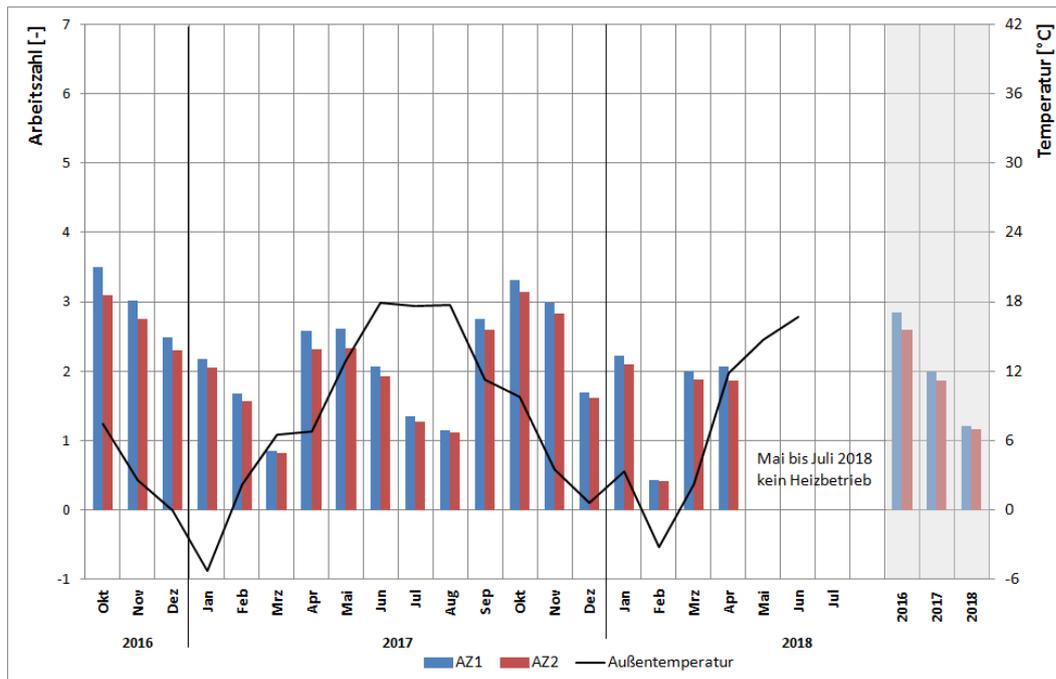


Abbildung 133 Monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpe, 2016 – 2018

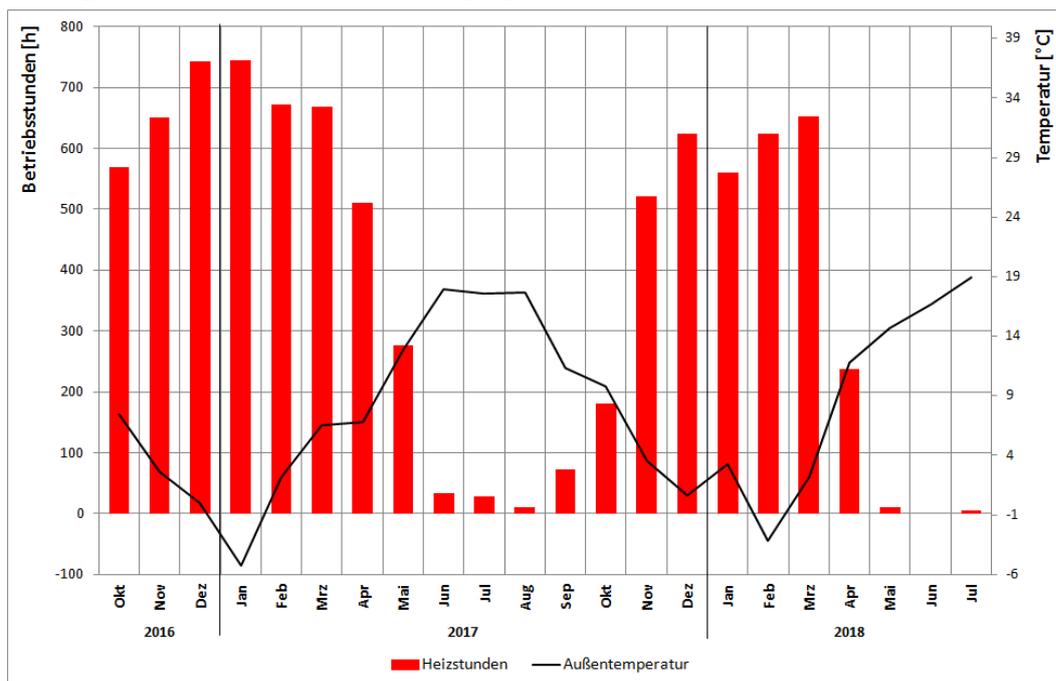


Abbildung 134 Monatliche Betriebsstunden der Wärmepumpe, 2016 – 2018

### 16.4.12 Gebäude 12 – Bürogebäude

Das Bürogebäude nutzt die Gründungspfähle als Energiepfähle. Die mit den Energiepfählen gekoppelte Wärmepumpe ist zum Heizen und Kühlen vorgesehen und versorgt die Betonkernaktivierung sowie die Raumluftheizung. Neben der Wärmepumpe ist das Gebäude auch noch an das Fernwärmenetz angeschlossen.

#### Wärmebereitstellung

Abbildung 135 zeigt die Wärme- und Kältebereitstellung gesplittet in BKT und RLT. Dem Gebäude wurden in der Messperiode 16.000 bis 55.000 kWh/a (6,3 bis 21,8 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>·a)) Wärme und 10.000 bis 30.000 kWh/a (4,0 bis 11,9 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>·a)) Kälte über die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt.

Die Wärme wurde dem Gebäude zu 60 % über die BKT und zu 40 % über die RLT zugeführt. Die Kälte verteilt sich zu ungefähr 90 % BKT und 10 % RLT auf. (Tabelle 58)

Tabelle 58 Messdaten der Wärme- und Kältebereitstellung BKT und RLT über die Wärmepumpe

	2015	2016	2017	2018 (bis Juni)
Wärmebereitstellung gesamt [kWh/a]	24.760	16.730	53.450	35.19
Wärmebereitstellung BKT [kWh/a]	6.510	7.470	32.430	21.80
spez. Energie BKT [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	2,33	2,52	11,26	7,57
Wärmebereitstellung RLT [kWh/a]	18.250	9.260	21.020	13.380
spez. Energie RLT [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	6,34	3,21	7,30	4,65
Kältebereitstellung gesamt [kWh/a]	10.280	14.420	30.780	3.020
Kältebereitstellung BKT [kWh/a]	9.840	12.730	30.420	2.930
spez. Energie BKT [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	3,42	4,42	10,56	1,02
Kältebereitstellung RLT [kWh/a]	440	1.690	360	90
spez. Energie RLT [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	0,15	0,59	0,12	0,03

