

Abschlussbericht

EnOB: future:heatpump_II - Erweiterung und Ausbau des Vordimensionierungs- programms WP_{SOURCE}

Vorhabens- bezeichnung:	EnOB: future:heatpump_II - Erweiterung und Ausbau des Vordimensionierungsprogrammes
Kurztitel:	<i>future:heatpump II</i>
Antragsteller:	Steinbeis Innovation gGmbH Willi-Bleicher-Straße 19, 70174 Stuttgart
Bearbeitung	siz energieplus Hamburger Straße 277, 38114 Braunschweig
Ansprechpartner	Dipl. Ing. Franziska Bockelmann franziska. bockelmann@siz-energieplus.de 0531 - 793893 80
Bearbeiter	Dipl.-Ing. Franziska Bockelmann (Projektleitung) Dipl.-Ing. Markus Peter Henning Roggenkamp, M. Sc. Dipl.-Ing. Mathias Schlosser
Förderung / Förder- kennzeichen	<p>Gefördert durch:</p>  <p>Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz</p> <p>aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages</p> <p>Förderkennzeichen: FKZ 03ET1605</p> <p>Projektlaufzeit: 10/2018 bis 06/2022</p>
Stand:	19.12.2022

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03ET1605 gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	5
2	Abstract	5
3	Projektvorstellung und Ziele	7
4	Stand von Wissenschaft und Technik	10
4.1	Stand der Wissenschaft und Technik.....	10
4.2	Ausgangslage und Stand WPSOURCE	10
5	AP1 – Sonderkomponenten und –systeme, Systemergänzungen	13
5.1	Ergänzende Niedertemperaturwärmequellen und -übertrager.....	13
5.1.1	Grabenkollektoren	14
5.1.2	Energiespundwand	14
5.1.3	Eisspeicher mit Solar-Luft-Absorber.....	14
5.1.4	direkte Gewässernutzung.....	15
5.1.5	Kaltes Nahwärmenetz	15
5.1.6	Naturwärmespeicher	15
5.1.7	eTank	16
5.2	Gegenüberstellung der Niedertemperaturwärmeübertrager	16
6	AP2 – Wärmepumpentechnologie	22
6.1	Technologie	22
6.1.1	Elektrische Kompressionswärmepumpe	23
6.1.2	Adsorptionswärmepumpe	23
6.1.3	Absorptionswärmepumpe	24
6.1.4	Gasmotor Wärmepumpen	25
6.1.5	Brauchwasser-Wärmepumpen	26
6.1.6	Hybrid-Wärmepumpen	26
6.2	Gegenüberstellung der Technologien	26
6.3	Marktanteile und Absatzzahlen	28
6.4	Kombination von Wärmepumpentechnologie und Niedertemperaturwärmequelle.....	30
6.5	Ökologische und ökonomische Bewertung	31
6.6	Wärmepumpentechnologie – Einbindung in WPSOURCE	33
7	AP3 – Regeneration erdgekoppelter Systeme	34
7.1	Regeneration und Wärmequelle.....	34
7.2	Solarthermie zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung	37
7.2.1	Solarkollektoren und deren Anwendung.....	37
7.2.2	Einbindung von Solarthermie in WPSOURCE	39
8	AP4 – Kopplung von Photovoltaik und Wärmepumpe	41
8.1	Konzepte mit Photovoltaik und elektrischem Speicher	41
8.1.1	Power-to-Heat oder PV-Überschussregelung	42
8.1.2	Regelung des Stromverbrauchs und PV-Strom Verteilung	43
8.1.3	Elektrischer Speicher.....	43

8.1.4	Zusammenfassung	45
8.2	Photovoltaikmodule	47
8.2.1	Modulvergleich und Gegenüberstellung	49
8.3	Elektrische Speicher	49
9	AP5 – Kühlung	54
10	AP6 – Bivalenter Betrieb der Wärmeerzeuger	55
11	AP7 – Siedlungen und Quartiere	58
11.1	Netztypologien	58
11.1.1	Konventionelles Nahwärmenetz mit zentraler Wärmepumpe	58
11.1.2	Kaltes Nahwärmenetz mit dezentralen Wärmepumpen	59
11.1.3	Mischnetz	60
11.2	Liste der betrachteten Quartiere und Siedlungen	61
11.3	Quervergleich der Versorgungskonzepte von Quartieren und Siedlungen	63
11.3.1	Netztypologie	63
11.3.2	Niedertemperaturwärmequellen	63
11.3.3	Temperaturniveau der Vorlauftemperaturen im Netz	65
11.3.4	Durchschnittliche Jahresarbeitszahl	66
11.3.5	Versorgungsgebiet	67
11.3.6	Wärme- und Kältebereitstellung sowie -bedarfe	69
11.4	Implementierung von Siedlungen und Quartieren in WPSOURCE	70
12	AP8 – Erweiterung der betrachteten Standorte	71
13	AP9 – Monitoring	76
13.1	Grundlagen Monitoring	77
13.2	Bilanzgrenzen der Wärmepumpe	77
13.3	Monitoringgebäude	78
13.4	Quervergleich der Gebäude- und Anlagenkonzepte	80
13.4.1	Wärmebereitstellung	80
13.4.2	Temperaturniveau Quelle und Senke	81
13.4.3	Anlageneffizienz - Jahresarbeitszahl	82
13.4.4	Wärmeentzug Niedertemperaturwärmeübertrager	83
13.4.5	Ökologische Auswertung	84
13.4.6	Fazit des Monitorings	86
14	AP10 – Erweiterung und Ergänzung von WPSOURCE	87
14.1	Änderung der Berechnungsmethode	87
	Photovoltaikanlage	87
14.1.1	Rechenmodell und Ansatz von WPSOURCE 1.0	88
14.1.2	Neues Rechenmodell und Vorgehen in WPSOURCE 2.0	89
14.2	Berechnung der Lastprofile (Wärmebedarf und Strombedarf)	90
14.2.1	Heizlastprofil	90
14.2.2	Trinkwarmwasser / Haushaltsstrom	93
14.3	Bilanzierung der Energieströme und Bemessung der Energieversorgung	93

14.3.1	Energieströme und Bilanzen	93
14.3.2	Verwendete Modelle und Annahmen.....	95
14.4	Berechnungsablauf in WPSOURCE 2.0	102
14.5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in WPSOURCE	103
14.5.1	Investitionskosten	104
14.5.2	Jahresgesamtkosten	105
15	TRNSYS-Simulation	107
15.1	Zusätzliche Niedertemperaturwärmequellen und –übertrager in WPSOURCE 2.0.....	107
15.1.1	Grabenkollektor	108
15.1.2	Energiespundwand	108
15.1.3	Eisspeicher mit Solar-Luft-Absorber.....	108
15.1.4	Direkte Gewässernutzung (offene Gewässer)	109
15.1.5	Kaltes Nahwärmenetz	109
15.2	Validitätskriterien der Niedertemperaturwärmequellen und –wärmeübertrager.....	109
16	Zusammenfassung und Ausblick.....	111
16.1	Ergebnisse und Auswertungen der Themenschwerpunkte.....	112
16.1.1	Wärmepumpentechnologie.....	112
16.1.2	Bivalenter Betrieb	112
16.1.3	Photovoltaik	113
16.1.4	Regeneration	113
16.1.5	Solarthermie	114
16.1.6	Kühlung.....	114
16.1.7	Nahwärmeversorgung – Siedlungen und Quartiere	115
16.1.8	Standorte	116
16.1.9	Monitoring	116
16.2	Ausblick – Erweiterungspunkte für WPSOURCE.....	117
17	Öffentlichkeitsarbeit.....	118
17.1	Studentische Bearbeitungen	118
17.2	Veröffentlichungen und Vorträge.....	118
17.3	Workshops.....	119
18	Quellen und Literatur zum Projekt	120
19	Abkürzungsverzeichnis und Legende	122
20	Anhang	124
20.1	Anlage 1 – Steckbriefe Wärmeübertrager	124
20.2	Anlage 2 – Steckbriefe Regeneration.....	130
20.3	Anlage 3 – Steckbriefe Gebäude	138

1 Kurzfassung

Wärmepumpen werden immer häufiger in der Energieversorgung von Gebäuden eingesetzt, wodurch neben der Vielfalt der am Markt angebotenen Wärmepumpen auch die Anzahl möglicher Niedertemperaturwärmequellen und -wärmeübertrager steigt. Um die Vorplanung und Auswahl von Wärmepumpenanlagen sowie deren Wärmequellen und -übertrager entsprechend zu erleichtern, wurde das kostenfreie, Excel-basierte Vordimensionierungsprogramm WP_{SOURCE} entwickelt. Mit dem Programm WP_{SOURCE} steht ein multifunktionales und in der frühen Planungsphase in weiten Bereichen anwendbares Hilfsmittel zur projektspezifischen und an die jeweiligen Rahmenbedingungen angepassten Vorauswahl und überschlägigen Dimensionierung geeigneter Niedertemperaturwärmequellen und -wärmeübertrager für Wärmepumpen zur Verfügung. Im Detail bietet WP_{SOURCE} einen Überblick über die resultierende energetische Effizienz, die Investitions- und Betriebskosten sowie die ökologischen Auswirkungen verschiedener Systeme mit unterschiedlichen Wärmequellen. Der Einsatzbereich des Programms liegt dabei in der Grundlagenermittlung, der Planung und der Erstellung von ersten Gebäudeenergiekonzepten.

Vorrangig deckt WP_{SOURCE} den Bereich der Wärmeversorgung von Wohn- und Bürogebäuden mittels Wärmepumpe ab. Zusätzlich kann nun in der Version 2.0 auch die Einbindung eines zweiten Wärmeerzeugers, einer Photovoltaikanlage, einer Batterie und/oder einer Solarthermieanlage zur Trinkwassererwärmung und/oder Heizungsunterstützung als auch die Kühlung von Bürogebäuden berücksichtigt werden. Mittels Recherchen, Vorarbeiten sowie Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen werden Effekte und Szenarien der Betrachtungsschwerpunkte untersucht und fließen im Anschluss in WP_{SOURCE} ein.

Neben der Erweiterung von WP_{SOURCE} wird die Nahwärmeversorgung von Siedlungen und Quartiere als auch die Erweiterung auf weitere Klimazonen bewertet und analysiert. Weiterhin wird das Betriebsverhalten von Gebäuden mit einem bivalenten Heizbetrieb und unterschiedlichen Wärmeübertragungssystemen messtechnisch analysiert. Hinsichtlich des Themas Regeneration des Erdreichs werden Systemkonfigurationen erarbeitet und ausgewählte Effekte der Regeneration von erdgekoppelter Wärmepumpensysteme bewertet.

2 Abstract

Heat pumps are being used more and more frequently in the energy supply of buildings, which means that in addition to the variety of heat pumps available on the market, the number of possible low-temperature heat sources and heat exchangers is also increasing. In order to facilitate the preliminary planning and selection of heat pump systems as well as their heat sources and heat exchangers, the free, Excel-based pre-dimensioning program WP_{SOURCE} has been developed. WP_{SOURCE} is a multi-functional tool that can be used in a wide range of applications in the early planning phase for the project-specific pre-selection and approximate dimensioning of suitable low-temperature heat sources and heat exchangers for heat pumps, adapted to the respective framework conditions. In detail, WP_{SOURCE} provides an overview of the resulting energetic efficiency, the investment and operating costs as well as the ecological effects of different systems with different heat sources. The program field of application is in the basic evaluation, planning and preparation of initial building energy concepts.

WP_{SOURCE} primarily covers the area of heat supply for residential and office buildings using heat pumps. In addition, the integration of a second heat generator, a photovoltaic system, a battery and/or a solar thermal system for domestic hot water heating and/or heating support as well as the cooling of office buildings can now be taken into account in version 2.0. By means of research, preliminary work, parameter studies and sensitivity analyses, the effects and scenarios of the main areas of consideration are investigated and then incorporated into WP_{SOURCE}.

In addition to the expansion of WP_{SOURCE}, the local heating supply of neighborhoods as well as the expansion to other climate zones will be evaluated and analyzed. Furthermore, the operating behavior of buildings with

a bivalent heating system and different heat transfer systems will be analyzed using measurement technology. With regard to the topic of regeneration of the ground, system configurations are developed and selected effects of the regeneration of ground coupled heat pump systems are evaluated.

3 Projektvorstellung und Ziele

Wärmepumpentechnologie wird bei der zukünftigen Wärme- und Kälteversorgung eine immer wesentlichere Rolle spielen. Um das Potential dieser Energieversorgungsvariante möglichst effizient ausschöpfen zu können, kommt der Wahl der Niedertemperaturwärmequelle und des für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeigneten Wärmeübertragers eine entscheidende Bedeutung zu. Mit dem Programm WP_{SOURCE} steht ein multifunktionales und bei der Planung in weiten Bereichen anwendbares Hilfsmittel zur projektspezifischen und an die jeweiligen Rahmenbedingungen angepassten Vorauswahl und überschlägigen Dimensionierung geeigneter Niedertemperaturwärmequellen und -wärmeübertragern für Wärmepumpen zur Verfügung. Aufbauend auf den Ergebnissen und Erfahrungen aus dem Projekt future:heatpump (FKZ 03ET1273A) ergeben sich für die Projektfortführung mit future:heatpump_II unterschiedliche Themen und neue Zielrichtungen.

Das Kernziel der Projektfortführung ist die Erweiterung und Optimierung des zur Vorauslegung von Niedertemperaturwärmequellen und -wärmeübertragern für Wärmepumpen entwickelten Vordimensionierungsprogramm WP_{SOURCE}. Die Erweiterung und Optimierung der auf Microsoft Excel basierenden Anwendung bezieht sich auf die folgenden Themen:

- Implementierung von Sonderbauformen von Niedertemperaturwärmeübertragern,
- Berücksichtigung einer bivalenten Betriebsweise zweier Wärmeerzeuger (z. B. Grundlast (Wärmepumpe) und Spitzenlast (Gaskessel)),
- Erweiterung des Anwendungsspektrums des Programms auf Systeme mit passiver und aktiver Gebäudekühlung für Bürogebäude,
- Einbindung von Photovoltaik zur Stromerzeugung und Solarthermie zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung,
- Einbeziehung des Haushaltsstroms der betrachteten Gebäude,
- gesamtökologische Bewertung der betrachteten Gebäude und Ableitung der Eigenstromdeckungsanteile.

Future:heatpump_II ist in 10 zum Teil miteinander verwobenen Arbeitspaketen unterteilt (Abbildung 1).

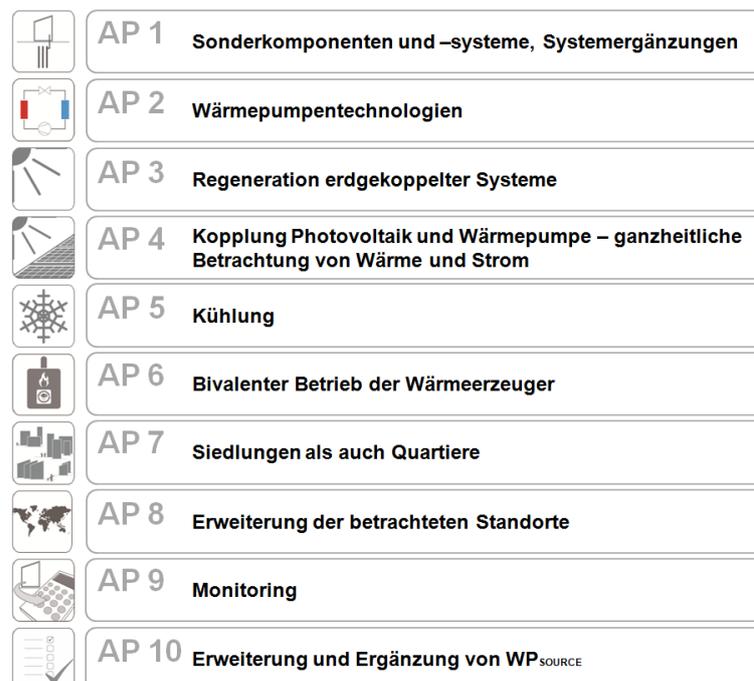


Abbildung 1 Arbeitspakete im Forschungsprojekt future:heatpump_II

Innerhalb des Projektes werden die folgenden Arbeitspakete bearbeitet:

AP 1 – Sonderkomponenten und –systeme, Systemergänzungen

Mit Blick auf eine in Zukunft zu erwartende Marktrelevanz werden bisher nicht berücksichtigte Niedertemperaturwärmequellen und – wärmeübertrager für Wärmepumpen, Sonderbauform von Anlagenkomponenten und bislang nicht in WP_{SOURCE} integrierte Systemkonfigurationen in das Programm eingepflegt.

Neben der Recherche und Konfiguration der Systeme hinsichtlich der Kubatur, des Aufbaus und der Bauweise werden die Ergebnisse und Auswertungen zu den Niedertemperaturwärmequellen in das Programm integriert. Parallel erfolgt die Fortschreibung der Investitionskosten sowie der ökologischen und ökonomischen Bewertung.

AP 2 – Wärmepumpentechnologien

Bisher werden in WP_{SOURCE} elektrische Wärmepumpen mit ON-OFF Betriebsweise, im Fall von Luft-Wasser-Wärmepumpe auch Inverterausführungen (Option zur Leistungsregelung) betrachtet. Nun werden darüber hinaus alternative Wärmepumpentechnologien wie z. B. Absorptions-, Adsorptions- oder leistungsgeregelte Wärmepumpen unterschiedlicher Bauformen untersucht.

Es wird ermittelt, inwieweit die unterschiedlichen Wärmepumpentechnologien mit den im Programm dargestellten Wärmeübertragern und Niedertemperaturwärmequellen gekoppelt werden können. Die erarbeiteten Konzepte werden bezüglich ihrer Einbindung in WP_{SOURCE} überprüft. Auf der Grundlage der Ergebnisse und weiterer relevanter Angaben werden Kenndaten sowie Rand- und Betriebsbedingungen und die Investitionskosten für die Wärmepumpen und Niedertemperaturwärmeübertrager ermittelt.

AP 3 – Regeneration erdgekoppelter Systeme

Ausgewählte Effekte einer Regeneration erdgekoppelter Wärmepumpensysteme, z. B. durch Abwärme oder die thermische Nutzung von Sonnenenergie, werden untersucht und bewertet sowie Konzeptansätze erarbeitet, die energetisch, ökologisch aber auch ökonomisch sinnvoll sind.

Neben der Regeneration erdgekoppelter Systeme wird eine direkte Nutzung von thermischer Solarenergie als Wärmequelle für die Wärmebereitstellung betrachtet. Eine Erweiterung von WP_{SOURCE} auf Kombianlagen zur solarunterstützten Erwärmung von Trinkwasser und solaren Unterstützung der Raumheizung in Ein- und Mehrfamilienhäusern erfolgt. Anfallende Investitions- und Energiekosten werden eingebunden.

AP 4 – Kopplung PV und Wärmepumpe - ganzheitliche Betrachtung von Wärme und Strom

Die Nutzung von elektrischer Energie aus einer zu der jeweiligen Liegenschaft gehörenden Photovoltaikanlage wird in WP_{SOURCE} eingebunden. Die in diesem Zusammenhang zu diskutierende Eigenstromnutzung bedeutet eine verstärkte Deckung des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe durch die Photovoltaikanlage und eine erhöhte Verwendung von PV-Strom im Haushalt (z. B. Licht, Haushaltsgeräte und IT). Neben der Eigenstromnutzung werden die verbleibende Einspeisung in das öffentliche Netz quantifiziert und der Einfluss bei einer Einbindung von Batterien abgeschätzt. Unter Berücksichtigung der Einspeisevergütung von PV-Strom erfolgt auch zu diesem Punkt eine Ermittlung der Kosten.