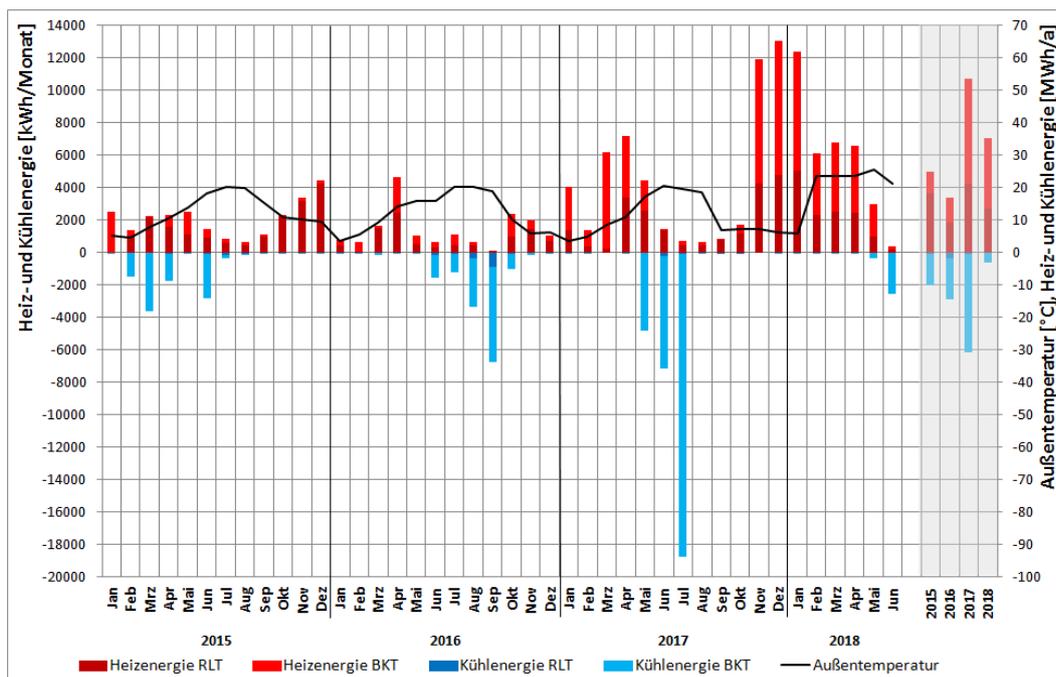


Abbildung 135 Monatlicher Wärme- und Kältebereitstellung der Wärmepumpe sowie Außentemperatur, 2015 – 2018

### Wärmentzug und -eintrag Quelle

Im Messzeitraum wurde über die Energiepfähle im Durchschnitt 90.000 kWh/a (94 kWh/(m-a)) Wärme dem Erdreich entzogen und 90.000 kWh/a (94 kWh/(m-a)) Wärme zugeführt. (Abbildung 136)

Die mittleren monatlichen Ein- und Austrittstemperaturen sind in Abbildung 137 dargestellt. Anhand der erfassten Fluidtemperaturen kann ein nicht ganz regelmäßiger Temperaturverlauf zwischen Wärmeentzug und -eintrag festgestellt werden. Das Temperaturniveau im Austritt aus den Energiepfählen liegt zwischen 7 und 27 °C.

Tabelle 59 Messdaten des Wärmeentzugs und -eintrags

	2015	2016	2017	2018 (bis Juni)
Entzugsenergie [kWh/a]	10.580	5.920	43.240	27.990
spez. Entzugsenergie [kWh/(m-a)]	5,50	3,08	22,46	14,54
spez. mittlere Entzugsleistung [W/m]	8,77	7,10	16,14	5,88
Eintragsenergie [kWh/a]	26.550	26.120	24.030	5.110
spez. Eintragsenergie [kWh/(m-a)]	13,79	13,57	12,49	2,65
spez. mittlere Eintragsleistung [W/m]	9,31	11,42	26,02	37,47

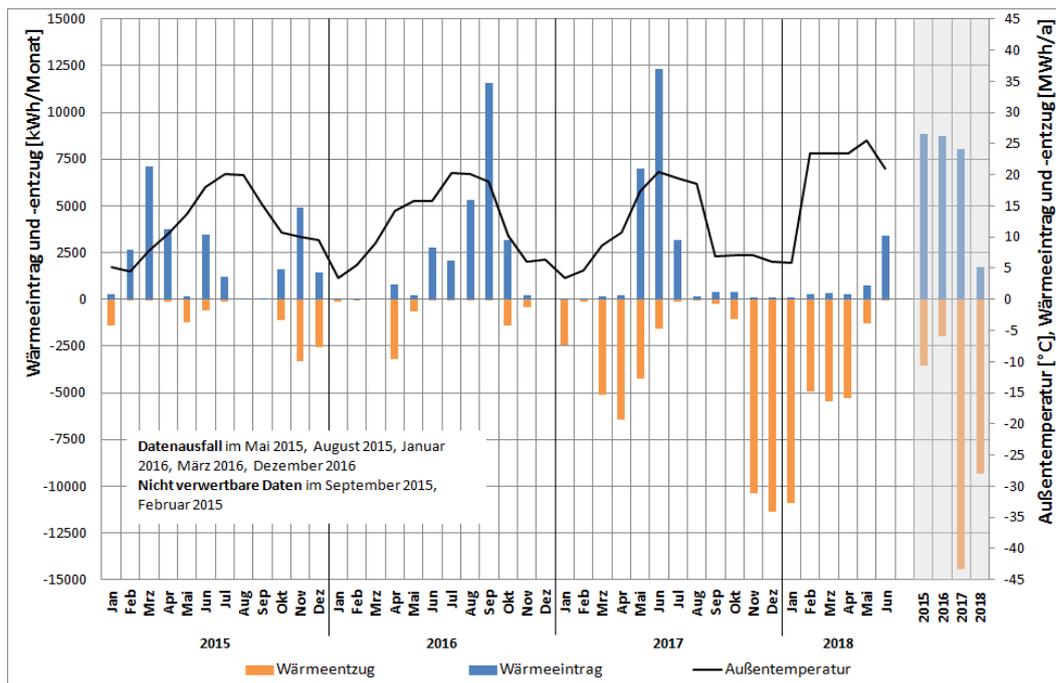


Abbildung 136 Monatlicher Wärmeentzug und -eintrag sowie Außentemperatur, 2015 – 2018