AP 5 - Kühlung

Seitens der Anlagenhersteller, Haustechnikplaner und Architekten besteht ein großes Interesse, Kühlmöglichkeiten in das Programm zu integrieren. Der Fokus liegt auf den Bürogebäuden, eine Kühlung in Wohngebäuden wird noch ausgesetzt.

Für Bürogebäude wird die passive und aktive Kühlung in das Programm aufgenommen. Kühlung wird für maximal drei ausgewählte Wärmeübertragungssysteme analysiert und dokumentiert.

Die Ergebnisse und Auswertungen zur Kühlung von Gebäuden über die Niedertemperaturwärmequellen werden ins Programm aufgenommen. Es erfolgt eine Fortschreibung der Investitionskosten sowie eine ökologische und ökonomische Bewertung.

AP 6 – Bivalenter Betrieb

Eine monovalente Betriebsweise kann unter technischen aber auch unter ökologischen und/oder ökonomischen Aspekten nicht sinnvoll sein. Besonders für Büros und andere Nicht-Wohngebäude, aber auch für Mehrfamilienhäuser, kann eine Heizungsanlage, die einen bivalenten Betrieb gestattet zweckmäßig sein. In diesem Zusammenhang wird eine Wärmepumpe meist vorrangig zur Deckung der Grundlast herangezogen. Ein weiterer Wärmeerzeuger dient zur Deckung der Spitzenlast.

Die Ergebnisse und Auswertungen zu weiteren Wärmeerzeugern für einen bivalenten Betrieb der Energieversorgung werden ins Programm integriert. Für die betrachteten bivalenten Wärmeversorgungen erfolgt die Weiterführung der Investitionskosten und die ökologische und ökonomische Bewertung.

AP 7 – Erweiterung der Betrachtungen auf Siedlungen und Quartiere

Ganzheitliche Energiekonzepte und Planungen gehen vermehrt in Richtung der Versorgung von Siedlungen oder sogenannten „Quartieren“, auch mittels Wärmepumpen. Dabei bilden Nahwärmenetze mit Wärmepumpen zukünftig ein wichtiges Infrastrukturelement. Die Einbindung von Wärmepumpen in Nahwärmenetze kann die Erschließung von zuvor ungenutzten und natürlichen Niedertemperaturwärmequellen zur Wärmebereitstellung ermöglichen.

Im Projekt werden Grundlagen erarbeitet und aus betrachteten Beispielnetzen lassen sich unterschiedliche Szenarien für eine zukunftsorientierte Nahwärmeversorgung von Quartieren mit Wärmepumpen entwickeln. Die Konzepte unterscheiden sich in den Netztemperaturen, Betriebsweisen und nutzbaren Niedertemperaturwärmequellen sowie in den Einsatzgebieten.

AP 8 – Erweiterung der betrachteten Standorte

Bezüglich der Erweiterungsmöglichkeiten des Programms auf einen größeren geographischen Betrachtungsraum ist eine Untersuchung geplant. Dabei sollen Möglichkeiten WP_{SOURCE} auf europäische Standorte wie etwa Stockholm, Zürich, Athen, Helsinki oder Straßburg zu erweitern evaluiert werden.

Neben den Klimadaten und länderspezifischen Gebäudestandards werden im besonderen Maße die jeweiligen geologischen Bedingungen betrachtet.

AP 9 – Low-Level Monitoring

Die begleitende Evaluierung von ausgeführten Anlagen und Technologieansätzen in der Praxis ist eine entscheidende Voraussetzung zur Verifizierung der im Programm WP_{SOURCE} zusammenfließenden Ergebnisse und Inhalte. Die verschiedenen Objekte werden in ihrer Umsetzung und Einbindung der Energieversorgung dokumentiert und vergleichend gegenüber gestellt. Wesentliche Unterschiede bzw. Parallelen werden herausgearbeitet.

AP 10 – Aktualisierung und Erweiterung von WP_{SOURCE}

In diesem Arbeitspunkt werden Reaktionen, Hinweise und Anmerkungen von Nutzern der ersten öffentlich verfügbaren Programmversion bewertet und ggf. in einer Aktualisierung von WP_{SOURCE} berücksichtigt. Des Weiteren werden neue Erkenntnisse, Produkte und Daten oder in der Praxis gewonnene Erfahrungen, z. B. aus Anlagenvermessungen sowie aus den anderen Arbeitspaketen, in das Programm integriert.

4 Stand von Wissenschaft und Technik

4.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung ist die Möglichkeit unterschiedliche Ausführungsvarianten einer geplanten Technologie im Planungsprozess vergleichen zu können sehr hilfreich und wünschenswert. Um die Frage nach der für einen speziellen Anwendungsfall ökologisch, ökonomisch und anlagentechnisch sinnvollsten Variante einer Anlage beantworten zu können, sind in Bezug auf Wärmepumpen im Planungsalltag oft aufwändige Recherchen notwendig. Die den meisten Planern üblicherweise zur Verfügung stehenden Unterlagen und Informationen zu einzelnen Produkten oder Anwendungen lassen eine direkte Gegenüberstellung verschiedener Anlagenvarianten für einen speziellen Anwendungsfall meistens nicht zu. Aber auch nach umfassender Recherche ist selten ein direkter Vergleich unterschiedlicher Anlagenkonzepte auf der Basis wesentlicher Randbedingungen möglich.

Insbesondere bei Wärmepumpenanlagen müssen mehr als bei konventionellen Wärme- und Kälteerzeugern bereits während der Vorplanung Entscheidungen, z. B. bezüglich der Niedertemperaturwärmequelle (und -senke) und ihre Anbindung an die Wärmepumpe getroffen werden sowie bei der Wahl des Wärmeübertragers alle im Rahmen der Vorplanung ermittelten und für den jeweiligen Anwendungsfall relevanten Bedingungen Berücksichtigung finden. Eine breit angelegte, vergleichende Analyse der am Markt verfügbaren Niedertemperaturwärmequellen und zugehörigen Wärmeübertrager sowie der daraus resultierenden Anlagenvarianten, vor allem im Hinblick auf deren Effizienz (z. B. Arbeitszahlen), war bisher nicht vorhanden. Ein erster Schritt wurde mit dem Programm WP_{SOURCE} unternommen.

Neben der Auswahl der Niedertemperaturwärmequelle ist der Betrieb und die Einbindung von Wärmepumpen in das Versorgungskonzept relevant. Hier ist grundsätzlich darauf zu achten, dass für eine saisonal genutzte Wärmequelle, wie etwa das Erdreich, eine ausgeglichene Wärmebilanz im Jahreszyklus angestrebt wird. Da eine Wärmepumpe in Ein- und Mehrfamilienhäusern jedoch meist ausschließlich zur Wärmebereitstellung genutzt wird, muss eine Wärmequelle ggf. aktiv regeneriert werden. Zur Ergänzung und/oder Regeneration der Wärmequellen können Anlagenerweiterungen in Form von thermischen Solaranlagen in das Energiekonzept integriert werden.

Für die Bereitstellung der benötigten elektrischen Energie der Wärmepumpe als auch des Gesamtstrombedarfs wird zunehmend darauf geachtet, dass eine PV-Anlage in das Energieversorgungskonzept integriert wird. Für die Umsetzung einer PV-Anlage in Kombination mit einer Wärmepumpe sprechen u. a. die Steigerung des Eigennutzungsanteils am PV-Ertrag sowie die regenerative Stromerzeugung an sich. Lokal erzeugter regenerativer Strom wird dabei direkt am Ort und der Erzeugung verbraucht.

Infolgedessen werden immer häufiger Energiekonzepte mit Solarthermie, Photovoltaik, Wärmepumpen und Geothermie geplant und umgesetzt. Auslegungshilfen, wie etwa eine dynamische Simulation, werden bei diesen Systemkombinationen zunehmend wichtiger. Die im Bereich von Wärmepumpen und deren Niedertemperaturwärmequellen sowie –wärmeübertragern derzeit am Markt verfügbaren Auslegungs- und Dimensionierungshilfen sind in der Regel Einzellösungen, die vielfach von Herstellern oder Anbietern entsprechender Produkte zur Verfügung gestellt werden.

4.2 Ausgangslage und Stand WP_{SOURCE}

Ausgangslage für das Forschungsprojekt ist der Stand des Vordimensionierungsprogrammes WP_{SOURCE} (Version 1.1) aus dem Forschungsprojekt „future:heatpump – Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen“ (Fkz 03ET1273A).

In der Version 1.1 des Programms können folgende Auswahlkriterien und Analysepunkte ausgewählt werden

- Gebäudetypologien: Ein- und Mehrfamilienhaus sowie Bürogebäude
- Niedertemperaturwärmeübertrager: Erdwärmesonde, Flächenkollektor, Erdwärmekorb, Spiralsonde, Brunnen und Abwasser sowie eine Luft-Wasser-Wärmepumpe

- die Wärmepumpen werden in monovalenter Betriebsweise gefahren

Das Programm umfasst den Heizfall sowie die Ermittlung der Heizlast und des Energiebedarfs aus Heizung und Trinkwarmwasser.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt anhand einer Gegenüberstellung der unterschiedlichen Wärmeübertrager in Bezug auf deren Flächenbedarf, die Investitionskosten und den Bedarf an nicht regenerativer Energie sowie weiterer Kenngrößen wie etwa der Anlageneffizienz in Form des Coefficient of Performance (COP).

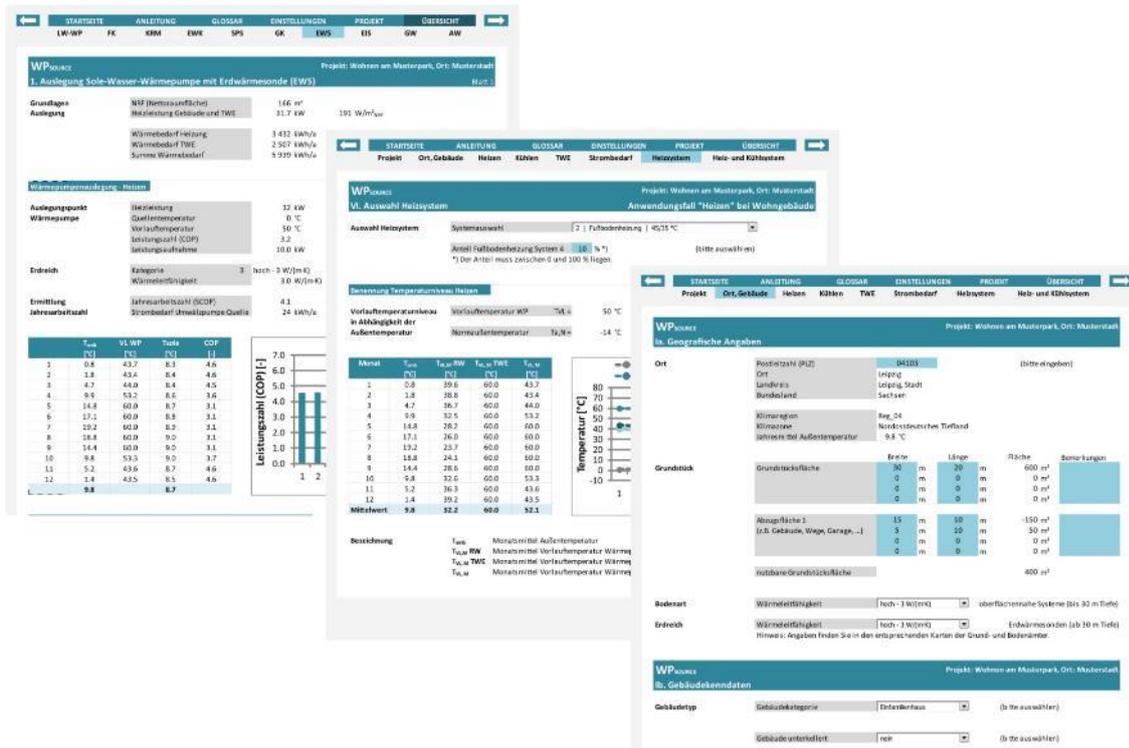


Abbildung 2 Beispiele der Benutzeroberfläche von WP_{SOURCE} (Version 1.1)

Um bereits im Rahmen der Vorplanung dem Planer und Bauherren die Bewertung geeigneter Wärmepumpensysteme sowie deren Niedertemperaturwärmequellen und –übertrager zu erleichtern, aber auch um die Verbreitung der Wärmepumpentechnologie im Allgemeinen voranzubringen, ist eine übersichtliche Zusammenstellung unterschiedlicher technologischer Ansätze hilfreich. WP_{SOURCE} steht für die Nutzung durch eine breite Anwenderschaft zur Verfügung. Unterschiedliche Detaillierungsgrade und Gesichtspunkte bei den Projektierungen und Planungen von Wärmepumpenanlagen werden Rechnung getragen.

Die Bedienung (Abbildung 3) von WP_{SOURCE} beginnt mit der Dokumentation und Spezifikation der Ausgangssituation und der Randbedingungen des jeweiligen Projektes. Nach der Eingabe allgemeiner Projektdaten gibt der Nutzer u. a. bekannte Kennwerte, wie etwa die Grundstücksfläche, den Gebäudetyp (Ein- oder Mehrfamilienhaus oder Bürogebäude) und dessen thermischen Standard sowie ggf. Energiebedarfswerte ein. Darüber hinaus trifft der Nutzer Festlegungen bezüglich des auszulegenden Heiz- und/oder Kühlsystems. Aus diesen Eingaben und weiteren, projektspezifischen Auswahlmöglichkeiten zum Gebäude, wird vom Programm der Heizenergiebedarf sowie die Heizlast ermittelt.

Grundsätzlich kann sowohl ein Anwender mit detaillierten Kenntnissen und Rahmendaten zu einem Projekt und die zu erstellende Wärmepumpenanlage ebenso vom Programm profitieren, wie ein Nutzer mit nur groben Projektinformationen. Je nach Informationsstand kann der Gebäude z. B. durch Angaben

aus einer EnEV/GEG-Bilanzierung, nach eigenen Angaben zum Heizenergieverbrauch oder an Hand der Baualtersklasse definieren. In Abhängigkeit vom Heizleistungsbedarfs des definierten Gebäudes verwendet WP_{SOURCE} zur weiteren Berechnung Wärmepumpen mit entsprechender Leistung. Die Kenndaten der im Programm implementierten Wärmepumpen wurden aus Daten einer Vielzahl von am Markt relevanten Geräten generiert. Die für das Programm analytisch generierten Geräte repräsentieren Wärmepumpen mittlerer Güte für die jeweilige Leistung und dienen zu programminternen Berechnungen, z. B. von Arbeitszahlen.

Über die mittlere monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpe und den ermittelten monatlichen Heizwärmebedarf wird die notwendige Entzugsenergie aus der Niedertemperaturwärmequelle berechnet. Diese Entzugsenergie bildet eine wesentliche Grundlage bei der Auswahl und (überschlägigen) Dimensionierung der Niedertemperaturwärmequelle.

Auf der Basis der Eingaben und der im Programm hinterlegten Funktionen leitet WP_{SOURCE} die benötigten Größen zur Vorauswahl und überschlägigen Dimensionierung geeigneter Niedertemperaturwärmequelle und zugehöriger Wärmeübertrager für einen individuellen Anwendungsfall ab. Auch ökologische (CO₂-Emission, Primärenergie) und wirtschaftlichen Faktoren (Investitions- und Betriebskosten) für die unterschiedlichen Niedertemperaturwärmequelle/Wärmeübertrager-Kombinationen werden dokumentiert.

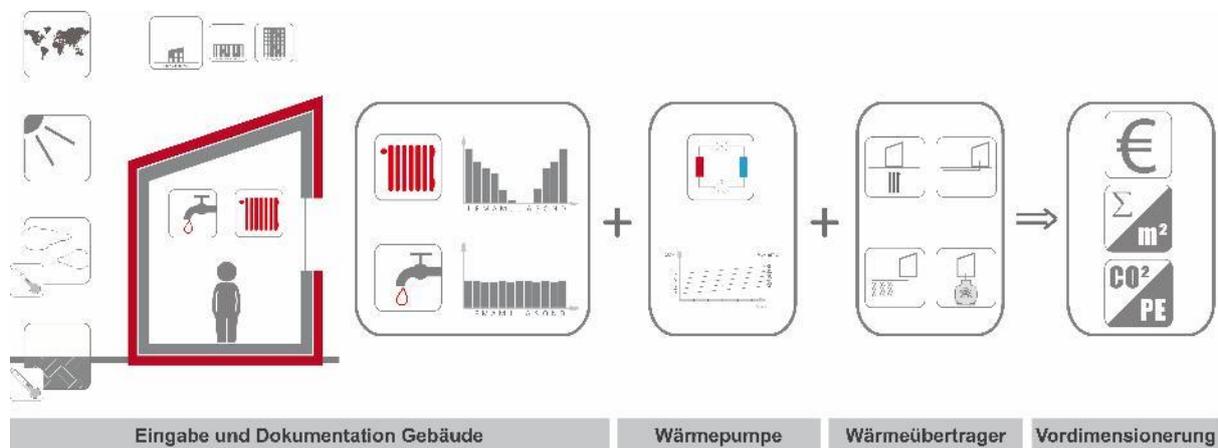


Abbildung 3 Schema zum Aufbau und Informationsfluss in WP_{SOURCE} (Version 1.1)

5 AP1 – Sonderkomponenten und –systeme, Systemergänzungen

Im Hinblick auf zukünftige und neu zu erwartende Marktrelevanz von Niedertemperaturwärmequellen und –wärmeübertrager für Wärmepumpen werden die bisher im Forschungsprojekt future:heatpump als auch im Vordimensionierungsprogramm WP_{SOURCE} (Version 1.1) nicht berücksichtigte Niedertemperaturwärmequellen und –wärmeübertrager erfasst und dargestellt. Neben der zu erwartenden Marktrelevanz berücksichtigt die Auswahl der Komponenten und Systeme auch deren Innovationsgrad. Im Zusammenhang mit der Marktrecherche werden neben den Systemen auch die zugehörigen Kosten (Stand 2021) und Bauweisen dokumentiert.

5.1 Ergänzende Niedertemperaturwärmequellen und -übertrager

Im Folgenden werden die ergänzenden Niedertemperaturwärmeübertrager mit ihren Randbedingungen und Einflussfaktoren näher erläutert.

Da im Laufe des Forschungsprojektes durch die Firmen der Wärmeübertrager *Naturwärmespeicher* und *e-Tank* keine Unterstützung gewährleistet werden konnte, werden die Übertragersysteme an dieser Stelle mit aufgeführt, aber im Vordimensionierungsprogramm nicht eingepflegt.

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 in WP_{SOURCE} werden für die fünf ausgewählte Systeme Steckbriefe erstellt. Diese befinden sich im Anhang unter Anlage 1 – Steckbriefe Wärmeübertrager.

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) (Stand 2021)
- Einsatzgebiete
- Randbedingungen und Bemerkungen zum Wärmeübertrager

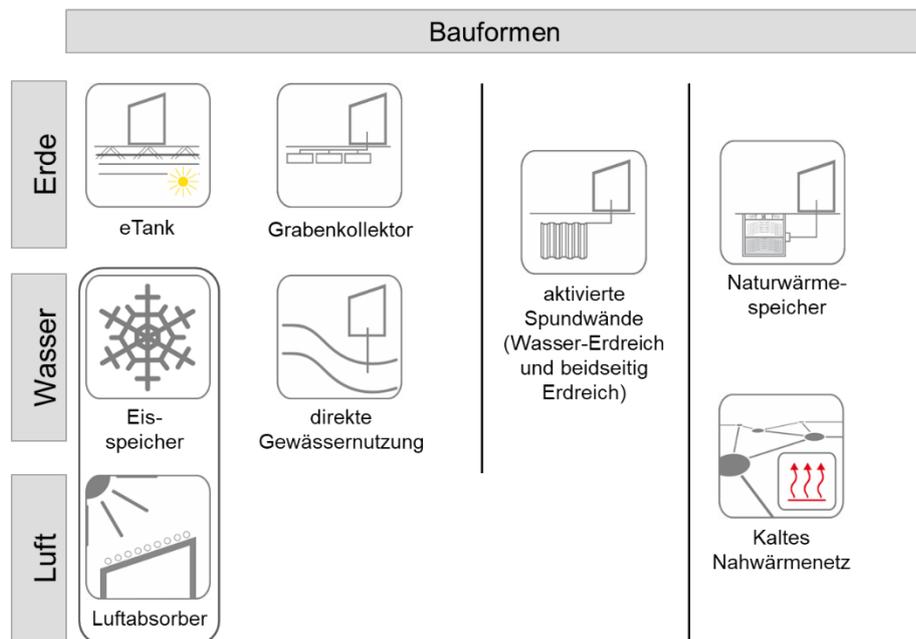


Abbildung 4 Auswahl / Kategorien der in future:heatpump_II ergänzten Wärmeübertragersysteme

5.1.1 Grabenkollektoren

Die Wärmeübertragung erfolgt über vollflächige Absorbermodule, die senkrecht im Erdreich – in Gräben – verlegt werden. Ihre Bauform und Anordnung beruht auf einer hohen Oberfläche sowie einer Strangverlegung der Module. Mit Hilfe der Übertrager und dem darin zirkulierenden Wärmeträgermedium wird die Wärme dem Erdreich entzogen bzw. eingetragen. Grabenkollektoren werden in eine Tiefe von max. 2,50 m verlegt. Die Verlegung von Grabenkollektoren schließt die Verlegung in trockenen Kiesböden, in felsigem Untergrund sowie unter versiegelten Flächen aus. Eine Überbauung ist generell nicht möglich.

5.1.2 Energiespundwand

Energiespundwände sind eine Kombination aus handelsüblichen Spundwandprofilen und einem Wärmetauscherrohrsystem, welches an die Spundwände angeschweißt wird. Durch den modularen Aufbau können große Kollektorflächen gebildet und genutzt werden. Das Verfahren beruht auf einer oberflächennahen geothermischen und hydrothermalen Nutzung nahe der Oberfläche aus Flüssen, Seen oder das Meer mit seinen Buchten, Hafenanlagen und Deichen. Über die dort vorhandenen oder geplanten Schutz- und Stützbauwerke - Spundwände - wird die Wärme aus dem Erdreich aufgenommen oder ihm zugeführt. Die thermische Aktivierung der Bauteile bietet den Vorteil, dass gegebene Strukturen durch die Integration von Wärmetauscherrohren zur Energiegewinnung herangezogen und so eine Doppelnutzung und Synergieeffekte (statisch und thermisch) der Stahlbauwerke erzielt werden können.

Aufgrund der zahlreichen Einsatzmöglichkeiten von Spundwänden im Wasser- und Spezialtiefbau eröffnet sich für Energiespundwände ein breites Anwendungsfeld. Ein besonders hoher Wirkungsgrad kann erreicht werden, wenn die thermische Energie von stehenden oder fließenden Gewässern genutzt werden kann.

5.1.3 Eisspeicher mit Solar-Luft-Absorber

Als Wärmequelle dient das Wasser in einem Wasserspeicher, welcher meist aus Beton besteht und im Erdreich eingelassen wird. Der Speicher 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 (Sommer) wird der Eisspeicher über die Solar-Luft-Absorber, Solarthermie oder Abwärme (u.a. Kühlung des Gebäudes im Sommer) regeneriert bzw. wieder aufgetaut.

5.1.4 direkte Gewässernutzung

Im Zuge der direkten Gewässernutzung wird in der Regel, wie der Name schon sagt, das Wasser aus den Gewässern (See, Fluss, Hafenbecken, etc.) direkt genutzt. Das Wasser wird dem Gewässer mittels einer Förderpumpe entnommen. Um das Gewässer vor dem Eintrag schädigender Substanzen als auch den Verdampfer der Wärmepumpe vor Verschmutzung zu schützen, wird mittels Wärmeübertrager eine Systemtrennung installiert. Das Gewässer kann auch für die Gebäudekühlung (freie Kühlung oder mittels rev. Wärmepumpe) im Sommer genutzt werden.

Ein Pumpstest sowie eine Wasserprobe sollten vorab wie bei Brunnen-Anlagen umgesetzt werden.

Die Randbedingungen für die Temperaturerhöhung des Gewässers müssen beachtet werden. Der Schutz der Oberflächengewässer wird durch ein Zusammenspiel verschiedener Vorschriften auf europäischer und nationaler Ebene gewährleistet. Die EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), die detaillierte Bewirtschaftungsvorgaben zur Nutzung der Gewässer beinhaltet, bildet den Kern. Deren Anforderungen wurden durch das Wasserhaushaltsgesetz in nationales Recht umgesetzt.

Derzeit erschwert das deutsche Wasserrecht den Einsatz der direkten Gewässernutzung von Wärmepumpen. Die hocheffiziente und in der Schweiz schon lange erfolgreiche Technologie ist in Deutschland noch kaum erschlossen und keinesfalls ausreichend in Betracht gezogen worden. Der Verantwortungsbereich der Wasserbehörden für die Wärmepumpen mit Oberflächengewässer ist nicht klar, zudem wurden dort auch kaum Wasserrechtsanträge gestellt. Die Bewertungen und die Auflagen durch die Behörden können daher auch sehr unterschiedlich und vielfältig sein.

5.1.5 Kaltes Nahwärmenetz

Kalte Nahwärme ist eine technische Variante eines Wärmeversorgungsnetzes und werden meist auch als Anergienetze bezeichnet und fallen in die Kategorie der „5th generation district heating and cooling“ (Fernwärme und -kälte der Fünften Generation).

Der wesentliche Unterschied zwischen konventionellen und kalten Nahwärmenetzen ist die geringere Temperatur des Wärmeträgermediums im "kalten" Netz. Im Gegensatz zu konventionellen Nahwärme- oder Fernwärmenetzen wird die "Quellenwärme" (im Bereich von 5 bis 35 °C) über ein Leitungsnetz geführt und das Netz als Wärmereservoir für dezentrale Wärmepumpen genutzt. Mithilfe dezentraler Wärmepumpen in den angeschlossenen Gebäuden wird dem Netz Wärme entzogen und auf ein höheres Temperaturniveau zur Raum- und Trinkwarmwassererwärmung gebracht. Da die Netztemperatur der kalten Nahwärme vergleichsweise nah der Umgebungstemperatur liegt, fallen Wärmeverluste gegenüber konventionellen Nahwärme- oder Fernwärmenetzen deutlich geringer aus. Aus diesem Grund werden die Rohrleitungen für kalte Nahwärmenetze teilweise ohne oder nur mit geringer Wärmedämmung ausgestattet. Zudem erlaubt das geringe Temperaturniveau die simultane Produktion von Wärme und Kälte.

Kalte Nahwärmenetze können von den unterschiedlichsten, meist regenerativen, Wärmequellen gespeist werden. Besonders gut geeignet sind die kalten Nahwärmenetze, wo verschiedene Arten von Bebauung (Wohngebäude, Gewerbe, Supermärkte etc.) existieren und sowohl Wärme als auch Kälte erforderlich ist.

5.1.6 Naturwärmespeicher

Der Naturwärmespeicher verbindet mehrere Wärmequellen zu einem. Das Brunnen-/ Eisspeichersystem vereint das Erdreich, die Luft, die Sonneneinstrahlung als auch das Wasser als Wärmequelle. Er nutzt die Umgebungsluft und kombiniert sie mit einem integrierten Latentwärmespeicher. Der Naturwärmespeicher ist

modular aufgebaut und besteht aus drei Einheiten: Einem flachen Wasserbecken an der Oberfläche (obere Zone), einem größeren Wasservolumen im unteren Bereich (untere Zone) sowie einem Luftkanal (mittlere Zone) zwischen beiden Wasserkörpern. Der Luftkanal sowie das obere Wasserbecken bilden eine Einheit, die auf dem großen Wasserreservoir schwimmt. In jeder dieser Funktionseinheiten befinden sich Wärmetauscher. Je nachdem welche Einheit die wärmste Quelle darstellt, wird auf diese zugegriffen. Zu warmen Zeiten wird die Wärme der Umgebungsluft direkt zum Heizen genutzt. Die Luft wird in den Luftkanal gezogen und der zentral platzierte Lüfter bläst die abgekühlte Luft wieder hinaus. In längeren Heizperioden wird durch Vereisung dem Wasser im unteren Bereich Energie entzogen – Eisspeicher. Das kleine Wasserbecken an der Oberfläche reagiert sehr schnell auf veränderte klimatische Bedingungen. So erwärmt es sich im Frühjahr durch Sonneneinstrahlung und ist somit eine Wärmequelle zur effizienten Wärmegewinnung. Im Sommer kann der Naturwärmespeicher zur Kühlung des Gebäudes genutzt werden.

5.1.7 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.

5.2 Gegenüberstellung der Niedertemperaturwärmeübertrager

Bei der Wahl der Niedertemperaturwärmequelle und dem entsprechenden Wärmeübertragersystem 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. Tabelle 1 führt für die ausgewählte Wärmeübertrager die zu beachtenden Randbedingungen und Einflussfaktoren auf. Dabei wird auf die wesentlichen klimatischen und geologischen Einflüsse sowie Nebenbedingungen eingegangen.

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 im Vergleich zur konventionellen Erdwärmesonde 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 Wärmeübertragertechnologie bestimmt werden müssen. Hierzu gehören auch die Zusammensetzung und Beschaffenheit des Bodens.

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 / Rege- neration
Grabenkollektor	X	X		X	X		X			
Energiespundwand		X	X	(X)		X	(X)	X		
Eisspeicher mit Solar-Luft-Absorber	(X)		(X)	X	X	(X)	X			
direkte Gewässer- nutzung	X		X			X				
Kaltes Nahwärmenetz										
Naturwärme- speicher			(X)	X	X					
eTank			(X)	X			X			X

Tabelle 2 Überblick der Wärmeübertragersysteme (Mittelwerte der Herstellerangaben)

Übertragungssystem	Quelle	Abmessungen Überträger	Einbautiefe	Entzugsleistung	Randbedingungen
Erdwärmesonden	Erdreich	Bohrloch Ø 75 - 180 mm	50 - 400 m	30 - 100 W/m	Abstand zwischen Sonden einhalten Vorschriften / Randbedingungen der Bundesländer beachten genehmigungspflichtig
Grabenkollektor	Erdreich (solare Einstrahlung, Niederschlag)	0.89 m x 0.35 m (Model 1) 7 m x 1.20 m (Model 2)	max. 2,5 m	100 - 2.000 W/Modul	keine Überbauung möglich außerhalb tiefwurzelnder Bäume
Energiespundwand	Erdreich und Wasser	Spundwandbohle Breite 0.50 - 0.75 m Absorberrohr 25 x 3.0 mm	bis 25 m (Absorberrohr) Spundwandbohle kann Länger sein	150 - 500 W/m	-
Eisspeicher mit Solar-Luft-Absorber	Erdreich (solare Einstrahlung, Niederschlag) Luft (solare Einstrahlung)	Eisspeicher Ø bis 2.7 m Höhe bis 4.0 m und Sonderanfertigungen Absorber 2.0 - 4.0 m x 1.0 - 1.5 m	bis 10 m tief Absorber auf dem Dach oder Aufstellung	Eisspeicher 4 - 10 kW Solar-Luft-Absorber 60 - 100 W/m ²	großer Wärmebedarf -> großer Speicher System zur Regeneration erforderlich (Absorber, Solarthermie) auch Kühlung im Sommerfall möglich keine Bohrung, kein Umweltrisiko Grundwasserschutz
direkte Gewässerernutzung	Wasser	Leitungsrohr	nahe der Wasseroberfläche (4 - 40 m Entnahme und 20 - 60 m Rückgabe) und > 35 m von der Uferkante entfernt	auslegungsabhängig	gewässerschutz / wasserrechtliche Erlaubnis / Bewilligung erforderlich Voraussetzung: Wasser- und Naturschutz beachten! Schutz der Wasserbeschaffenheit (stofflich, Temperatur) Pumpstest und Wasserprobe hilfreich
Kalte Nahwärme	Erdreich, Luft, Wasser, Abwärme Vielzahl an Quellen einbindbar	Leitungsrohr	> 1.0 m frosthfreie Verlegung der Rohrleitung	auslegungsabhängig	-
Naturwärmespeicher	Erdreich, Luft, Wasser (solare Einstrahlung)	Ø 2.2 - 3.8 m bzw. 5.20 x 2.6 m flexibel erweiterbar	2.0 m	400 - 1.300 W/m ³	keine Überbauung
eTank	Erdreich (solare Regeneration)	Sonderanfertigung	1.50 m	50 - 80 W/m ³	System zur Regeneration erforderlich (Absorber, Solarthermie)

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

Abbildung 5 stellt die spezifische Wärmeentzugsleistung der vorgestellten Wärmequellen dar. Die Auswertungen zeigen, dass die Einsatzbereiche der einzelnen Wärmeübertrager vielfältig sind und voraussichtlich für viele Einsatzbereiche Anwendung finden können. Der Wärmeentzug der aufgeführten Systeme liegt zwischen ca. 50 W/m³ bis 1.300 W/m³ bzw. 30 W/m bis 500 W/m. In den meisten Fällen werden die Wärmeübertrager auf Tiefen von < 25 m abgeteuft.

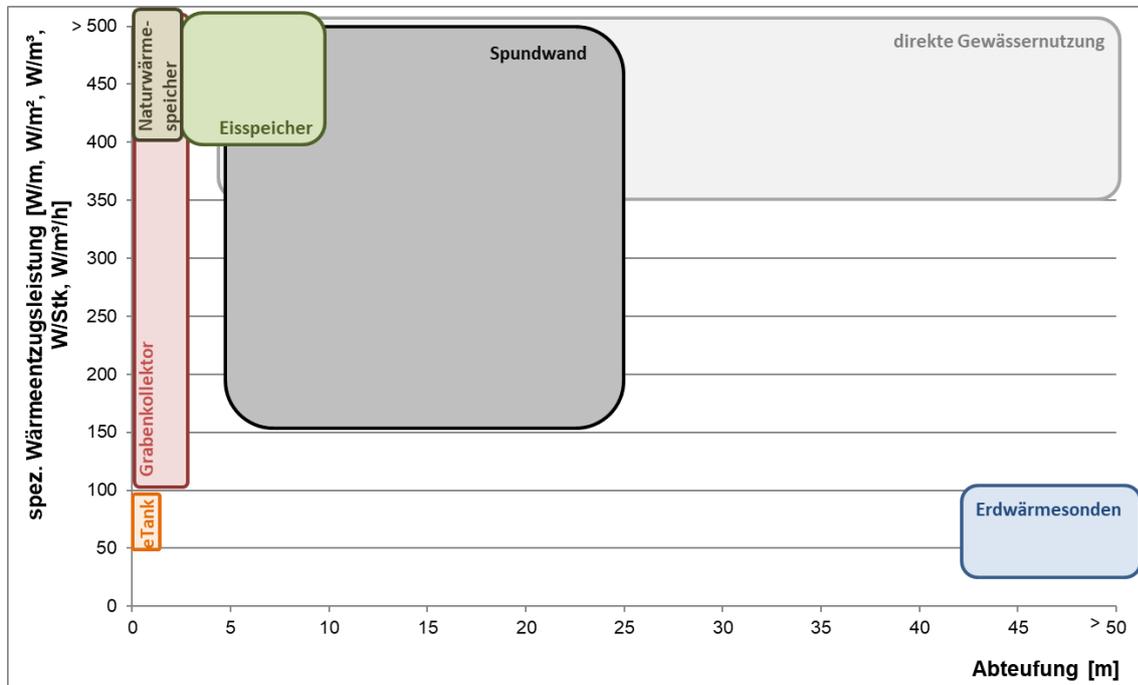


Abbildung 5 Gegenüberstellung verschiedener Wärmeübertrager im geothermischen Wärmequellenbereich – Entzugsleistung über Abteuftiefe nach Herstellerangaben

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 nicht überbaut werden. Hierzu zählen z. B. die Grabenkollektoren, welche zur Regeneration des Bodens den Niederschlag und die solare Einstrahlung über das Jahr benötigen.

Einige Systeme benötigen z. B. Zusatzeinrichtungen und/oder -komponenten zur Regeneration. Beispielsweise erfordert das System Eisspeicher oder ein eTank zur Regeneration bzw. zur Beladung mit Wärme einen Solar-Luft-Absorber oder eine Solarthermieanlage (z. B. Flach- oder Röhrenkollektor).

Zum besseren Verständnis wird an einem Beispiel der Flächenbedarf für die 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.

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

Übertragungssystem	Abmessungen Übertrager	Abstände (zwischen den Übertragern und zu Grenzen etc.)	angenommene Entzugsleistung	Anzahl	Anmerkung	Flächenbedarf gesamt [m ²]
Erdwärmesonden	Ø 0.18 m	6 m	35 W/m	2	Sondenlänge 100 m	64.3
Grabenkollektor	0.89 x 0.35 m	0.70 m bis 1 m	800 W/Stk	9	-	11.7
Energiespundwand	Länge 25 m Breite 0.75 m	2 m	285 W/m	1	eine aktivierte Spundwand	2.1
Eisspeicher	Ø 2.7 m	2	7.5 kW	1	10 m ³ Eisspeicher und 20 m ² Absorber erforderlich	17.3
Solar-Luft-Absorber	-	-	500 W/m ²	-	-	15.0
direkte Gewässernutzung	jeweils 1 Einleitung und Entzugsstelle				2 x 50 m Rohr ins Gewässer	50.0
Kalte Nahwärme	jeweils 1 Vor- und Rücklaufleitung zum Netz				2 x 50 m Hausanschluss	50.0
Naturwärmespeicher	Ø 2.2 m Tief 2.0 m	2 m	6 - 10 kW	1	-	13.9
eTank	100 m ³ Speichereinheit Tiefe 1.50 m	Aushub 10 x 10 m	~ 10 kW/m ³	1	12 - 14 m ² Flachkollektor zusätzlich erforderlich	100.0

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

Bei den in Abbildung 6 angegebenen Flächen handelt es sich um einen „Mindestflächenbedarf“ der einzelnen Wärmeübertragungssysteme. 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 2,0 m den größten Flächenbedarf aufweisen. Dies ist damit zu erklären, dass diese Systeme Wärmeübertragerflächen repräsentieren, die im Wesentlichen in horizontaler Ebene wirken. Beim der direkten Gewässernutzung wird ein Flächenbedarf von rund 50 m² angenommen, der eigentlich nur theoretisch zu betrachten ist. Die Rohre, die in das Gewässer geführt werden nehmen wie die anderen Systeme keinen Bauplatz in Anspruch.