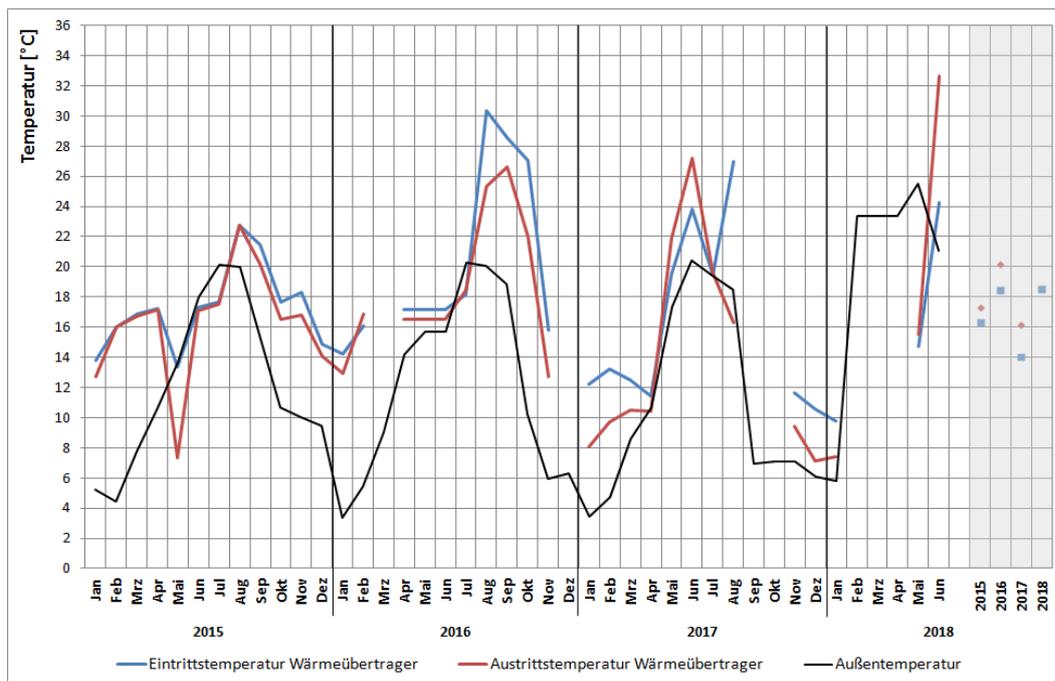


Abbildung 137 Monatsmittel der Ein- und Austrittstemperaturen der Energiepfähle, 2015 – 2018

## Wärmepumpe

Im Durchschnitt konnte im Messzeitraum eine Systemarbeitszahl für von 2 bis 3 erzielt werden. Bei dem Bürogebäude kann aufgrund der Messwerte nicht zwischen Heiz- und Kühlfall unterschieden werden. Die niedrigen Arbeitszahlen beruhen darauf, dass die Wärmepumpe durch die Fernwärme nicht zum Einsatz kommt und dann nur kurz läuft. Die Betriebsstunden der Wärmepumpe sind aufgrund der Messdaten nicht plausibel ab bildbar.

Tabelle 60 Messdaten der Wärmepumpe

	2015	2016	2017	2018 (bis Juni)
Jahresarbeitszahl	1,93	1,97	3,21	2,97

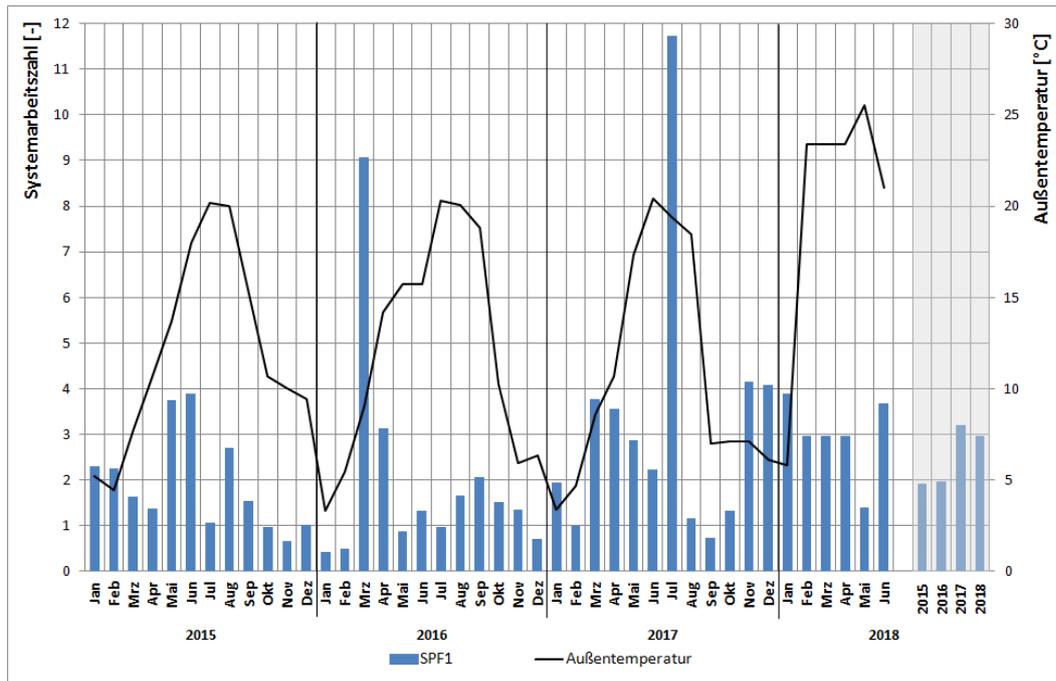


Abbildung 138 Monatliche Systemarbeitszahl der Wärmepumpe, 2015 – 2018

### 16.4.13 Gebäude 13 – Bürogebäude

Im Fall des Bürogebäudes kann neben dem reinen Kühl- und Heizbetrieb auch ein sogenannter Dualbetrieb (kombinierter Heiz- und Kühlbetrieb) gefahren werden. Im kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb wird die vom Kondensator der Wärmepumpe bereitgestellte Wärme zur Beheizung des Transparenten Hauses genutzt. Kann der Heizbedarf nicht vollständig über die bei der Gebäudekühlung gewonnene Wärme gedeckt werden, wird zusätzlich dem Erdreich Wärme entzogen. Ist hingegen der Kühlenergiebedarf größer als der Heizenergiebedarf erfolgt ein Wärmeeintrag in das Erdreich.

#### Wärme- und Kältebereitstellung

In den Spitzensommermonaten wird ein großer Teil an Wärmeenergie über die Kältemaschine aus dem Gebäude gezogen. Das Gebäude weist eine hohe Abwärme im Dualbetrieb auf. Die bereitgestellte Kälteenergie beläuft sich auf rund 430 MWh/a. Die über die Wärmepumpe bereitgestellte Wärmeenergie in der Heizperiode liegt bei rund 620 MWh/a.

Die mittleren monatlichen Vor- und Rücklauftemperaturen im Heizfall sind in Abbildung 140 dargestellt. Es ergeben sich Vorlauftemperaturen von 24 bis 42 °C.