Im aufgezeigten Fallbeispiel wird nur die Heizperiode (Heizfall) betrachtet. Die Integration einer Gebäudekühlung würde je nach Randbedingungen und Bodeneigenschaften den Flächenbedarf am Standort verringern.

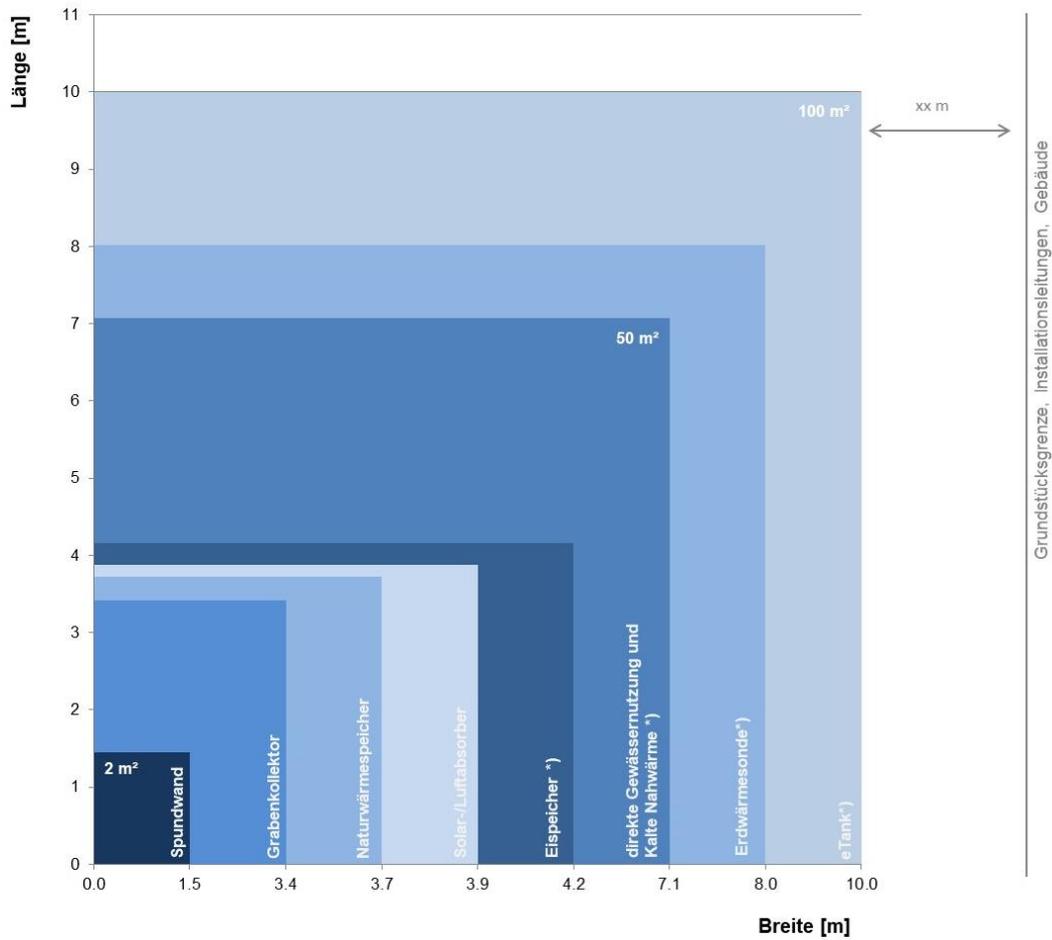


Abbildung 6 Flächenbedarf der einzelnen Wärmeübertrager für das Beispielgebäude im Heizfall ohne Berücksichtigung einer Kühlung – überbaubare Systeme sind mit *) gekennzeichnet

6 AP2 – Wärmepumpentechnologie

Auf dem deutschen Markt sind unterschiedlichste Wärmepumpentechnologien wie z. B. Absorptions-, Adsorptions- oder leistungsgeregelte Wärmepumpen verfügbar. Die Anwendung und Einbindung in Versorgungskonzepten für Gebäude konzentriert sich jedoch primär auf die elektrische Kompressionswärmepumpen. Gasbetriebene Wärmepumpen haben derzeit keine größere Bedeutung, können aber eine sinnvolle Lösung, z. B. für Bestandsgebäude mit vorhandenem Gasanschluss, darstellen.

Bei der Betrachtung und Analyse der Wärmepumpentechnologien wurden die gängigsten Wärmepumpen wie folgt kategorisiert:

- Art der Wärmequelle (Luft, Wasser, Sole)
- Art des zu beheizenden Systems, das heißt der *Wärmesenke* (Luft oder Wasser)
- Art der Antriebsenergie (elektrisch, Gas)
- Art des Verdichtungsprozesses (elektrisch, thermisch)
- Art der Leistungsregelung (ON/OFF, Inverter)
- aktuelle Marktsituation in Deutschland

6.1 Technologie

In den letzten Jahren erfolgte eine stetige Weiterentwicklung der Wärmepumpen. So besteht heute die Wahl zwischen Luftwärmepumpen, Erdwärmepumpen, Wasserwärmepumpen (siehe Abschnitt 6.4) oder auch zwischen Hybrid- und Mischsystemen.

Neben der klassischen elektrischen Kompressionswärmepumpe werden zunehmend, wenn auch derzeit ohne große Marktanteile, gasbetriebene Wärmepumpen und unterschiedliche Typologien von Sorptionswärmepumpen (thermisch verdichtenden Absorptions- und Adsorptionswärmepumpen) angeboten (Abbildung 7).

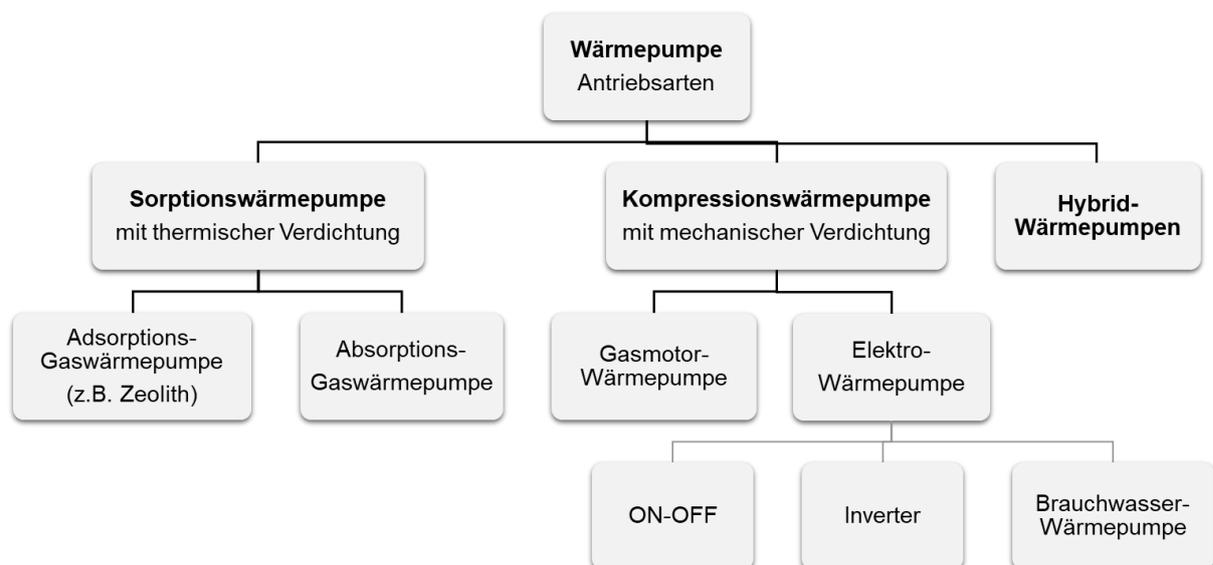


Abbildung 7 Aufteilung unterschiedlicher Wärmepumpentechnologien nach deren Antriebsart

6.1.1 Elektrische Kompressionswärmepumpe

Die elektrische Kompressionswärmepumpe überträgt unter Aufnahme von elektrischer Energie thermische Energie aus der Wärmequelle (mit niedrigerer Temperatur) auf ein zu beheizendes System mit höheren Temperaturen. Die Kompressionswärmepumpe nutzt dabei den physikalischen Effekt der Verdampfungswärme. Als Wärmequelle können somit alle Niedertemperaturwärmequellen angewendet werden. Derzeitige Standardprodukte der Kompressionswärmepumpe können das Heizwasser auf maximal 65 °C erwärmen. Sonderlösungen – auch Hochtemperaturwärmepumpen genannt- erzielen auch Temperaturen > 100°C. Die Kombination von elektrischer Kompressionswärmepumpe und Niedrigtemperaturheizsysteme (z. B. Fußbodenheizung) ist daher zu empfehlen.

Funktionsweise:

Das in der Wärmepumpe zirkulierende Kältemittel verdampft durch die aufgenommene Wärme aus der Niedertemperaturquelle (Verdampfer). Durch den Verdichter (Kompression) wird das gasförmige Kältemittel komprimiert und damit weiter erwärmt. Im Kondensator (Verflüssiger) gibt das Kältemittel seine Wärme an das Heizsystem des Gebäudes (Senke) ab und wird wieder flüssig.

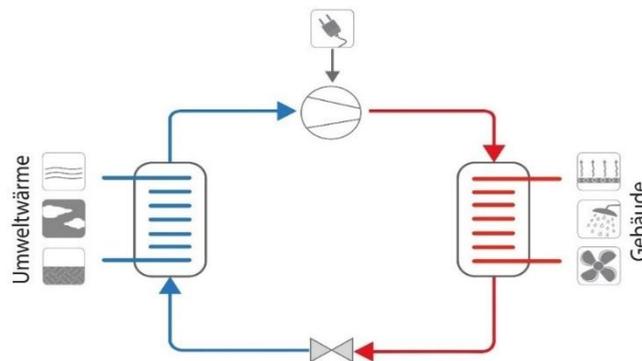


Abbildung 8 Schema einer elektrischen Kompressionswärmepumpe

Die elektrischen Wärmepumpen werden heutzutage neben der genutzten Quelle auch nach ihrer Verdichtertart unterteilt. Die ersten auf dem Markt verfügbaren Wärmepumpen als ON-OFF Geräte konstruiert, seit ca. 2015 gewinnt auch die Invertertechnik an Zuwachs.

Während die herkömmliche Regelung (ON-OFF) vorsieht, dass das Gerät entweder ein- oder ausgeschaltet wird, kann die Inverterwärmepumpe ihre Leistung modulieren und dem Heizwärmeanforderungen anpassen. Das bedeutet, dass die Standardwärmepumpe (ON-OFF) in Betrieb geht, wenn die Anforderung nach Heizungswärme anliegt und ausgeht, wenn die Forderungen nach Vorlauftemperatur oder Pufferspeichertemperatur erfüllt sind. Über die komplette Laufzeit wird der Wärmepumpenbetrieb unter Volllast umgesetzt.

Die Invertertechnik dagegen - je nach Modulationsbereich – kann den ganzen Tag bzw. über längere Zeit die geforderte Heizwärme zur Verfügung stellen, ohne zu takten, da der Betrieb über eine angepasste Leistung umgesetzt wird. Ein Vorteil von Wärmepumpen mit Inverter ist, dass die Wärmepumpe präzisere Vorlauftemperaturen bereitstellen kann, da sie ihre Leistung kontinuierlich der gewünschten Temperatur anpasst. Eine herkömmliche Wärmepumpe würde sich lediglich an und abschalten, um die Vorlauftemperatur zu regulieren. Sie ist daher deutlich träger und ungenauer.

6.1.2 Adsorptionswärmepumpe

Adsorptionswärmepumpen bestehen aus einem Wärmepumpenmodul und einem gasbetriebenen Brennwertgerät. Als Kältemittel kommt hier Wasser zum Einsatz sowie ein festes Sorptionsmittel (z. B. Zeolith) an dem das Kältemittel ad- oder desorbiert wird. Der Prozess beruht auf einem zyklischen Wechsel zwischen Wärmezufuhr (Desorption) und Wärmeentnahme (Adsorption), da das Sorptionsmittel nicht im Kreislauf umgewälzt werden kann.

Die Adsorptionswärmepumpe benötigt für den eigentlichen Sorptionsprozess eine Wärmequelle mit hohen Temperaturen, hierzu sind die Niedertemperaturwärmequellen nicht geeignet. Das hohe Temperaturniveau für den Sorptionsprozess wird mit einem herkömmlichen Brennstoff, beispielsweise Gas, erzeugt.

Funktionsweise

Wie bei der Kompressionswärmepumpe verdampft das zirkulierende Kältemittel (Wasser) durch die Wärmeaufnahme aus der Quelle. Der Wasserdampf adsorbiert (bindet sich an das Sorptionsmittel) und durch den chemischen Vorgang wird Wärme freigesetzt. Die Wärme wird genutzt, um das Heizungssystem zu versorgen. Das Sorptionsmittel kann jedoch nicht unendlich Wasser aufnehmen, so dass der Vorgang wieder rückgängig gemacht werden muss. Dies geschieht indem das Sorptionsmittel mittels des Gasbrennwertgerätes erhitzt wird (Desorption). Das Sorptionsmittel trocknet und das Wasser verflüssigt sich wieder. Die bei der Kondensation entstehende Wärme kann ebenfalls dem Heizsystem zugeführt werden. Sobald das Wasser wieder flüssig ist, ist der Kreislauf geschlossen und kann von neuem beginnen.

Damit das Kältemittel Wasser auch bei Umgebungstemperatur verdampfen kann, wird der Prozess unter Unterdruck umgesetzt.

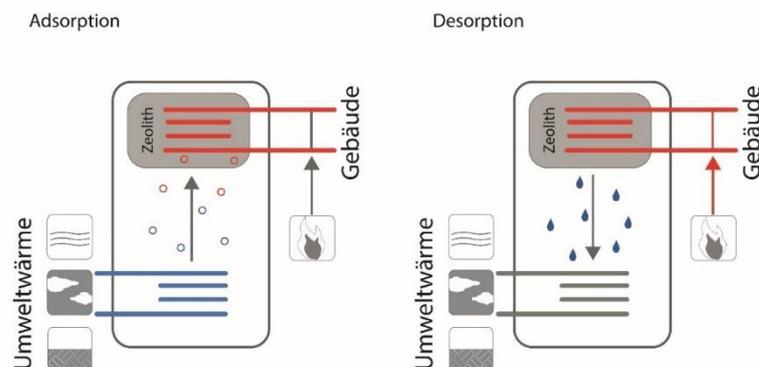


Abbildung 9 Schema einer Adsorptionswärmepumpe – Zustände Adsorption und Desorption

6.1.3 Absorptionswärmepumpe

Ähnlich wie die Adsorptionswärmepumpe basiert die Absorptionswärmepumpe auf dem Prinzip der Sorption, bei der das gasförmige Kältemittel in einem Sorptionsmittel, in diesem Fall in einer flüssigen Lösung aus Ammoniak und Wasser, absorbiert wird. Grundlage ist hier der physikalische Effekt der Reaktionswärme bei Mischung zweier Flüssigkeiten oder Gase.

In der Vergangenheit wurde Sorptionstechnik vorrangig bei der Kälteerzeugung angewendet. Sie ist daher in der Praxis meist in Kältemaschinen anzutreffen. Da im Bereich Sorptionstechnik im Allgemeinen hohe Temperaturen als Antriebsenergien benötigt werden, wie sie etwa aus industrieller Abwärme (z. B. > 50°C oder > 75°C) zur Verfügung stehen, sind Niedertemperaturwärmequellen, die üblicherweise von Wärmepumpen genutzt werden, für diese Technologie kaum geeignet. Aus diesem Grund sind Sorptionswärmepumpen in der Regel nur in Verbindung mit einer gasbetriebenen Wärmepumpe als Wärmequelle (Gasmotor, hohe Temperaturen durch Gasverbrennung) oder einer anderen Hochtemperaturwärmequelle umsetzbar.

Funktionsweise

Im Gegensatz zur Kompressionswärmepumpe verwendet die Absorptionswärmepumpe keinen elektrischen, sondern einen thermischen Verdichter.

Im Verdampfer wird unter Aufnahme von Umwelwärme das Kältemittel dampfförmig. Das Kältemittel wird im Absorber vom Lösungsmittel absorbiert. Durch die Kondensation wird Wärme frei gesetzt, die ebenfalls für Heizzwecke verwendet werden kann. Die flüssige Lösung (Ammoniak und Wasser) wird mit Hilfe der Lö-

sungspumpe auf das geforderte Druckniveau gebracht. Durch die Wärme im Austreiber - erzeugt durch Gasverbrennung – werden Kälte- und Lösungsmittel voneinander getrennt. Das gasförmige Kältemittel wird zum Kondensator geführt, das flüssige Lösungsmittel fließt zurück zum Absorber. Das Kältemittel kondensiert im Kondensator und die Wärme wird an das Heizsystem abgegeben. Durch das nachfolgende Drosselventil wird das Druckniveau und somit die Temperatur abgesunken. Der Kreisprozess kann von neuem beginnen.

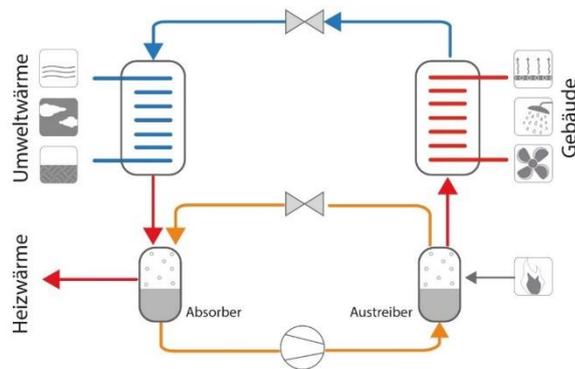


Abbildung 10 Schema einer Absorptionswärmepumpe

6.1.4 Gasmotor Wärmepumpen

Gasbetriebene Wärmepumpen stellen eine Alternative zu Gasbrennwertgeräten in Bestandsgebäuden dar. Gasmotorwärmepumpen und gasbetriebenen Sorptionsanlagen bauen auf der in Deutschland weit etablierte Gasbrennwerttechnik auf. Sie verbinden hocheffiziente Gasbrennwerttechnik mit der Nutzung von Umweltwärme.

Die gasbetriebene Wärmepumpe verbindet in diesem Fall die Kompression und die thermische Verdichtung. Während bei einer elektrischen Kompressionswärmepumpe ein Elektromotor den Kompressor zur Verdichtung des Arbeitsmittels treibt, geschieht dies bei einer Gasmotorwärmepumpe durch einen Gasmotor. Im Gegensatz zum elektrischen Antrieb wird die durch den Betrieb des Gasmotors entstehende Wärme ebenfalls zum Heizen, also als Nutzwärme, verwendet.

Funktionsweise:

Wie bei allen Wärmepumpentechnologien wird das in der Wärmepumpe zirkulierende Kältemittel durch die aufgenommene Wärme aus der Niedertemperaturquelle (Verdampfer) verdampft. Durch den Verdichter (Kompression) – mittels Gasmotor angetrieben - wird das gasförmige Kältemittel komprimiert und damit weiter erwärmt. Im Kondensator (Verflüssiger) gibt das Kältemittel seine Wärme an das Heizsystem im Gebäude (Senke) ab und wird wieder flüssig.

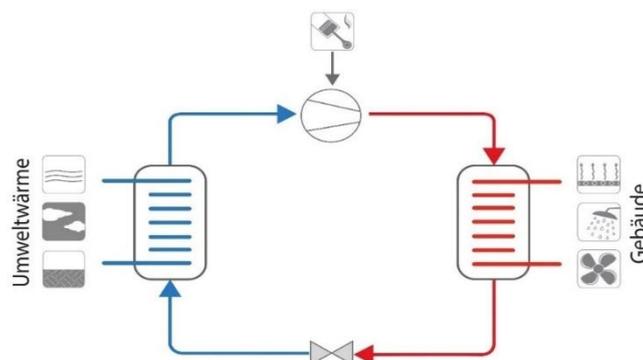


Abbildung 11 Schema einer Gasmotor Wärmepumpe

6.1.5 Brauchwasser-Wärmepumpen

Die Brauchwasserwärmepumpe – auch Warmwasserwärmepumpe – ist eine Luft-Wasser-Wärmepumpe und funktioniert wie die elektrische Kompressionswärmepumpe. Die Brauchwasserwärmepumpe wird ausschließlich für die Erwärmung des Brauchwassers im Haus eingesetzt. Brauchwasserwärmepumpen sind Innengeräte und werden z.B. in Waschkellern aufgestellt.

Im Rahmen der Technologien und Implementierung in WP_{SOURCE} wird sie nicht weiter betrachtet, da sie eine „Sonderform“ der elektrischen Kompressionswärmepumpe darstellt.

6.1.6 Hybrid-Wärmepumpen

Unter Hybrid-Wärmepumpen werden bivalente Systeme verstanden. Hybrid-Wärmepumpen sind meist kompakte Geräte als Kombination aus elektrischer Kompressionswärmepumpe und konventionellem Erzeuger (z.B. Gaskessel).

Im Rahmen der Technologien und Implementierung in WP_{SOURCE} wird die Hybrid-Wärmepumpe im Arbeitspaket „Bivalenter Betrieb“ weiter betrachtet.

6.2 Gegenüberstellung der Technologien

Der Vergleich der zuvor aufgeführten Wärmepumpentechnologien zeigt, dass sich die Betriebsweise und der Aufbau der einzelnen Bauformen teilweise nur wenig voneinander unterscheiden. Alle Technologien können zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung sowie, im reversiblen Betrieb, zur Kühlung eingesetzt werden. Der grundlegende Unterschied zwischen elektrischen Wärmepumpen und Gasmotor Wärmepumpen ist die Antriebsart des Kompressors. Der thermodynamische Kreisprozess ist bei beiden Bauarten identisch. Unterschiede bestehen nur in der Art der Verdichtung des Arbeitsmittels. Ein weiterer Unterschied, der aus der Technik herrührt: Durch ihre Betriebsweise nutzen Gaswärmepumpen bei gleicher Wärmeleistung weniger Umweltwärme als Elektrowärmepumpen. Vorteil ist, dass das Wärmeübertragungssystem kleiner dimensioniert werden kann und damit kostengünstiger ausgeführt werden könnte.

Neben der mechanischen Verdichtung gibt es die sogenannte thermische Verdichtung. Bei Sorptionswärmepumpen findet dieses Verfahren Anwendung. Der Ab- als auch Adsorptionsprozess findet unter Abgabe von Wärme statt, die zum Heizen genutzt wird.

Tabelle 4 sowie Abbildung 12 und Abbildung 13 fassen die hier betrachteten Wärmepumpentechnologien zusammen und stellen ihre Vor- und Nachteile dar.

Eine Gegenüberstellung der auf dem Markt verfügbaren Geräte nach ihren Nennwärmeleistungen (Abbildung 12) zeigt, dass das Spektrum der elektrischen als auch der Gasmotor Wärmepumpen am größten sind. Hier werden Geräte von 5 bis 100 kW Nennheizleistung produziert. Es ist anzumerken, dass die Geräte auch in Kaskade geschaltet und somit noch höhere Leistungen erzielt werden können. Die elektrische als auch die Gasmotor Wärmepumpe kann im Einfamilienhaus bis hin zu Nichtwohngebäuden und Industrie und in Versorgungsnetze Anwendung finden.

Die Adsorptionswärmepumpe war für den Einsatz in kleineren Heizleistungsbereichen, wie Ein- und Zweifamilienhäuser bis zu 10 kW eingeplant. Diese Geräte werden jedoch nicht mehr auf dem Markt angeboten. Für einen Nennheizleistungsbereich von 15 – 45 kW sind die Absorptionswärmepumpen anzuwenden. Sie können in Ein – und Mehrfamilienhäuser als auch im Nichtwohnungsbau Anwendung finden.

Ein Vergleich zwischen COP und Heizzahl kann nicht direkt gezogen werden. Beide Werte geben zwar das Verhältnis zwischen erreichter Nutzenergie zu eingesetzter Energie an, da es sich aber um zwei unterschiedliche Energiequellen (Strom und Gas) beim Energieaufwand handelt sind diese nicht miteinander zu vergleichen.

Elektrische Wärmepumpen erzielen je nach Niedertemperaturwärmequelle einen COP bis zu 6. Die Gasmotor Wärmepumpe als auch die Absorptionswärmepumpe liegen in einem Heizzahlbereich von 1,2 bis 2,0.

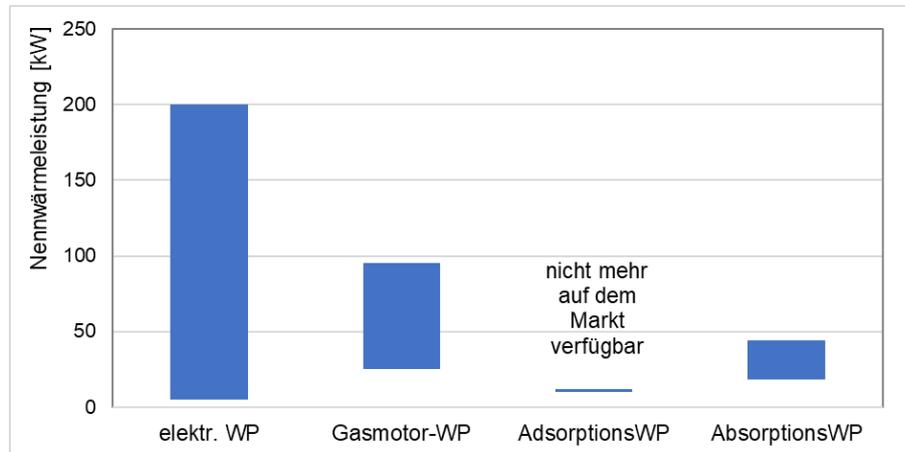


Abbildung 12 Gegenüberstellung der Nennheizleistung der betrachteten Wärmepumpentechnologien

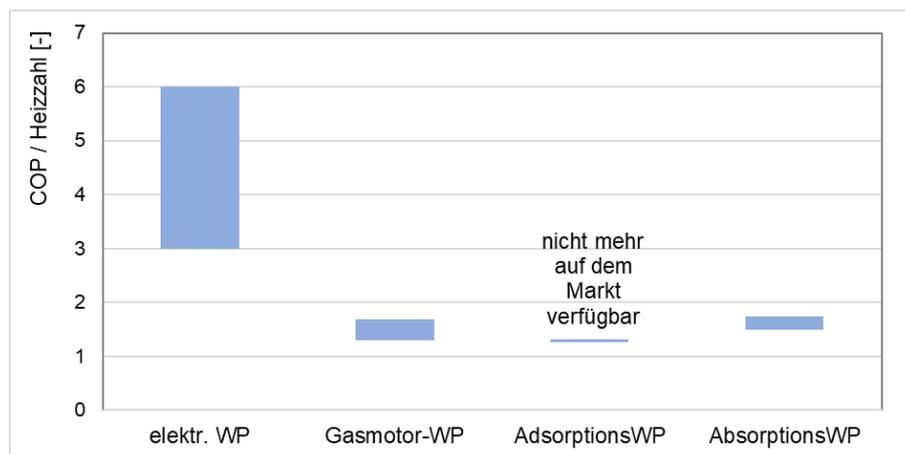


Abbildung 13 Gegenüberstellung der COP und Heizzahl der betrachteten Wärmepumpentechnologien

Tabelle 4 Unterschiede und Anwendungsfelder der betrachteten Wärmepumpentechnologien

	Elektrische Wärmepumpe	Gasmotor Wärmepumpe	Gasadsorptions-wärmepumpe	Gasabsorptions-wärmepumpe
Anbieter	> 10 Anbieter	~ 5 Anbieter	keine Anbieter mehr auf dem Markt	~ 3 Anbieter
Betriebsart / Medium	mechanischer Verdichter / elektrisch	mechanischer Verdichter / Gas	thermischer Verdichter / Gas; (Zeolith)	thermischer Verdichter / Gas
Temp.-Niveau der Quelle	je nach Quellenart (Luft, Wasser, Erdreich) -5 °C bis 25°C			
Vorlauf-temperatur	35 – 55 °C / 65 – 70 °C (Heizung / Trinkwarmwasser)		60 – 70 °C	
Nennheizleistung	5 – 200 kW und Sondermodelle	25 – 100 kW	bis 10 kW	15 – 45 kW
	(je Wärmepumpe, Kaskaden möglich)			
Anwendungsbereich	Ein- und Mehrfamilienhaus, Nichtwohngebäude (Bürogebäude, Krankenhäuser, ...) und Fernwärmenetze sowie Produktionsanlagen	Mehrfamilienhäuser (Neubau), Gewerbe und Industrie, Nichtwohngebäude, Bestandsbau	Ein- und Zweifamilienhausbau (Neubau und Bestand)	Ein- und Mehrfamilienhaus, Industrie, Gewerbe, Hotels und Dienstleistungsunternehmen, Bestandsbau und für Gebäude mit hohem Wasserbedarf
Vorteile	alle Niedertemperaturwärmequellen nutzbar		für eine einfache und effektive energetische Sanierung von Gasheizsystemen, da das vorhandene Wärmeverteil- und Übergabesystem größtenteils weiterverwendet werden kann (vorhandene Gasinfrastruktur meist nutzbar) Nutzung der Verbrennungswärme, daher bis zu 40% kleinere Niedertemperaturwärmequelle möglich die Wärme steht auf unterschiedlichen Temperaturniveaus zur Verfügung. kaum mechanisch bewegte Teile, daher besonders geräusch- und wartungsarm	
Nachteile	Investitionskosten und Platzbedarf für Quellsystem		Gasanschluss sowie Abgassystem erforderlich; größtenteils nur Luft-Wasser-Wärmepumpen auf dem Markt	

6.3 Marktanteile und Absatzzahlen

Die Absatzzahlen für elektrische Wärmepumpen werden jährlich vom Bundesverband Wärmepumpe (BWP) und dem BDH aufbereitet (Heizungs- und Warmwasserwärmepumpen). Für den Verkaufsraum Deutschland

ist festzustellen, dass in den Jahren 2016 – 2019 ein deutlicher Anstieg der elektrischen Wärmepumpe zu verzeichnen war. Von 70.000 Maschinen im Jahr 2015 hat der Absatz im Jahr 2019 die 100.000 Marke überschritten. In den Jahren 2020 und 2021 stiegen die Absatzzahlen dann noch einmal deutlich an, so dass 2021 mehr als 170.000 Wärmepumpen verkauft wurden. (Abbildung 14)

Absatzstatistiken zu den anderen betrachteten Wärmepumpentechnologien sind schwieriger zu bekommen bzw. werden nicht so ausführlich geführt. Die Anteile für die Gasmotor Wärmepumpe und die Sorptionswärmepumpen sind der „Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends“ (November 2017) vom GZB (internationales Geothermiezentrum Bochum) entnommen. Anhand des Absatzes ist zu erkennen, dass die Gassorptionsanlagen stetig steigen, aber im Verhältnis zu den elektrischen Wärmepumpen mit 2.500 Geräten in 2016 kaum eine Rolle am Markt spielen. Mit max. 200 Geräten pro Jahr fallen die Gasmotor Wärmepumpen noch weniger ins Gewicht. Es ist anzumerken, dass die Absatzzahlen für die Gassorptionswärmepumpe auf Schätzungen des BWP beruhen und laut GZB eher zu hoch angenommen wurden, da es nur wenige Anbieter und zu geringer Einsatzbereich für diese Anlagen gibt. Die Zahlen der Gasmotor Wärmepumpen beruhen auf Zahlen und Statistiken des BDEW und ASUE.

2008 schlossen sich Verbreitung von gasbetriebenen Wärmepumpen Hersteller und Gasversorger zur „Initiative Gaswärmepumpen“ zusammen, um die Technologie am Markt voran zu treiben. Anhand der Absatzzahlen ist festzustellen, dass die Gasmotor Wärmepumpe seit dem von 50 Geräten pro Jahr auf 200 Geräte angestiegen ist. Von großer Bedeutung bei der Energieversorgung sind sie leider nicht.

Die heutzutage am häufigsten angewendete und verkaufte Wärmepumpe ist die elektrische Kompressionswärmepumpe. Sorptionswärmepumpen als auch die Gasmotor Wärmepumpe sind am Markt gegenwärtig von geringer Bedeutung.

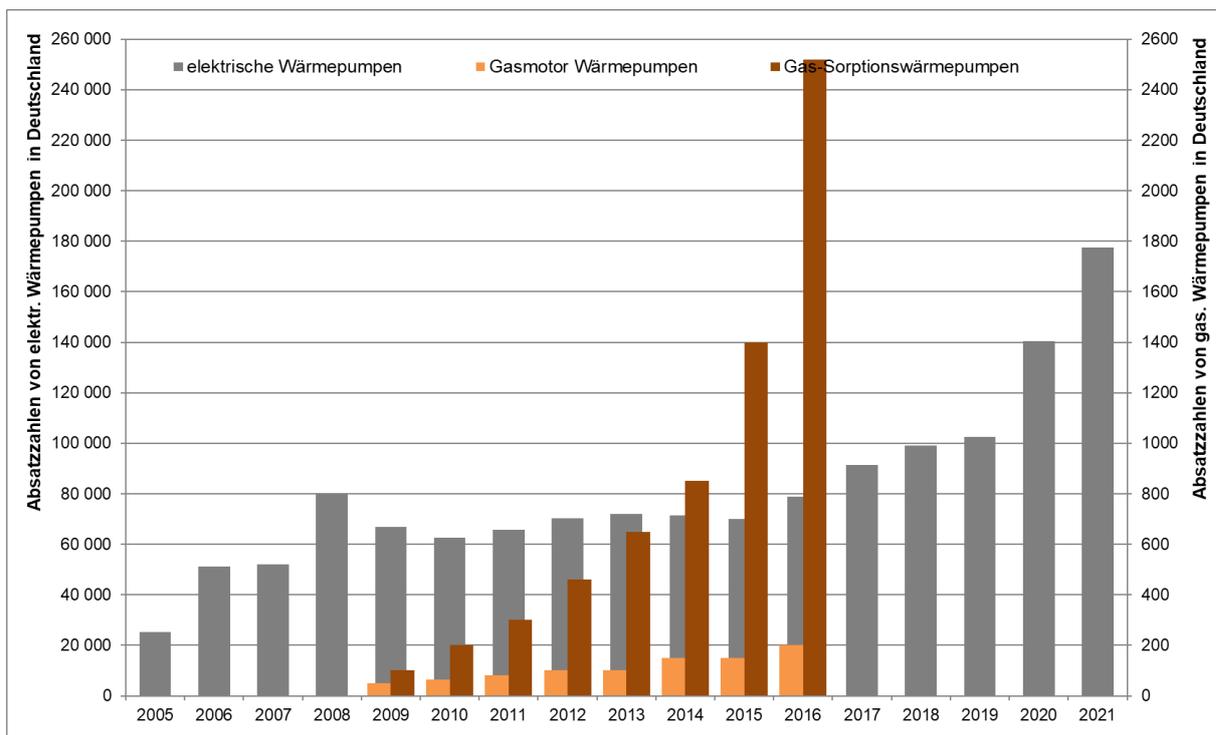


Abbildung 14 Absatzzahlen von elektrischen Wärmepumpen, Gasmotor Wärmepumpen sowie Sorptionswärmepumpen in Deutschland

6.4 Kombination von Wärmepumpentechnologie und Niedertemperaturwärmequelle

Im Rahmen der Forschungsarbeit und der Technologierecherche werden neben elektrischen Kompressionswärmepumpen auch gasbetriebene Wärmepumpen und unterschiedliche Bauarten von Sorptionswärmepumpen betrachtet.

Die Sorptionstechnik spielt in der Wärmebereitstellung, insbesondere bei Wohn- und / oder Bürogebäude, eine untergeordnete Rolle und wird weiterhin vorrangig bei der Kälteerzeugung angewendet. Aus diesem Grund ist sie in der Praxis meist in Kältemaschinen anzutreffen. Da im Bereich Sorptionstechnik vergleichsweise hohe Temperaturen als Antriebsenergie benötigt werden, sind Niedertemperaturwärmequellen, die üblicherweise von Wärmepumpen genutzt werden, für diese Technologie kaum geeignet. Aus diesem Grund sind Sorptionswärmepumpen in der Regel nur in Verbindung mit einer gasbetriebenen Wärmepumpe als Wärmequelle (Gasmotor, hohe Temperaturen durch Gasverbrennung) oder einer anderen Hochtemperaturwärmequelle umsetzbar. Die im Bereich Sorptionstechnik benötigten Temperaturen können auch aus industrieller Abwärme (z. B. > 50°C oder > 75°C) zur Verfügung gestellt werden.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit der unterschiedlichen Niedertemperaturwärmequelle in Kombination mit den beschriebenen und betrachteten Wärmepumpentechnologien zeigt sich, dass prinzipiell, analog zur elektrischen Wärmepumpe, alle Wärmequellen (siehe Abbildung 15) –Luft, Erdreich und Wasser – auch für gasbetriebene Wärmepumpen zur Anwendung kommen können. Einschränkungen sind nicht vorzufinden.

Bei der Dimensionierung und Planung eines Wärmeübertragungersystems tritt ein Vorteil der gasbetriebenen Wärmepumpen oft deutlich hervor: Bei dieser Technologie kann die Verbrennungswärme zusätzlich genutzt werden. Damit wird die Niedertemperaturwärmequelle weniger belastet, d. h. ihr wird weniger Energie entzogen. Aus diesem Grund kann ein Wärmeübertragungersystem zur Nutzung von Umweltwärme in Verbindung mit einer gasbetriebenen Wärmepumpe im Vergleich zu einer Kopplung mit einer elektrischen Wärmepumpe im Allgemeinen kleiner dimensioniert werden.

Alle Wärmepumpentechnologien könnten mit den aufgeführten Niedertemperaturwärmequellen kombiniert werden. Wird aber ein Blick auf die Geräte selber gelegt, die von den Anbietern auf dem Markt angeboten werden, so ist festzustellen, dass die angebotenen Geräte hauptsächlich Luft-Wasser-Wärmepumpen sind. Sole- oder Wasser-Wasser wird nicht oder nur für ein oder zwei Geräte angeboten.