Tabelle 61 Messdaten der Wärme- und Kältebereitstellung

	2015	2016	2017	2018 (bis Juli)
Wärmebereitstellung [kWh/a]	582.670	791.720	498.550	380.190
spez. Energie Heizung [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	219,0	297,6	187,4	142,9
Kältebereitstellung [kWh/a]	352.480	440.680	454.200	292.850
spez. Kühlenergie [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	132,5	165,7	170,7	110,1

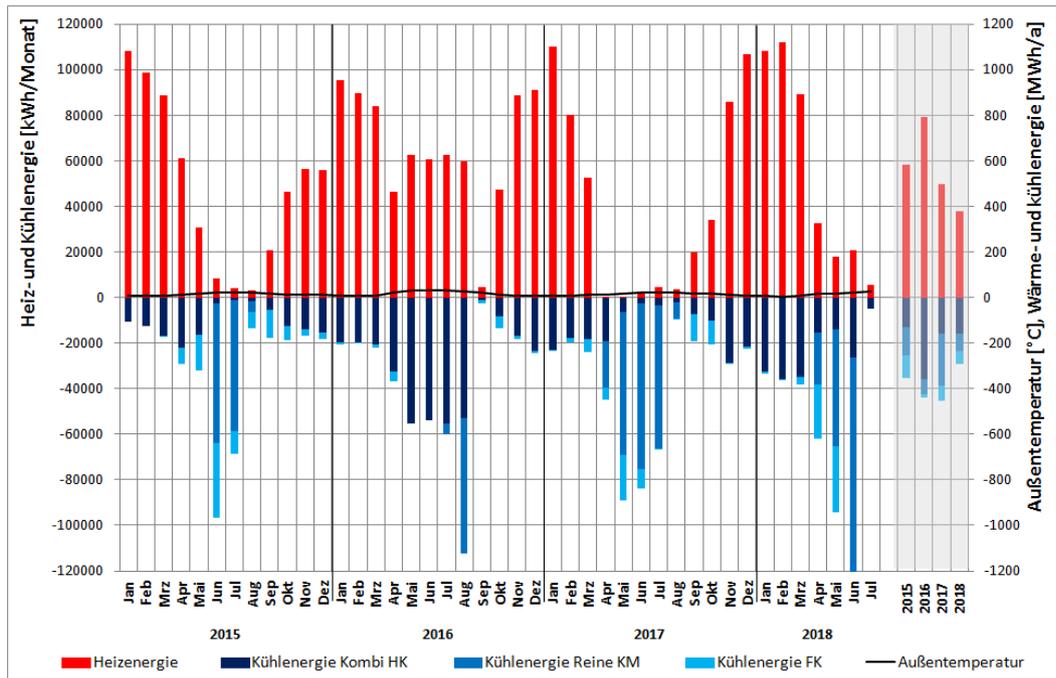


Abbildung 139 Monatlicher Wärme- und Kältebereitstellung der Wärmepumpe sowie Außentemperatur, 2015 – 2018

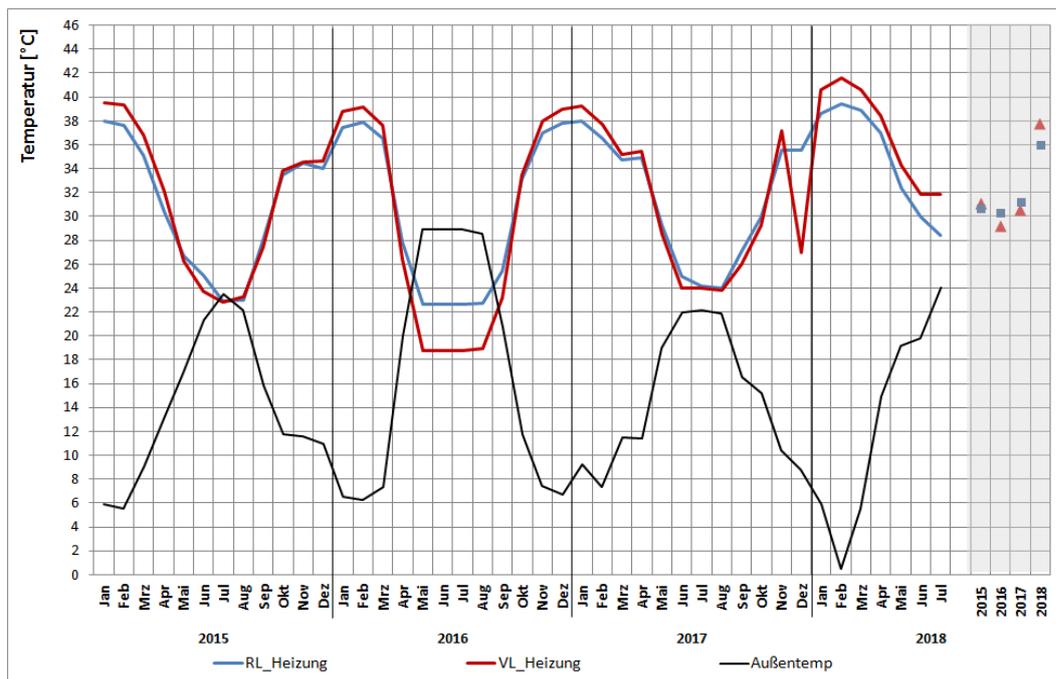


Abbildung 140 Monatsmittel der Vor- und Rücklauftemperaturen im Heizfall, 2015 – 2018

### Wärmeeintrag und -entzug

An den Wärmeeintrags- und Wärmeentzugsmengen von 2015 bis 2018 (Abbildung 141) ist zu erkennen, dass in den Jahren 2015, 2017 und 2018 mehr Wärme aus dem Erdreich entzogen wurde, als eingetragen. Einzig 2016 wurde mehr Wärme ins Erdreich eingetragen. Die eingetragene Wärme stammt u. a. aus dem Gebäude selbst (kombinierter Betrieb / Dualbetrieb) als auch durch den Anteil des Kältemaschinenbetriebes. Die Folge ist eine Erwärmung des Erdreichs auf ein für den freien Kühlbetrieb ungünstiges Temperaturniveau (Abbildung 142).

Der Wärmeeintrag liegt bei rund 250 MWh/a (46,3 kWh/(m·a)) und der Wärmeentzug bei 270 MWh/a (50 kWh/(m·a)).

Die mittleren monatlichen Austrittstemperaturen liegen zwischen 7 °C im Winter bis 23 °C im Sommer.