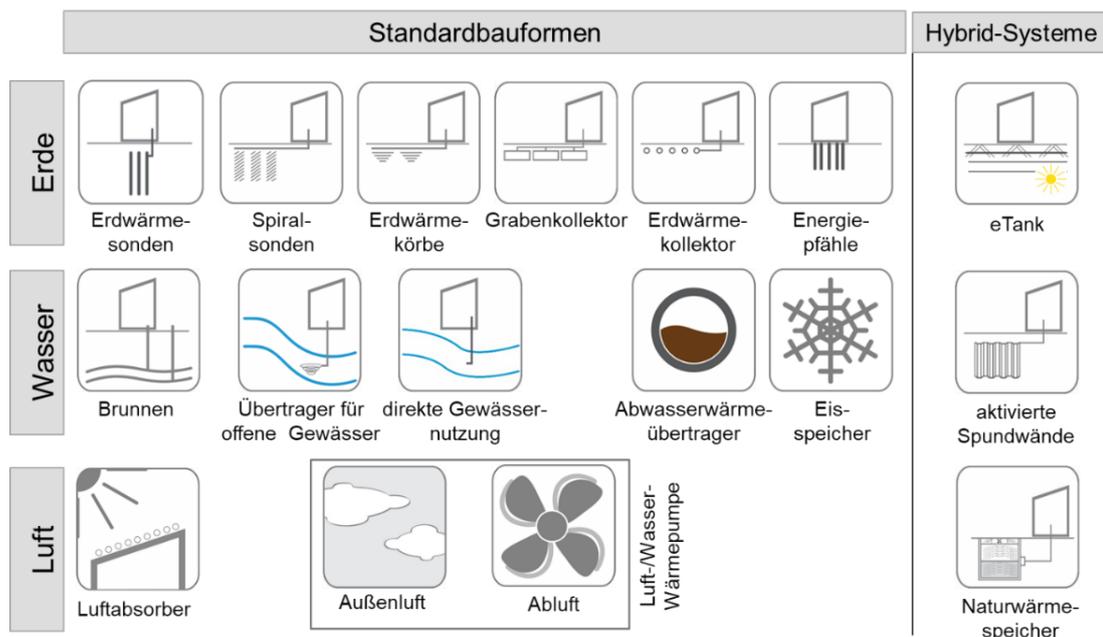


Abbildung 15 Im Rahmen von future:heatpump und future:heatpump_II betrachtete Niedertemperaturwärmequellen für Wärmepumpen

6.5 Ökologische und ökonomische Bewertung

Die Darstellung der ökologische und ökonomische Effekte der einzelnen Wärmepumpentechnologien sind derzeit schwer umzusetzen, da diese von den aktuellen bzw. zukünftigen Strom- und Gaspreisen sowie den CO₂-Equivalenten abhängen. An dieser Stelle wird zur groben Einordnung die ökologische und ökonomische Bewertung an einem Beispiel dargestellt, welches nicht repräsentativ für die gesamten Technologien stehen kann.

Da auf dem Markt derzeit hauptsächlich Luft-Wasser-Wärmepumpen für die Gasmotor- als auch die Absorptions-Wärmepumpe angeboten werden, bezieht sich die ökonomische und ökologische Bewertung auf diese Art der Wärmepumpen und deren Anwendung.

Ausgangspunkt des Beispiels ist ein Wohngebäude (z. B. Mehrfamilienhaus) mit einer Heizleistung von 35 kW. Für die Berechnung werden die nach Tabelle 5 angegebenen Eckdaten zu Grunde gelegt. Die Angaben beziehen sich auf die vorab durchgeführte Recherche zu den Wärmepumpentechnologien und deren Kennwerte und bilden den Mittelwert ab.

Tabelle 5 Eckdaten und Annahmen für die ökologische und ökonomische Bewertung (Luft-Wasser-Wärmepumpe)

	Elektrische Wärmepumpe	Gasmotor Wärmepumpe	Gasadsorptions-wärmepumpe	Gasabsorptions-wärmepumpe
COP bzw. Heizzahl	3,5	1,5	keine Anbieter auf dem Markt	1,7
Wärmequelle	Luft			
Jahresvolllaststunden	1.800 h/a			
Primärenergiefaktoren (GEG)	Strommix 1,8 Gas 1,1			
CO₂-Äquivalent (GEG)	Strommix 560 g/kWh Gas 240 g/kWh			
Arbeitspreis (brutto)	Strom 0,55 €/kWh Gas 0,24 €/kWh			

Aus der ökologischen Betrachtung resultiert Abbildung 16. Anhand der dargestellten Primärenergiebedarfe und CO₂-Emissionen ist zu erkennen, dass im Bereich CO₂-Emissionen alle drei Technologien nahe beieinander liegen. Die elektrische Wärmepumpe schneidet nicht so gut ab, da das CO₂-Äquivalent vom Strommix sehr hoch angesetzt wurde. Zukünftig kann davon ausgegangen werden das der Strommix deutlich „grüner“ wird und somit die CO₂-Emissionen sinken werden. Primärenergetisch schneidet die elektrische Wärmepumpe besser ab, als die Gasmotor- oder die Absorptionswärmepumpe. Die beiden gasbetriebenen Wärmepumpen liegen mit rund 45 bzw. 30 % über den Werten der elektrischen Wärmepumpe.

Aus der ökonomischen Betrachtung resultiert Abbildung 17. Anhand der dargestellten Energiekosten (nur Wärmepumpenbetrieb) ist zu erkennen, dass auch in diesem Bereich alle drei Technologien nahe beieinander liegen. Die geringsten Energiekosten weist die Gasabsorptionswärmepumpe auf. Hinsichtlich der Investitionskosten wurden die verschiedenen Anbieter kontaktiert und die Preise erfragt. Abbildung 18 stellt die spezifischen Durchschnittsinvestitionskosten (netto) dieser Recherche dar (Stand 2020). Es ist zu erkennen, dass bei den Investitionen die elektrische Wärmepumpe rund 4-fach mehr kosten kann als eine Gasabsorptionswärmepumpe. Im Vergleich zur Gasmotor Wärmepumpe liegen die Investitionskosten ähnlich, die elektrische Wärmepumpe kann aber auch hier teurer ausfallen.

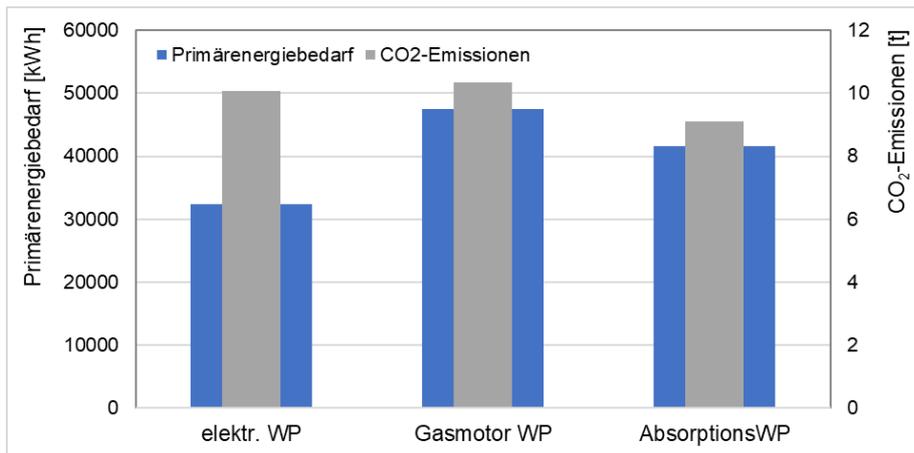


Abbildung 16 Primärenergiebedarf und CO₂-Emissionen für die unterschiedlichen Wärmepumpentechnologien im Beispielgebäude

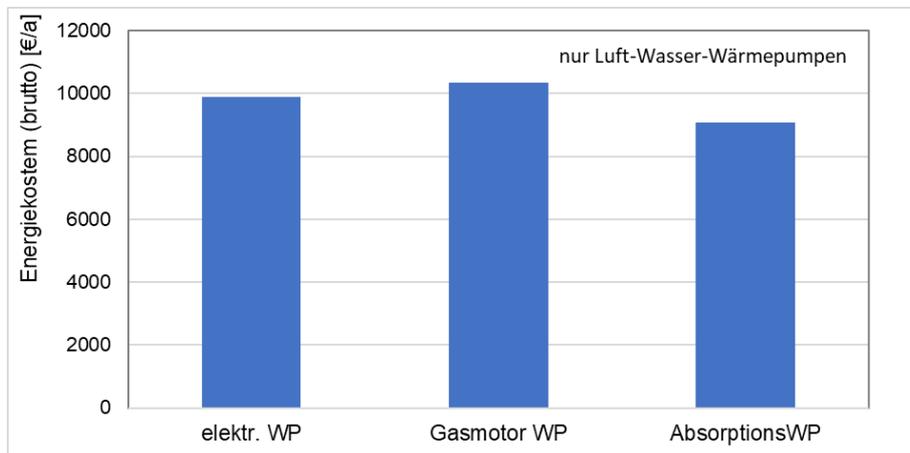


Abbildung 17 Energiekosten (Wärmepumpenbetrieb) für die unterschiedlichen Wärmepumpentechnologien im Beispielgebäude

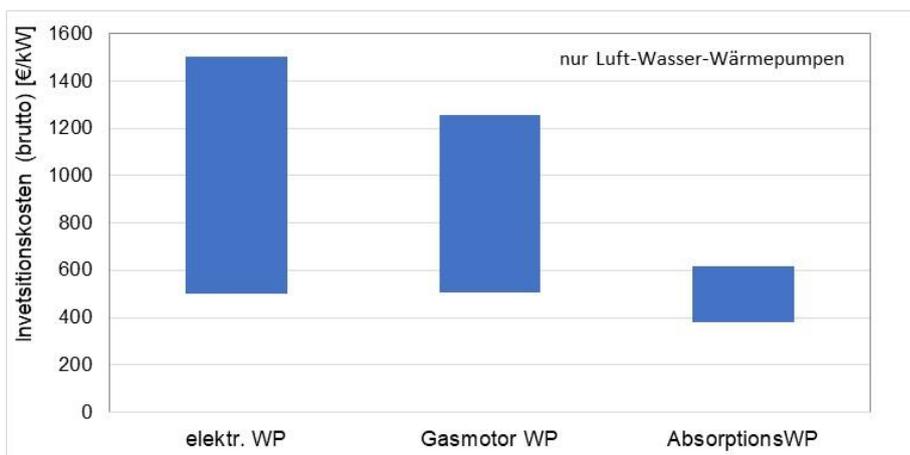


Abbildung 18 Spezifische Investitionskosten (netto) für die unterschiedlichen Wärmepumpentechnologien

6.6 Wärmepumpentechnologie – Einbindung in WP_{SOURCE}

Als Zusammenfassung und Ergebnis der Recherche der Eckdaten der Wärmepumpen, der Marktsituation hinsichtlich Verkaufszahlen und Anbieter sowie der geringen Anzahl an bisher umgesetzten Konzepten mit unterschiedlichen Wärmepumpentechnologien (außer der elektrischen Wärmepumpe) wird sich bei der Erweiterung von WP_{SOURCE} weiterhin auf die elektrisch betriebenen Wärmepumpen fokussiert. (Abbildung 19)

Um die Wärmepumpentechnologie dennoch im Programm zu erweitern, wird neben den bisher vorhandenen ON-OFF-Geräten als Ergänzung die sogenannte Invertertechnologie in das Programm mit aufgenommen. Die Invertertechnologie wurde bisher vorrangig in Luft-Wasser-Wärmepumpen integriert. Seit ein paar Jahren wird die Technologie jetzt auch bei vielen Anbietern in den Sole- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen umgesetzt.

In WP_{SOURCE} 2.0 wird daher neben einer ON-OFF Wärmepumpe auch die Inverterwärmepumpe auszuwählen sein. (Abbildung 20) Die entsprechenden Kennlinien werden wie auch schon bei den ON-OFF Geräten 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.

Die Umsetzung und Integration der Kennlinien und Wärmepumpentypen ist im Abschnitt 14.3.2.2 nachzulesen.

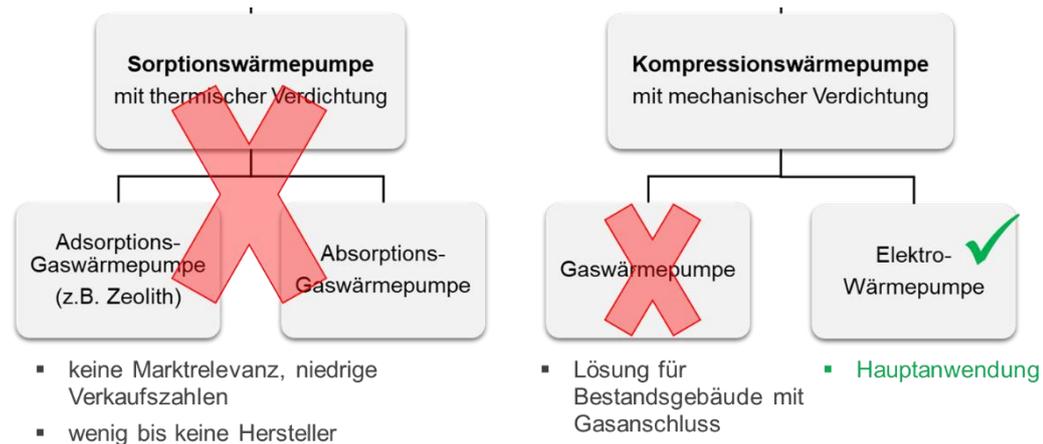


Abbildung 19 Bewertung der Wärmepumpentechnologien für die Einbindung in WP_{SOURCE} 2.0



Abbildung 20 Implementierung der Auswahl der Wärmepumpentechnik in WP_{SOURCE} 2.0

7 AP3 – Regeneration erdgekoppelter Systeme

7.1 Regeneration und Wärmequelle

Die Erweiterung eines Energieversorgungskonzeptes um die Komponente Solarthermie bietet Potenziale zum Einen, um die Effizienz des Gesamtsystems zu steigern und zum anderen die Bedingungen am Standort besser zu nutzen. Eine Einbindung und Kopplung von Solarthermie und Wärmepumpe mit dem Gebäude kann dabei quellenständig - zur Anhebung des Temperaturniveaus der Niedertemperaturquelle als auch senkenseitig - zur anteiligen Deckung des Wärmebedarfs sowie zur Regeneration der Niedertemperaturquelle erfolgen.

Die Zusammenstellung der Systemkonfigurationen beruht auf der Grundlage einer Literaturrecherche von vorhandenen Untersuchungen zur Integration von Solarthermie ins Versorgungskonzept von (vorrangig) Wohngebäuden.

Die Systemkonfigurationen stellen die unterschiedlichen Kopplungsvarianten (Abbildung 21) von Solarthermie, Wärmepumpe und Gebäude in Bezug auf Regeneration des Erdreichs, Quelle für die Wärmepumpe oder Direktnutzung zur Gebäudebeheizung oder Trinkwarmwasserbereitung dar.

Die Bewertung der Konfigurationen erfolgte bezüglich der Einflüsse auf z.B.

- Effizienz des Gesamtsystems (SPF_{SWP}) und der Wärmepumpe (SPF_{WP}),
- Reduzierung des Materials und Aufwandes sowie benötigte Flächen und/oder Tiefen bei der Erschließung des Erdreichs,
- Einfluss auf den Anlagenbetrieb,
- Energiebilanzen

im Vergleich zu einem System ohne Solarthermie.

Die Bewertung erfolgt über die Eignung der entwickelten Konzepte für den angestrebten Verwendungszweck als auch auf energetischer, ökologischer und ökonomischer Basis.

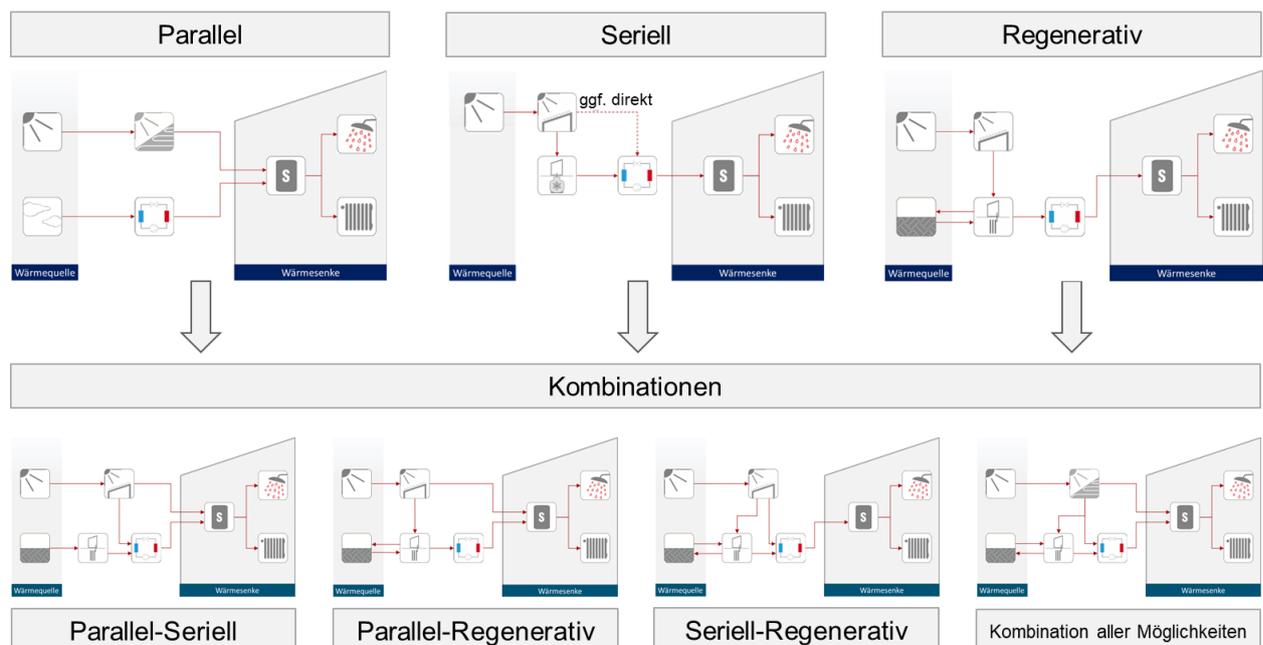


Abbildung 21 Untersuchte Konfigurationen zur Einbindung von Solarthermie

Bereits in diversen Forschungsprojekten wurde der Einsatz solarthermischer Kollektoren oder Solar-Luft-Absorber in Verbindung mit erdgekoppelten Wärmepumpensystemen untersucht. So wurden die Relevanz und die Effekte einer solarthermischen Regeneration des Erdreichs z. B. in den am Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH) durchgeführten Projekten Terra-Solar-Quelle und GeoSolar-WP [3] - [5] aufgezeigt. Die betrachteten Konzepte beruhen darauf, dass ausgehend von einer Wärmepumpe eine Solaranlage in den Primärkreis (Niedertemperaturwärmekreis) der Wärmepumpe eingebunden wird. Da das Temperaturniveau des Primärkreises durch die Wärmepumpe abgesenkt wird, kann die zur Verfügung stehende solare Energie im Vergleich zu einer reinen Trinkwassererwärmung oder Heizungsunterstützung wesentlich länger genutzt werden. Die Gründe und Ziele für die Einbindung und Nutzung thermischer Solarenergie in Verbindung mit Wärmepumpensystemen beruhen auf

- einer Reduzierung der benötigten Flächen und/oder Tiefen bei der Erschließung des Erdreichs,
- einer Reduzierung des Material- und/oder Bauaufwandes,
- dem positiven Einfluss einer Regeneration auf den Betrieb der Wärmepumpe,
- der Erzielung ausgeglichener Energie- und Temperaturbilanzen und teilweisen Kompensation der saisonalen Verschiebungen zwischen Wärmeangebot aus der Umwelt und Wärmebedarf sowie
- dem Kosten/Nutzen-Verhältnis der Maßnahme(n).