Tabelle 62: Messdaten des Wärmentszugs und -eintrags

	2015	2016	2017	2018 (bis Juli)
Entzugsenergie [kWh/a]	267.160	269.630	292.110	186.040
spez. Entzugsenergie [kWh/(m·a)]	49,5	49,9	54,1	34,5
spez. mittlere Entzugsleistung [W/m]	10,6	14,2	11,26	11,9
Eintragsenergie [kWh/a]	241.170	273.710	246.950	131.800
spez. Eintragsenergie [kWh/(m·a)]	44,6	50,7	45,7	24,4
spez. mittlere Eintragsleistung [W/m]	8,1	10,4	10,2	8,9

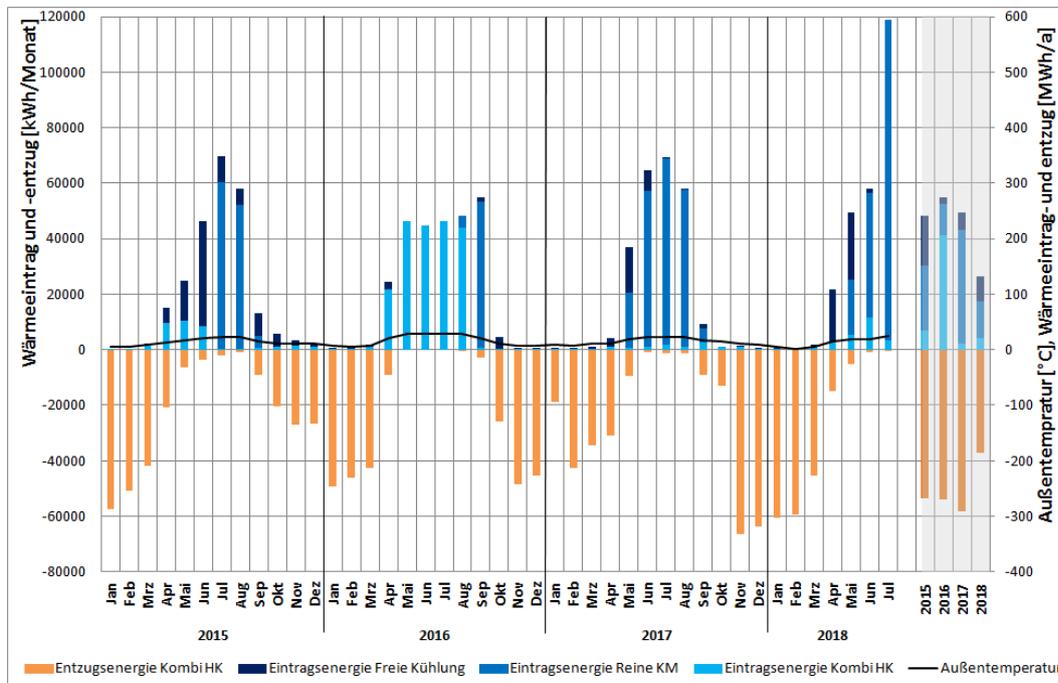


Abbildung 141 Monatlicher Wärmeeintrag und -entzug sowie Außentemperatur (GEW), 2015 – 2018

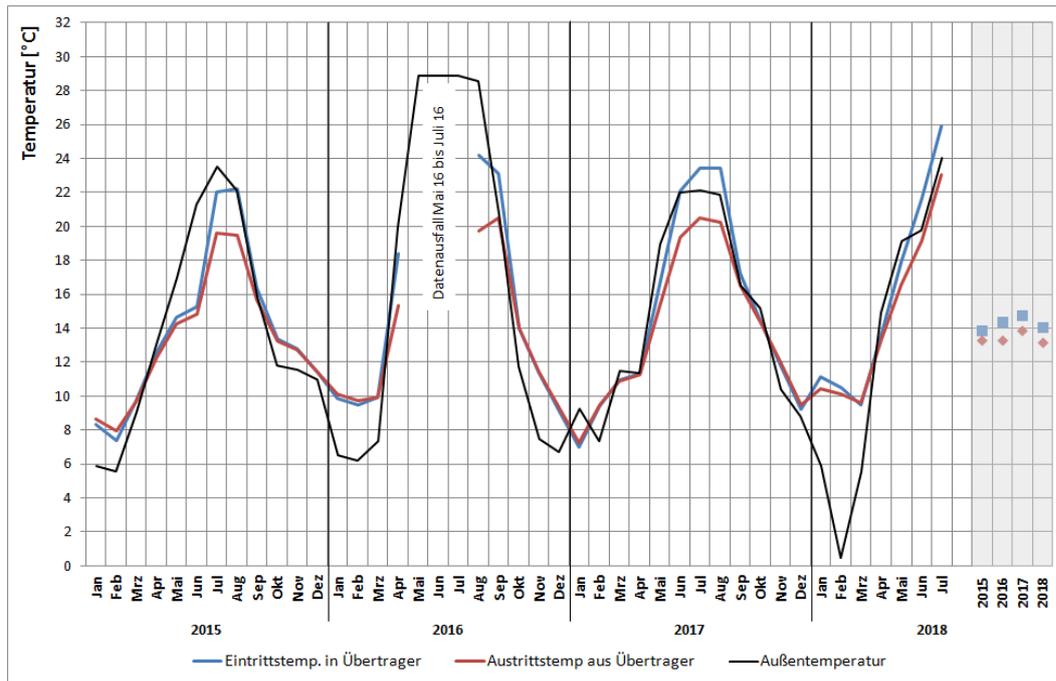


Abbildung 142: Monatsmittelwerte der Ein- und Austrittstemperaturen der Erdwärmesondenanlage, 2015 – 2018

### Wärmepumpe

Bei der Auswertung der Arbeitszahl der Wärmepumpe des Bürogebäudes handelt es sich um die Bilanzgrenze der Systemarbeitszahl. Eine feinere Unterteilung der Stromverbräuche ist aufgrund der installierten Messtechnik nicht gegeben.

Die Wärmepumpe erzielt eine monatliche Systemarbeitszahl von 2,0 bis 7,0 (Abbildung 143). Gemäß Datenblatt ist ein COP von 2,86 ermittelt. Die Abweichung beruht auf der Auslegung der Wärmepumpe. Die Wärmepumpe ist für die Spitzenlast ausgelegt, wird aber hauptsächlich im Teillastbetrieb gefahren, so dass die Arbeitszahl dadurch reduziert wird. Die Wärmepumpe kann nicht im Auslegungsbereich und somit effizienter betrieben werden. Ähnlich verhält es sich im mechanischen Kühlbetrieb. Im mechanischen Kühlfall ist ein COP von 4,0 ermittelt.

Anhand der Betriebsstunden ist der Wechsel zwischen Heizen und Kühlen gut zu erkennen.