Die Nutzung von erdgekoppelten Niedertemperaturwärmequellen zur Wärmebereitstellung für Wärmepumpen führt zu einem bedarfsorientierten Wärmeentzug aus dem Erdreich, der nicht immer durch einen natürlichen Wärmeeintrag ausgeglichen werden kann. Dadurch kommt es vor allem bei Erdwärmesonden zu langfristigen Auskühleffekten des Untergrundes, die einen negativen Einfluss auf die Systemeffizienz haben. Mithilfe von thermischen Sonnenkollektoren oder Solarabsorbern kann regenerative, thermische Energie gezielt in das Erdreich eingebracht und der Wärmeentzug durch eine Wärmepumpe ausgeglichen werden. Auf diese Weise können das Erdreich regeneriert und langfristige Auskühleffekte vermieden werden. Die damit einhergehende Erhöhung der Quellentemperatur für die Wärmepumpe wirkt sich in höheren Systemarbeitszahlen aus.

Bei der Dimensionierung von Erdwärmekollektoren kann der gezielte Eintrag thermischer Energie in das Erdreich zu einer Reduzierung der notwendigen Kollektorfläche beitragen. Durch die Vermeidung kritischer Frost- und Erschöpfungszustände infolge Regeneration kann ein geringerer Verlegeabstand der Kollektorrohre umgesetzt werden. Da der hohe Bedarf an unversiegelter Fläche ein wesentliches Hemmnis für den Einsatz von Flächenkollektoren darstellt, ist die Reduzierung der notwendigen Fläche durch Regeneration für die Anwendung dieser Technologie von besonderem Interesse.

Bei der Einleitung thermischer Energie in den Solekreislauf eines Übertragungssystems sind die zulässigen Eintrittstemperaturen zu beachten. So darf die Eintrittstemperatur in einen Flächenkollektor im Allgemeinen 25 °C nicht überschreiten. Aus diesem Grund werden zur Regeneration des Erdreichs in der Regel unverglaste Kollektoren, üblicherweise Solarabsorber, eingesetzt.

Tabelle 6 fasst wesentliche zur Regeneration von erdgekoppelten Niedertemperaturwärmequellen relevante Eckdaten und Anwendungsfälle zusammen.

Die Ergebnisse aus der Literaturrecherche ergeben, dass je nach Konfiguration von Wärmepumpe und Solarthermie

- eine Effizienzsteigerung des Gesamtsystems (Erhöhung der Jahresarbeitszahl),
- eine Regeneration des Erdreichs mit Anhebung der Temperaturen im Erdreich und
- eine Reduktion der Größe der NT-Quellen

erreicht werden kann.

Eine Abwägung zwischen Gesamtkosten und Energieeinsparung ist jedoch notwendig, da derzeit der Effizienzgewinn der einzelnen Konfigurationen in keinem wirtschaftlichen Verhältnis zum erforderlichen Aufwand

liegt. Des Weiteren ist anzumerken, dass mit sinkenden CO₂-Äquivalenten des bezogenen Stroms eine Kopplung von Solarthermie und Erdreich aus ökologischer Sicht zunehmend weniger Bedeutung hat. Wichtig ist, dass die Kopplung mit thermischer Solarenergie einen signifikant positiven Einfluss auf unterdimensionierte Systeme haben kann.

Tabelle 6 Unterschiede und Einflüsse von solarer Regeneration von Erdwärmekollektoren und -sonden

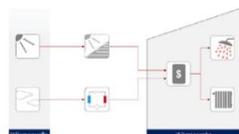
	Erdwärmekollektoren (EWK) [2]	Erdwärmesonden (EWS) [3,4]
Ziel der Regeneration	Reduzierung der Kollektorfläche bei gleichbleibender Effizienz	Reduzierung der Sondenlänge und Verbesserung der Systemeffizienz
Einbindung der Solarthermie	Primärseitige Reihenschaltung der Solar Kollektoren oder -absorber mit EWK	Primärseitige Reihenschaltung der Solarkollektoren oder -absorber mit EWS
Untersuchte Kollektortypen	Schwimmbadabsorber, Unabgedeckte PVT- und Fassadenkollektoren	Unverglaster Kollektor (Solarabsorber)
Regelung	Eintrittstemperatur EWK max. 25 °C; Quellentemperaturen mini mal -5 °C	
Einfluss der Regeneration	Vermeidung kritischer Frostzustände und Begrenzung von Erschöpfungszuständen der EWK	Umgehen von langfristigen Auskühlfekten sowie Steigerung der Jahresarbeitszahl (JAZ)
Einfluss	Reduzierung der Kollektorfläche bis zu 50%. Anwendbarkeit unabhängig von der Bodenart. Gute Kompensationsmaßnahme bei unterdimensionierten EWK.	Steigerung der JAZ und Anhebung der Minimaltemperaturen im Erdreich. Reduktion der Sondenlänge um bis zu 30 %. Bei eindeutig unterdimensionierten Systemen ist der Einfluss signifikant. Effizienzgewinne steht sonst in keinem wirtschaftlichen Verhältnis zum Aufwand.

Die erarbeiteten Ergebnisse zur Regeneration werden mittels Steckbriefe zur Information der möglichen Umsetzungskonfigurationen im Vordimensionierungsprogramm WP_{SOURCE} aufgenommen. (siehe Anhang 20.2)

Parallele Systemkonfiguration

Systembeschreibung

Bei einer parallelen Verschaltung stellen sowohl die Wärmepumpe als auch die solarthermische Anlage Wärme zur Verfügung, die zur Trinkwassererwärmung und ggf. auch zur Unterstützung der Raumheizung verwendet werden kann. Üblicherweise übernimmt der Solarkollektor vorrangig die Wärmebereitstellung zur Trinkwassererwärmung, während die Solarthermieanlage den Wärmebedarf nicht vollständig gedeckt, übernimmt die Wärmepumpe den verbleibenden Bedarf. Die Wärmepumpe übernimmt vorrangig die Bereitstellung von Wärme.



Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - geringe Komplexität der hydraulischen Verschaltung und des Regelungsprinzips, dadurch bedingt hohe Zuverlässigkeit und Robustheit des Systems - bei angemessener Anlagendimensionierung ökologisch und ökonomisch sinnvoll und effizient - spätere Anpassung der Wärmepumpe, z. B. zur Effizienzsteigerung oder bei Änderung des Bedarfs, möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - keine aktive Regeneration einer NT-Erdrichs möglich. Aber: Durch den verringerten Wärmeeintrag erfolgt eine Belastung des Erdrichs - das Potenzial von Solarwärme und Trinkwassererwärmung und/oder FL ungenutzt - keine Reduktion der benötigten FL (Flächenabsorber) bzw. Tiefen (Erdrich-Erdrichs) des Erdrichs

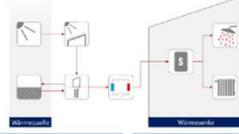
Ergebnisse im Vergleich zu System ohne Solarthermie

Performance Faktor Gesamtsystem und Wärmepumpe:
Steigerung des SP_{WP} mit zunehmender Kollektorbfläche. Kann nur ein geringer Teil des Gesamt-Solarthermie bereitgestellt werden, wird die Realisierung einer Solaranlage allein zur empfohlen. Bei einem großen Anteil der Solarthermie einen größeren Wärme durch die Bereitstellung von Wärme aus einer Solarthermieanlage (insbesondere in den Sommer) ein höheres SP_{WP} erzielt werden.
Der SP_{WP} nimmt mit zunehmender Jahresdurchschnittstemperatur (gleich sinkendem Gesamt-Wärmebedarf) ab.
Durch die Bereitstellung von Wärme aus einer Solarthermieanlage (insbesondere in den Sommer) ein höheres SP_{WP} erzielt werden.
Energieeinsparung:
An Standorten mit hoher solarer Einstrahlung in Kombination mit einem geringen Wärme-Eintrag an elektrischer Energie erzielt werden. Die Energieeinsparung hängt dabei vom Energiebedarf der Wärmepumpe des Referenzsystems ohne solarthermische Komponente ab.

Systemkonfiguration zur Regeneration

Systembeschreibung

Bei einer Verschaltung zur Regeneration der NT-Wärmequelle wird Solarwärme zur Verbesserung der Niedertemperaturwärmequelle bzw. des Temperaturbereichs im Erdrich eingesetzt. Die Einbindung von Solarwärme erfolgt z. B. über einen Erdrichwärmeübertrager, der die Solarwärme an das Erdrich abführt. Kann erreicht werden, dass das Erdrich in keinen "Erdrichzustand" oder kritischen Frostschädigung des Erdrichs zu vermeiden, müssen maximal zulässige Eintrittstemperaturen beachtet werden.



Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Regeneration der NT-Quelle - ganzjährig effizienter Betrieb der Wärmepumpe - Reduktion der Sondenanzahl bzw. der Flächenkollektorbfläche durch Regeneration - Steigerung der Effizienz unterdimensionierter Anlagen - das Erdrich einer ausgeglichener Temperaturbelastung des Erdrichs ermöglicht einen Regelbetrieb auch bei unterdimensionierten Anlagen - Vermeidung von kritischen Frostzuständen - wärmeunabhängige saisonale Wärmespeicherung vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> - Um eine ausgeglichene Wärmebelastung gewährleisten, sind z. B. abhängig von und -länge eine genaue Abstimmung der wesentlichen Systemkomponente eine angepasste Kollektor- oder Absorber erforderlich. - verglichen mit einem Sondenfeld hat Systemkonfiguration zur Regeneration nur einen geringen Einfluss auf die ET

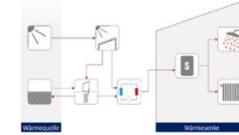
Ergebnisse im Vergleich zu System ohne Solarthermie

Regeneration Erdrichs:
Zur Regeneration von Erdrichs können festgelegt werden, dass durch Regeneration sowohl auch für einzelne Sonden langfristig ein konstantes Temperaturniveau des Erdrichs erreicht Eintragsbereich mit Regeneration nur zu einer geringen Erhöhung der EF gegenüber einer unterdimensionierten Anlage führt eine Verschaltung zur Regeneration der einer Effizienzsteigerung.
Regeneration Flächenkollektor:
Zur Regeneration von Flächenkollektoren kann zusammenfassend festgelegt werden, dass durch die Regeneration kritischer Frostzustände verhindert sind und sog. Erdrichzustände des Erdrichs können. Ein besonders kritischer Frostzustand liegt vor, wenn durch zu starken Wärmeeintrag das Erdrich, vollständig gefrieren und dadurch die Verschaltung von Schneid- oder Regenwasser verhindert Solarkollektor (überfläche) kann zudem eine Steigerung des SP_{WP} erreicht werden. Dies geringwertig und unterdimensionierte Anlagen.

Seriell-Regenerative Systemkonfiguration

Systembeschreibung

Bei einer seriell-regenerativen Systemkonfiguration wird die Wärme eines Solarkollektors oder -absorbers zur Regeneration des Erdrichs und zur Anhebung der Quelltemperatur für eine Wärmepumpe genutzt. Eine Wärmepumpe benötigt Quelltemperatur im Bereich von 0 °C bis 20 °C. Der Kollektor/Absorber wird alternativ als Wärmequelle für die Wärmepumpe sowie auch zur Regeneration des geothermischen Systems genutzt.



Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Im Vergleich zu einer anderen Systemkonfiguration: sehr gute Betriebsbedingungen für eine Wärmepumpe - Systeme mit unterdimensionierten NT-Wärmequellen (z. B. Sonden) können gegenüber dem parallelen System durch die Regeneration einen höheren SP_{WP} erzielen 	<ul style="list-style-type: none"> - Oft ist keine vollständige Regeneration des Erdrichs möglich, eine langfristige Abkühlung des Erdrichs kann jedoch verlangsamt und/oder reduziert werden. - bei ausreichend dimensionierten Anlagen wird durch die Regeneration des Erdrichs keine Effizienzsteigerung des Gesamtsystems erzielt.

Ergebnisse im Vergleich zu System ohne Solarthermie

Performance Faktor Gesamtsystem und Wärmepumpe:
Der SP_{WP} ist deutlich von der Sondenlänge abhängig. Durch eine Regeneration kann der SP_{WP} bei unterdimensionierten NT-Wärmequellen deutlich gesteigert werden. Bei ausreichender Dimensionierung erhöht eine Regeneration des Erdrichs die Effizienz des Gesamtsystems nicht oder nur marginal.
Durch die Einbindung der gesamten Solarwärme in das Erdrich oder alternativ in den Verdampfer der Wärmepumpe können im Vergleich zu den anderen hier beschriebenen Systemkonfigurationen die besten Betriebsbedingungen für die Wärmepumpe und folglich die höchsten SP_{WP} erzielt werden.
Regeneration des Erdrichs:
Eine vollständige Regeneration des Erdrichs wird durch diese Verschaltung nicht möglich sein, da Solarwärme vorrangig an das Gebäude abgeben wird. Gleichwohl kann die Abkühlung des Erdrichs signifikant reduziert werden, weshalb diese Verschaltungsart auch für größere Erdwärmesondenfelder interessant sein kann.
Eine seriell-regenerative Verschaltung in Verbindung mit einem Flächenkollektor konnte in der Literatur nicht gefunden werden. Aufgrund der geringfügig geringeren Verdampferemperatur bei Anlagen mit Erdwärmesonden lässt sich jedoch schließen, dass auch bei Anlagen mit Flächenkollektoren kritische Frostzustände verhindert werden können und eine Flächenreduktion des Kollektors möglich sein wird.

Abbildung 22 Steckbriefe zur Regeneration in WP_{SOURCE}

7.2 Solarthermie zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung

Der Begriff Solarthermie steht für die thermische Nutzung solarer Strahlung. Grundlage ist der photothermische Effekt, bei dem durch Photonenabsorption aus elektromagnetischer Strahlung (Photoanregung) - im Fall von Solarthermie größtenteils optischer Strahlung - in der bestrahlten Materie Wärme entsteht. Im Bereich der thermischen Nutzung von Solarenergie ist die bestrahlte Materie üblicherweise ein von einem Wärmeträger (meist Wasser oder Wasser-Glykol-Gemisch) durchströmter Absorber.

7.2.1 Solarkollektoren und deren Anwendung

Als Sonnenkollektoren werden im Allgemeinen Geräte oder Aufbauten bestehend aus einem Absorber für solare Strahlung, einer transparenten Abdeckung und einer rückseitig sowie teilweise auch seitlich montierten Wärmedämmung bezeichnet. Der Gehäuserahmen besteht meist aus Aluminium, teilweise aus Kunststoffen und selten aus Holz. Eine spezielle Bauform von Sonnenkollektoren stellen Vakuumröhrenkollektoren da. Bei diesen Kollektoren werden Wärmeverluste nicht mittels Wärmedämmung, sondern durch ein (Hoch)vakuum (Druck kleiner 10–6 bar) in der den Absorber umschließenden Glasröhre minimiert. Wie die Bezeichnung erkennen lässt, bestehen sog. Solar-Luft-Absorber allein aus einem sowohl solare Strahlung als auch Wärme aus der Außenluft absorbierenden Bauteil. Die Bauformen marktüblicher Solar-Luft-Absorber sind vielfältig. Sie reichen von der einfachen Absorbermatte, die vergleichbar mit einem Schwimmbadabsorber z. B. auf ein Flachdach oder auch Schrägdach aufgelegt wird, bis hin zum sog. „Energiezaun“, der mit einem Anstellwinkel von 90° aufgestellt wird und neben seiner Funktion als Niedertemperaturwärmequelle auch Funktionen der Abgrenzung übernehmen kann.

Die Nutzung solarer Einstrahlung mittels thermischer Sonnenkollektoren und nachgeschalteter Anlagentechnik ist eine seit vielen Jahren im Bereich der Trinkwassererwärmung aber auch zur Heizungsunterstützung etablierte Technologie. Anlagen zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung werden im allgemeinen Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung bezeichnet. Solche, die neben der Erwärmung von Trinkwasser auch die Raumheizung unterstützen, werden in Deutschland Kombianlagen genannt. Abhängig von der Anlagengröße und dem Bedarf an zu erwärmenden Trinkwasser bzw. dem Trinkwarmwasser- und Raumheizungsbedarf, können signifikante Anteile der Bedarfe über thermische Solaranlagen gedeckt werden. In modernen Gebäuden stellt Trinkwarmwasser den Wärmebedarf auf dem höchsten und damit für eine Wärmepumpe auf einem ungünstigen Temperaturniveau dar. Vor allem außerhalb der Heizperiode und in der Übergangszeit zwischen Heizperiode und raumheizungsfreier Zeit können thermische Solaranlagen einen erheblichen Teil der benötigten Energie bereitstellen und eine Wärmepumpe insbesondere in dem ungünstigen Temperaturbereich der Trinkwassererwärmung entlasten.

In Rahmen von WP_{SOURCE} wird für die thermische Nutzung von Sonnenenergie der Begriff Solarthermie verwendet.

Abbildung 23 zeigt den Nutzwärmebedarf eines Einfamilienhauses und den Einfluss von solarthermischen Kombianlagen mit unterschiedlichen Deckungsanteilen am Wärmebedarf auf, die durch eine Wärmepumpe bereitzustellende Wärmemenge.