	2015	2016	2017	2018 (bis Juli)
Jahresarbeitszahl SPF1	3,12	3,75	2,79	3,68
Betriebsstunden (gesamt)	8.889	8.901	8.947	4.415

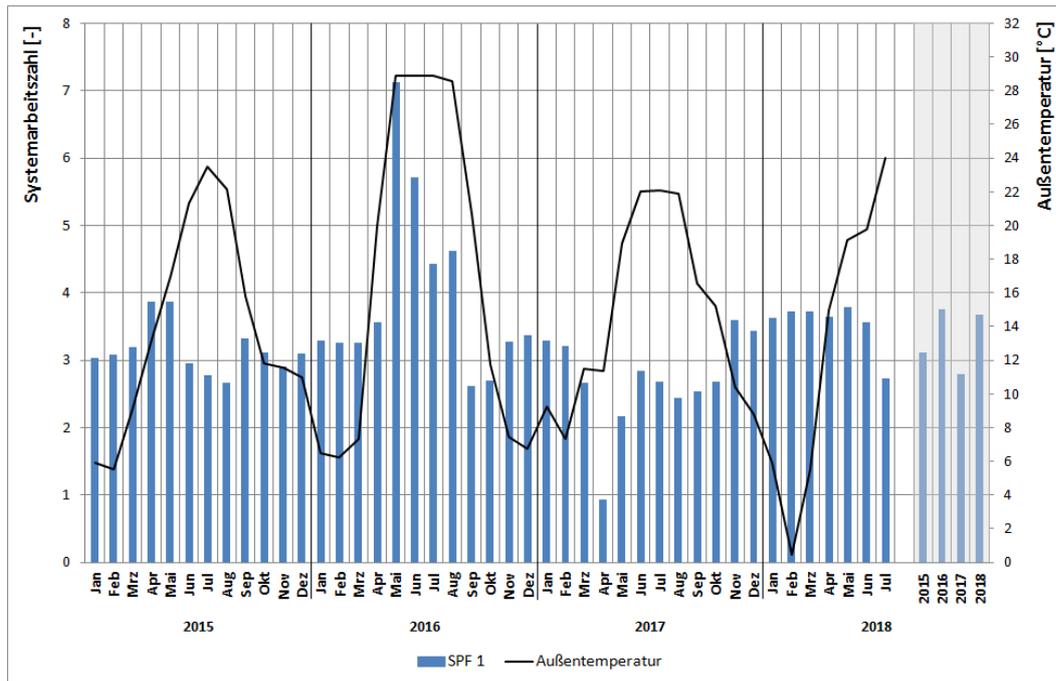


Abbildung 143 Monatliche Systemarbeitszahl der Wärmepumpe im Heiz- und Kühlfall, 2015 – 2018

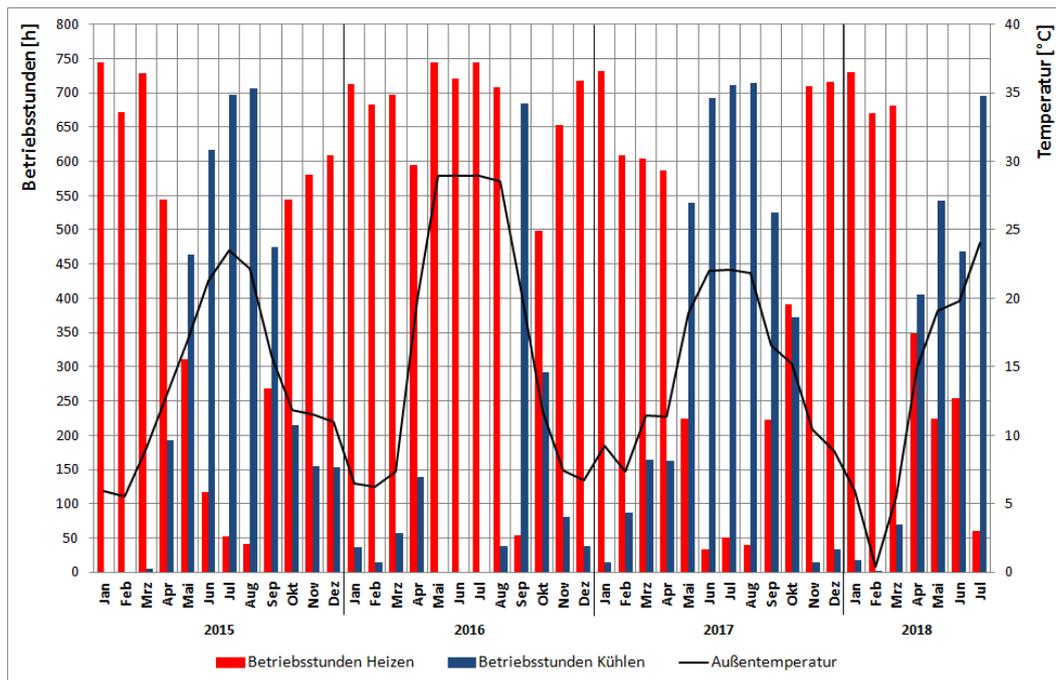


Abbildung 144 Monatliche Betriebsstunden der Wärmepumpe, 2015 – 2018

### 16.4.14 Gebäude 14 – Schule

Die 2015 erbaute Schule verfügt über 100 aktivierte Bohrpfähle und 4.400 m<sup>2</sup> Agrothermie, welche den Komplex über eine Wärmepumpe mit Energie für die Lüftung und Flächenheizung versorgt. Zur Trinkwarmwasserbereitung und Heizungsunterstützung ist ein Gasbrennwertkessel installiert.

#### Wärmebereitstellung

Abbildung 145 zeigt die Wärme- und Kältebereitstellung über die Wärmepumpe. Dem Gebäude werden in der Messperiode rund 200.000 kWh/a (12,8 kWh/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>·a) Wärme und 95.000 kWh/a (6,1 kWh/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>·a) Kälte über die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt.

Die Wärme- und Kältebereitstellung folgt den Jahreszeiten und Außentemperaturen.

Die Vor- und Rücklauftemperaturen sind in Abbildung 146 dargestellt. Die Vorlauftemperaturen liegen für die Raumheizung in Abhängigkeit der Außentemperaturen zwischen 26 und 37 °C. Das Trinkwarmwasser wird nicht über die Wärmepumpen bereit.

Tabelle 63 Messdaten der Wärme und Kältebereitstellung über die Wärmepumpen

	2016 (ab Apr.)	2017	2018 (bis Juli)
Wärmebereitstellung gesamt [kWh/a]	131.050	190.410	140.770
spez. Energie Heizung [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	8,4	12,2	9,0
Kältebereitstellung gesamt [kWh/a]	73.700	94.900	81.320
spez. Energie Kühlung [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ·a)]	4,7	6,1	5,2

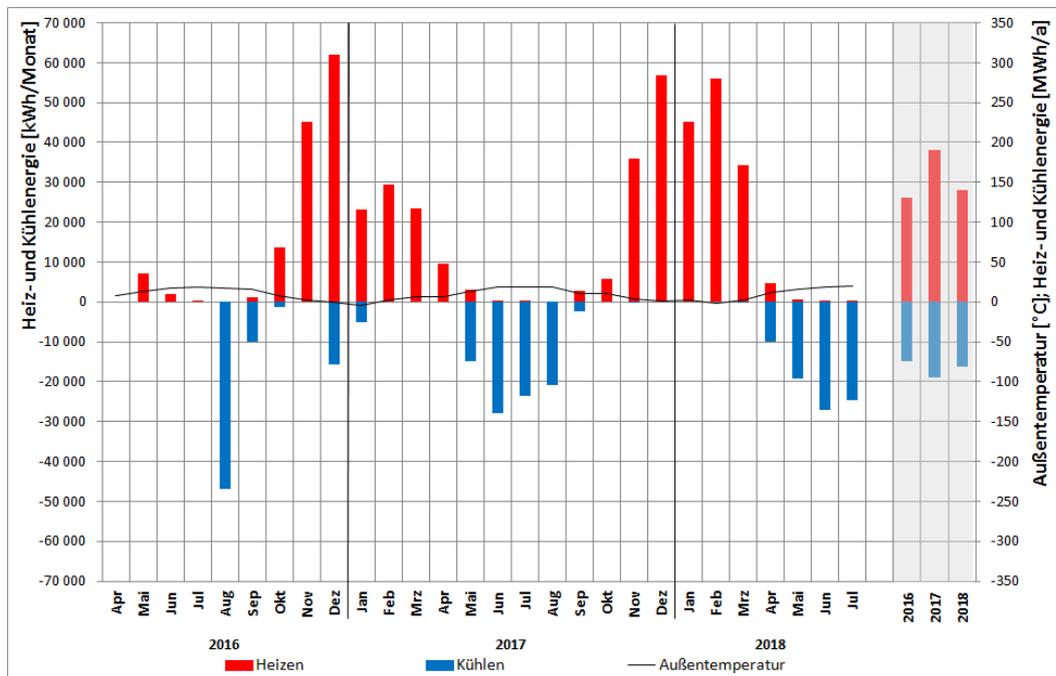


Abbildung 145 Monatlicher Wärme- und Kältebereitstellung der Wärmepumpe sowie Außentemperatur, 2016 – 2018

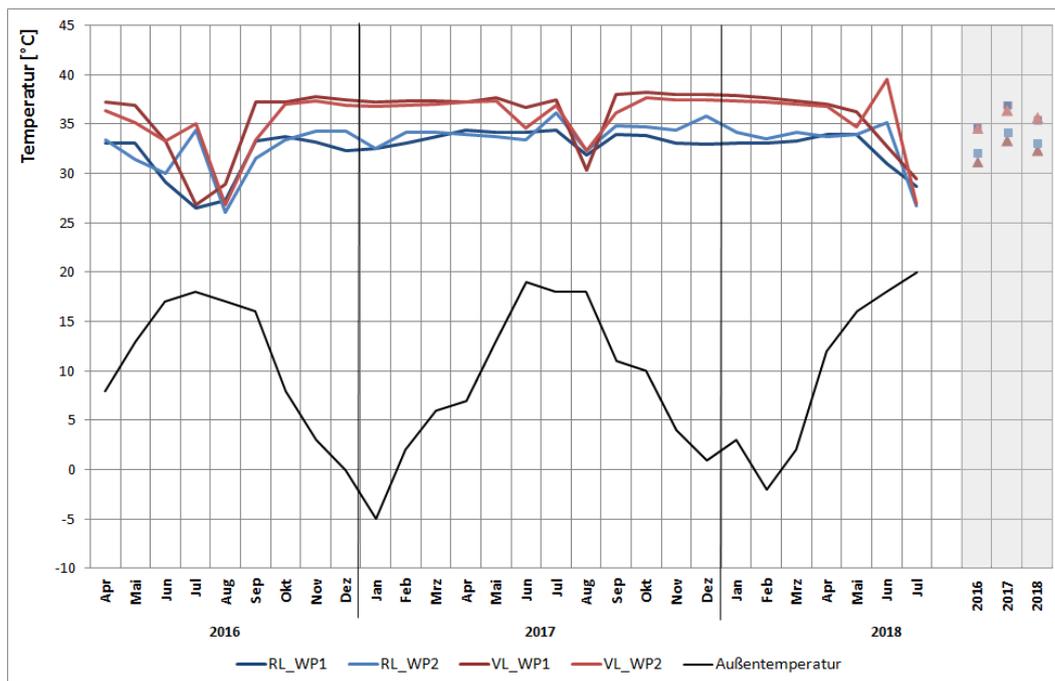


Abbildung 146 Monatsmittel der Vor- und Rücklauftemperaturen für die Raumheizung, 2016 – 2018

### Wärmentzug Quelle

Im Messzeitraum wurde über das Agrothermiefeld und die Energiepfähle rund 60 MWh/a (13,6 kWh/(m<sup>2</sup>·a)) bzw. rund 100 MWh/a (76,9 kWh/(m·a)) Wärme entzogen und rund 50 MWh/a (11,4 kWh/(m<sup>2</sup>·a)) bzw. rund 50 MWh/a (38,5 kWh/(m·a)) Wärme eingetragen (Abbildung 147).

Die mittleren monatlichen Ein- und Austrittstemperaturen sind in Abbildung 148 dargestellt. Anhand der erfassten Fluidtemperaturen sind Austrittstemperaturen aus dem Agrothermiefeld von 7 bis 35 °C und aus den Energiepfählen von 9 bis 19 °C abzulesen.

Tabelle 64 Messdaten des Wärmentzugs und -eintrags

	2016 (ab Apr.)	2017	2018 (bis Juli)
Entzugsenergie Agrothermie [kWh/a]	0	56.670	44.930
spez. Entzugsenergie Agrothermie [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	0,0	12,6	10,0
Eintragsenergie Agrothermie [kWh/a]	15.700	48.500	47.400
spez. Eintragsenergie Agrothermie [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	3,49	10,78	10,53
Entzugsenergie Energiepfähle [kWh/a]	0	107.900	71.600
spez. Entzugsenergie Energiepfähle [kWh/(m·a)]	0,0	83,0	55,08
Eintragsenergie Energiepfähle [kWh/a]	57.900	46.200	33.820
spez. Eintragsenergie Energiepfähle [kWh/(m·a)]	44,5	35,5	26,0

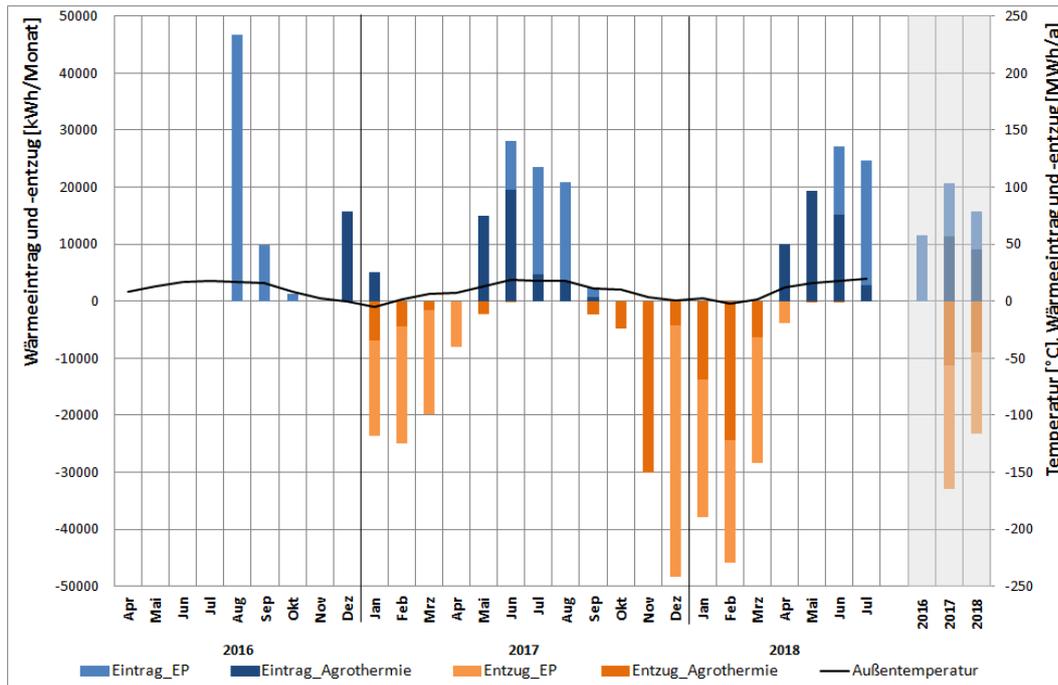


Abbildung 147 Monatlicher Wärmeentzug sowie -eintrag über das Agrothermiefeld und die Energiepfähle, 2016 – 2018

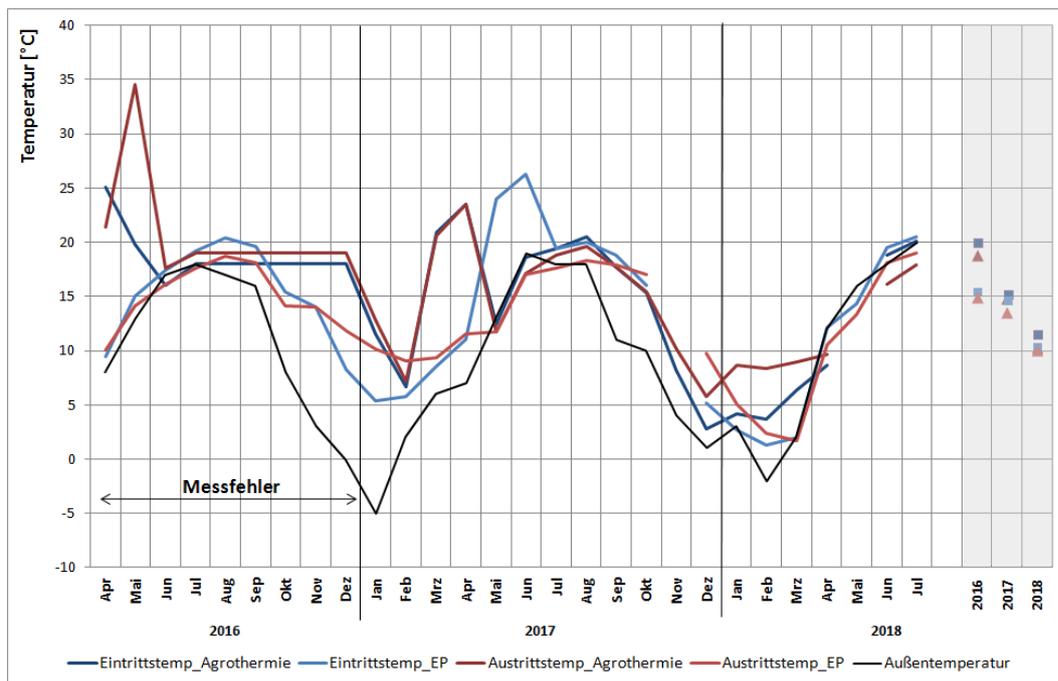


Abbildung 148: Monatsmittel der Ein- und Austrittstemperaturen des Übertragers, 2015 – 2017

## Wärmepumpe

Im Durchschnitt konnte im Messzeitraum eine Jahresarbeitszahl für die Wärmepumpen von 4,0 bis > 5,0 erzielt werden. Werden die monatlichen Arbeitszahlen der Anlage betrachtet, so ist festzustellen, dass die Wärmepumpe durchgängig im effizienten Bereich arbeitet und die Zielwerte gemäß Datenblatt der Wärmepumpen mit einem gesamt COP von 4,6 sogar überschreitet.

Tabelle 65 Messdaten der Wärmepumpen

	2016 (ab Apr.)	2017	2018 (bis Juli)
Jahresarbeitszahl WP1/WP2	5,59/5,88	4,32/5,32	3,58/4,95

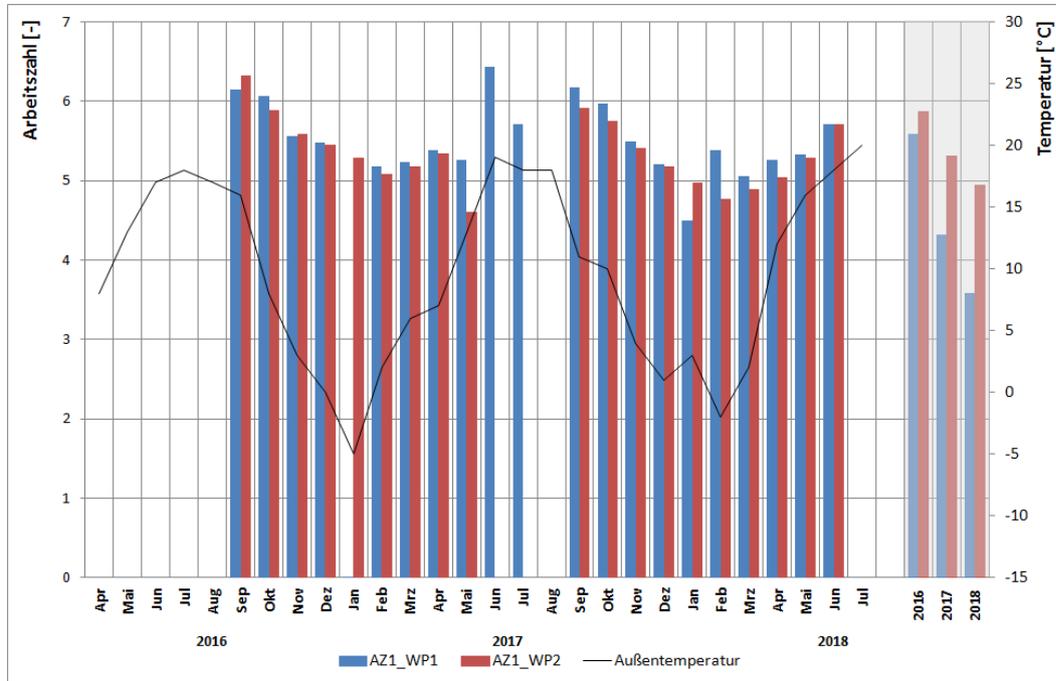


Abbildung 149 Monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpen, 2016 – 2018