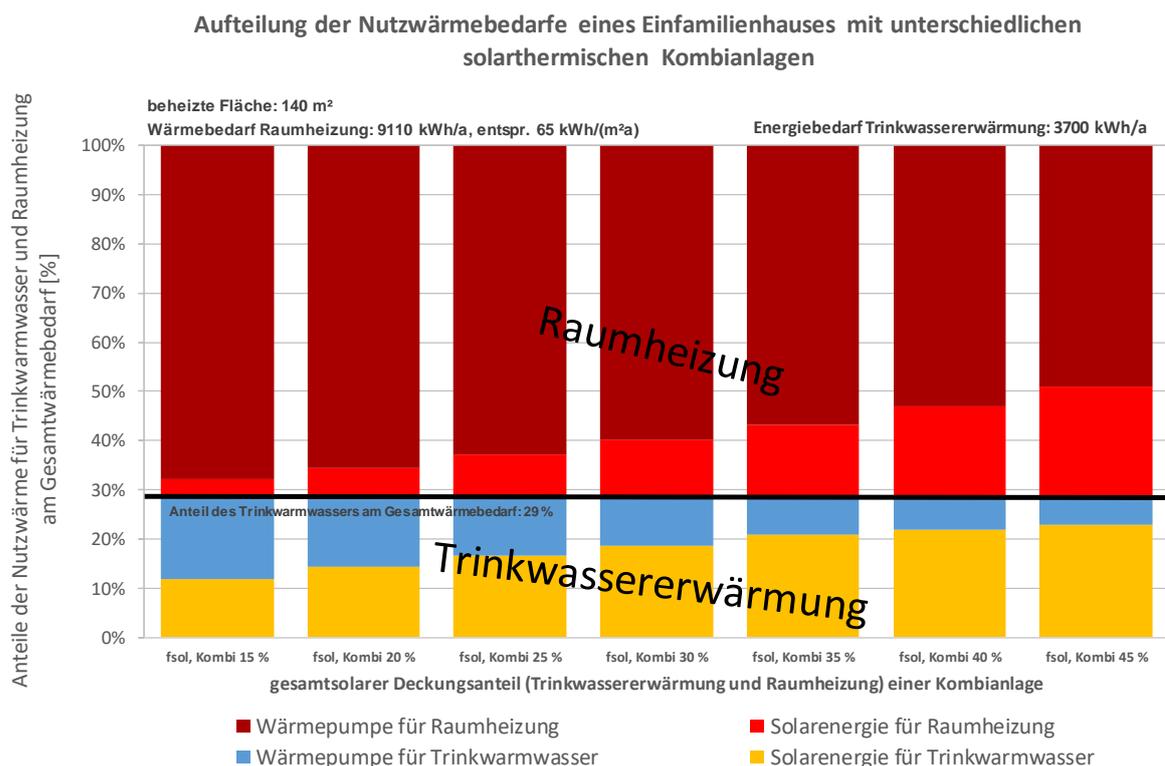


Abbildung 23 Aufteilung der Nutzwärmebedarfe für Trinkwarmwasser und Raumheizung eines Einfamilienhauses mit solarthermischen Kombianlagen mit Deckungsanteilen (f_{sol}) von 15 % bis 45 % am Gesamtwärmebedarf

Die Abbildung verdeutlicht, dass solarthermische Kombianlagen abhängig vom solaren Deckungsanteil an der Trinkwassererwärmung und Raumheizung (f_{sol}) einen signifikanten Anteil der bereitzustellenden Wärme liefern können. Mit einer solaren Unterstützung der Trinkwassererwärmung und Raumheizung kann für „übliche“, bspw. von vier Personen bewohnten Einfamilienhäusern mit einem Wärmebedarf für die Raumheizung von etwa 65 kWh/(m²a), nahezu 50 % des Wärmebedarfs bereitgestellt werden. Dies entspricht bis zu 80 %

des Wärmebedarfs zur Trinkwassererwärmung und etwa 1/3 des Wärmebedarfs für die Raumheizung. Wie bereits erwähnt ist dies infolge des benötigten Temperaturniveaus für die Trinkwassererwärmung ein für eine Wärmepumpe besonders günstiger Umstand. Bei sog. Solaraktivhäusern liegt der gesamt solare Deckungsanteil sogar bei über 50 %.

Neben der Verwendung thermischer Sonnenkollektoren zur Trinkwassererwärmung und ggf. Raumheizungsunterstützung werden diese Bauteile sowie Solarabsorber und deren spezielle Bauformen wie etwa Solar-Luft-Absorber in der Praxis zum Teil zur direkte Nutzung von Solarenergie als Wärmequelle für Wärmepumpen oder zur Regeneration erdgekoppelter Systeme sowie von sog. Eisspeichern eingesetzt. Wie beschrieben haben Solar-Luft-Absorber keine transparente Abdeckung (z. B. aus Glas oder Polycarbonat). Sie werden im Allgemeinen auf Dächern installiert aber auch als Sonderbauformen, wie die genannten "Energiezäunen", montiert. Üblicherweise dienen Solar-Luft-Absorber als Niedertemperaturwärmequelle für Wärmepumpen und werden in diesem Zusammenhang auch mit Eisspeichern kombiniert. Als Komponente eines solarthermischen Systems in Verbindung mit einer Wärmepumpe nutzen Solar-Luft-Absorber sowohl solare Einstrahlung als auch die sie umgebenden Luft um thermische Energie an einen Wärmeträger zu übertragen. Das erwärmte Fluid transportiert und liefert die Wärme entweder direkt, als Quelle der Niedertemperaturwärme an eine Wärmepumpe oder regeneriert eine Niedertemperaturwärmequelle, z. B. einen Eisspeicher. Die Regeneration anderer Niedertemperaturwärmequellen, wie etwa des Erdreichs, ist eine weitere Option. In den genannten Fällen kommen als Wärmeträger meist Gemische aus Wasser und Glykol zum Einsatz. Das für eine Wärmepumpe oder zur Regeneration einer Niedertemperaturwärmequelle bereitgestellte Temperaturniveau liegt bei Solarabsorbern und auch bei Solar-Luft-Absorbern in einem Bereich zwischen etwa 5 °C und 40 °C.

Hinweis:

Die Regeneration eines Eisspeichers oder des Erdreichs kann auch durch Wärmezufuhr aus einer anderen Wärmequelle oder eine zur Kühlung betriebene (reversible) Wärmepumpe sowie durch sog. "Freie Kühlung" erfolgen.

7.2.2 Einbindung von Solarthermie in WP_{SOURCE}

Im Programm WP_{SOURCE} Version 2.0 ist die Nutzung solarer Einstrahlung durch (Sonnen)kollektoren und sog. Solar-Luft-Absorber berücksichtigt. Dabei wird die Nutzung von Solarthermie in Form von Solarthermieanlagen zur Trinkwassererwärmung und solchen zur Trinkwassererwärmung und Unterstützung der Raumheizung implementiert.

Mit dem Ziel Bedingungen und Voraussetzungen für eine Einbindung von Solarthermie abzuleiten, wurden auf der Grundlage der bereits im Projekt future:heatpump definierten Referenzanlagen (Gebäude- und Anlagenmodelle) unterschiedliche Systeme und Einbindungsmöglichkeiten für die Nutzung von Solarthermie in Verbindung mit Wärmepumpen mittels dynamischer Simulationen untersucht. Auf der Basis der Ergebnisse konnten sinnvolle Anlagenvarianten identifiziert und entsprechende Optionen in das Vorauslegungsprogramm WP_{SOURCE} 2.0 implementiert werden. Neben energetischen Auswirkungen (Vorteilen) in Bezug auf die Gesamtanlage, wurden die sich ergebenden Investitions- und Energiekosten aufgenommen (siehe Kapitel 14.5).

Aspekte und Zielgrößen für die dynamischen Simulationen

Der Einfluss der Nutzung von Solarthermie als Wärmequelle zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung und auch zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung und Raumheizung wurde im Wesentlichen unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte betrachtet:

- Standort der Anlage innerhalb der Bundesrepublik
- Deckungsanteil einer Solarthermieanlage zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung

- Deckungsanteil einer solarthermischen Kombianlage zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung und Raumheizung
- Wärmebedarf und Temperaturniveau für die Trinkwassererwärmung
- gesamter Wärmebedarf für die Raumheizung
- benötigte Temperaturniveaus für die Raumheizung

Die Untersuchungen dienen der Analyse der solarthermischen Anteile und ihrer saisonalen Verteilung, die von unterschiedlichen solarthermischen Anlagen in Bezug auf die Wärmebedarfe für Trinkwarmwasser und Raumheizung für die im Rahmen von WP_{SOURCE} definierten Gebäude und Standorte realisiert werden können. Bei solarer Unterstützung der Trinkwassererwärmung können abhängig vom Standort max. 70 % bis 80 % des Wärmebedarfs für Trinkwarmwasser durch eine thermische Solaranlage geliefert werden.

Wie in Abbildung 23 dargestellt, können mit einer solaren Unterstützung der Trinkwassererwärmung und der Raumheizung bei „üblichen“ Einfamilienhäuser bis zu 50 % des Wärmebedarfs bereitgestellt werden. (Dies entspricht bis zu 80 % des Wärmebedarfs für die Trinkwarmwasserbereitung.)

In Bezug auf die gesamte zur Trinkwarmwasserversorgung und für die Raumheizung bereitzustellende Energie ist der von einer Wärmepumpe zu liefernde Anteil komplementär zu dem mittels Solarthermie gedecktem. Eine Analyse der im Jahresverlauf wechselnden solarthermischen Deckungsanteile erlaubt Rückschlüsse auf die von einer Wärmepumpe im Jahresverlauf zu liefernde thermische Energie und das benötigte Temperaturniveau. Diese Informationen sind zur Bestimmung der Effektivität einer Wärmepumpe essenziell.

8 AP4 – Kopplung von Photovoltaik und Wärmepumpe

Im Rahmen der Programmerweiterung von WP_{SOURCE} wird die Nutzung von elektrischer Energie aus einer zu der jeweiligen Liegenschaft gehörenden Photovoltaikanlage mit eingebunden. Die in diesem Zusammenhang diskutierende Eigenstromnutzung bedeutet eine verstärkte Deckung des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe durch die Photovoltaikanlage und eine erhöhte Verwendung von PV-Strom im Haushalt (z. B. Licht, Haushaltsgeräte und IT). Neben der Eigenstromnutzung wird die verbleibende Einspeisung in das öffentliche Netz sowie die Reduzierung des Strombezugs quantifiziert und der Einfluss einer Einbindung von Batterien mit unterschiedlichen Speichergrößen abgeschätzt.

Wie bereits für die anderen Komponenten werden auch für die Photovoltaik und die elektrischen Speicher eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit auf Basis der Investitionskosten, Betriebskosten und möglicher Einspeisevergütung ermittelt und abgebildet. (siehe hierzu Kapitel 14.5)

Unter Berücksichtigung der Eigenstromdeckungsanteile werden die erarbeiteten Ergebnisse und Auswertungen zur Einbindung von Photovoltaik in das Programm integriert. Unter Berücksichtigung der Einspeisevergütung von PV-Strom erfolgt auch zu diesem Punkt eine Ermittlung der Kosten. (siehe Kapitel 14.5)

8.1 Konzepte mit Photovoltaik und elektrischem Speicher

Solarstrom zu erzeugen und im eigenen Gebäude zu verbrauchen, ist heute wirtschaftlicher, als ins Netz einzuspeisen. Je mehr Strom selbst genutzt werden kann, desto besser; und durch die Integration der Wärmepumpe wird dies noch gefördert. Die Photovoltaikanlage liefert günstigen Strom für die Wärmepumpe und senkt damit die Energiekosten.

Die Kombination von Wärmepumpen und PV-Anlagen hat sich somit bereits als archetypisches Bausystem in Wohn- als auch Nichtwohngebäuden etabliert. Die Integration weiterer Gebäudetechnologien wie thermische und elektrische Speicher und erneuerbare Energieerzeugung kann den Systembetrieb verbessern und sowohl für Gebäudeeigentümer als auch für das öffentliche Stromnetz von Vorteil sein. Des Weiteren kann die Kombination verschiedener Gebäudefunktionen mit der Wärmepumpe als Erzeuger die Leistung der Wärmepumpe steigern.

Die bekanntesten Ansätze für die Kopplung von PV-Anlagen und Wärmepumpe beruhen auf Regelungen, die greifen, wenn mehr PV-Strom produziert wird, als im Gebäude aktuell benötigt wird.

Die betrachteten Regelungen sind:

- Power-to Heat / PV-Überschussregelung und
- PV-Strom Verteilung auf Stromverbraucher sowie
- Einbindung von elektrischen Speichern

Ziel jeder Strategie ist die Behaglichkeit und den Raumkomfort nicht zu beeinträchtigen, den Anteil der Eigenstromnutzung zu steigern und somit weniger Strom aus dem öffentlichen Netz (Kosteneinsparung) zu beziehen sowie die Effizienz der Wärmepumpe nicht zu reduzieren. Die unterschiedlichen Ansätze beruhen auf ungleiche Aspekte und erzielen unterschiedliche Einflüsse auf die Bewertungskriterien.

Die im nachfolgenden aufgeführten Ergebnisse und Erfahrungen beziehen sich vorrangig auf Wohngebäude mit Wärmepumpen zur Wärmeerzeugung der Raumheizung sowie Trinkwarmwasserbereitung.

Es ist anzumerken, dass der Eigenstromnutzungs- als auch Deckungsanteil den Anteil der gesamten elektrischen Energie im Gebäude beschreibt, der durch lokal erzeugten PV-Strom gedeckt werden kann. Eine

Volleinspeisung der PV-Anlage würde bedeuten, dass der Deckungsanteil 0 % beträgt, während 100 % ausdrückt, dass das Gebäude komplett über den PV-Strom versorgt werden kann.

Ein 100-prozentiger Deckungsanteil könnte nur mit sehr großen Batterien (hoher Speicherkapazität) erreicht werden. Insbesondere in den Wintermonaten ist die Deckung mit PV-Strom für die meisten Haushalte in Deutschland nicht möglich.

8.1.1 Power-to-Heat oder PV-Überschussregelung

Das Grundprinzip der Power-to-Heat-Regelung beruht auf dem Lastmanagement im Gebäude. Der Wärmepumpenbetrieb wird freigegeben (in der Heizperiode) bei einer Mindest-PV-Produktion, um die vorhandenen thermischen Speicher zu beladen. Zusätzlich werden die Erhöhung der Raumtemperatur, der Pufferspeichers-Soll-Temperatur und der Heizkurve aktiviert. Bei der Umsetzung der PV-Regelung werden alle verfügbaren thermischen Speicherkapazitäten wie die Fußbodenheizung und die Warmwasserspeicher / Pufferspeicher als auch die Gebäudemasse selber genutzt. Die Wärmepumpe wandelt dabei den Solarstrom in Wärme um, die dann gespeichert wird. Es wird mehr Wärme produziert als zu dem Zeitpunkt gebraucht wird. In den Abendstunden kann der Heizwärme- und Warmwasserbedarf zunächst aus den überladenen Speichern oder Gebäudemasse gedeckt werden. Die Wärmepumpe pausiert in dieser Zeit und es muss kein Strom aus dem Netz bezogen werden.

Bei der Wahl des Freigabewertes ist darauf zu achten, dass dieser über der Summe aus Grundlast (Haushaltsstrom / Nutzerstrom) und Wärmepumpenstrombedarf liegt. Unterhalb des Bedarfs würde für den Betrieb der Wärmepumpe zusätzlich Strom aus dem Netz bezogen werden müssen, um den dann vorhandenen Strombedarf durch den erzwungenen Betrieb der Wärmepumpe zu decken.

Zudem ist darauf zu achten, auf welche Überhitzungsgrade die Regelungen einstellt werden. Es hat sich gezeigt, dass die Solltemperaturerhöhung

- bei der Raumtemperatur bis um +2 K,
- bei der Pufferspeichertemperatur auf 55 °C und
- bei der Heizkurve bis um +2 K

ausgereizt werden kann, ohne Einschränkungen beim Komfort zu erhalten

Durch die Implementierung von Regelungen zum Betrieb der Wärmepumpe bei PV-Nutzung kann der solare Deckungsanteil je Gebäude und Anlagenkonfiguration bis auf 45 % gesteigert werden.

Durch den verstärkten Betrieb der Wärmepumpe als auch durch das höhere Temperaturniveaus, fällt die Jahresarbeitszahl etwas schlechter aus, da entsprechend mehr Strom genutzt wird. Die Effizienz der Wärmepumpenanlage nimmt also erkennbar ab, doch die Wirtschaftlichkeit steigt, da der zusätzliche Strombedarf von der Photovoltaikanlage erzeugt wird.

Abwandlungen, die nicht explizit die Wärmepumpe betreffen sind noch [11] - [13]

- eine Nachtabenkung sowie
- eine Pufferspeichererweiterung.

Der tageszeitliche Verlauf von Wärme- und Strombedarf bei Nichtwohngebäuden unterscheidet sich deutlich zu dem Profil von Wohngebäuden. Regelungsanpassungen an der Heizung zur Erhöhung der Eigenstromnutzung, wie z.B. eine Erwärmung der Pufferspeicher oder die Nutzung der thermischen Massen durch eine Betonkernaktivierung bei PV-Überschuss, können deswegen nur zu einer geringen bis keiner Steigerung beitragen.

8.1.2 Regelung des Stromverbrauchs und PV-Strom Verteilung

Eigenverbrauch bedeutet, dass der von der Photovoltaikanlage erzeugte Strom in das Stromnetz des Gebäudes eingespeist und durch Haushaltsgeräte, Beleuchtung, Pumpen etc. selbst verbraucht wird. Nur der Solarstrom, der nicht verbraucht oder gespeichert werden kann, fließt als Überschuss in das öffentliche Netz. Soll nun eine spezielle Zuweisung des PV-Stroms an die Verbraucher erfolgen, so ist die Deckung der einzelnen Verbraucher nur rechnerisch / bilanziell möglich. Eine Verteilung des eigens produzierten Stroms auf bestimmte Verbraucher ist physikalisch im Gebäude nicht gegeben.

Werden daher einzelne Verbraucher über Stromzähler erfasst, z.B. die Wärmepumpe, so kann diese bilanziell den erzeugten PV-Strom vorrangig nutzen. Der PV-Strom würde dann rechnerisch auf den Stromverbrauch der Wärmepumpe angerechnet werden.

Die Bilanz erfolgt so, dass der erzeugte PV-Strom zunächst für die Wärmepumpe genutzt wird und dann auf die Haushaltsgeräte verteilt wird. Beispielrechnung: die PV-Anlage produziert 700 W und die Wärmepumpe hat in dem Zeitschritt einen Verbrauch von 500 W, dann wird zu dem Zeitpunkt die Wärmepumpe komplett über PV-Strom gedeckt und die restlichen 200 W werden dem Haushaltstrom angerechnet.

8.1.3 Elektrischer Speicher

Als nächstes soll der Einfluss der Batteriekapazität und -größe auf die Eigennutzung sowie die Wirkung im System dargestellt werden. Die Ergebnisse zeigen, wie es zu erwarten ist, dass mit einer Vergrößerung der Batterie der Eigennutzungs- und Deckungsanteil ansteigen und gleichzeitig der Netzstrombezug sinkt. Eine Linearität ist jedoch nicht vorhanden. Aus energetischer Sicht kann festgehalten werden, je Größer eine Batterie und somit der elektrische Speicher ausfällt, umso mehr überschüssiger PV-Strom kann gespeichert und somit selber genutzt werden. Die Vergrößerung der Speicherkapazität der Batterien ist jedoch immer noch unter den aktuellen Konditionen nicht sehr wirtschaftlich und führt zu hohen Amortisationszeiten.

Bei Nichtwohngebäuden kann auch ohne Zwischenspeicherung des PV-Stroms in einer Batterie eine hohe PV-Eigenstromnutzung erzielt werden. Aufgrund des Tagesverbrauchsprofils wird der erzeugte PV-Ertrag direkt genutzt. Der Einsatz eines Stromspeichers trägt dann in den Abend- und Nachtstunden durch die Entladung der Batterie zur Steigerung der Eigenstromnutzung bei.

Die Einbindung des elektrischen Speichers zum netzdienlichen Betrieb ist eine weitere Betrachtung, wird hier aufgrund des Fokus auf die Kopplung mit der Wärmepumpe aber nicht weiter aufgeführt.

Anhand des Anwendungsbeispiel zur Deckungsanteil- und Eigennutzungsanteilsteigerung durch die Integration eines elektrischen Speichers in einem Einfamilienhaus am Standort Potsdam kann aufgezeigt werden, dass unabhängig vom Baustandard mit einem elektrischen Speicher deutlich mehr Energie regenerativ gedeckt werden kann. Schon durch den Ansatz von 1 kWh Speicherkapazität je 1 kWp PV-Leistung kann der Haushaltsstrombedarf zu > 50% über den PV-Strom gedeckt werden. Und auch der Eigennutzungsanteil erhöht sich von rund 30% auf 50%.

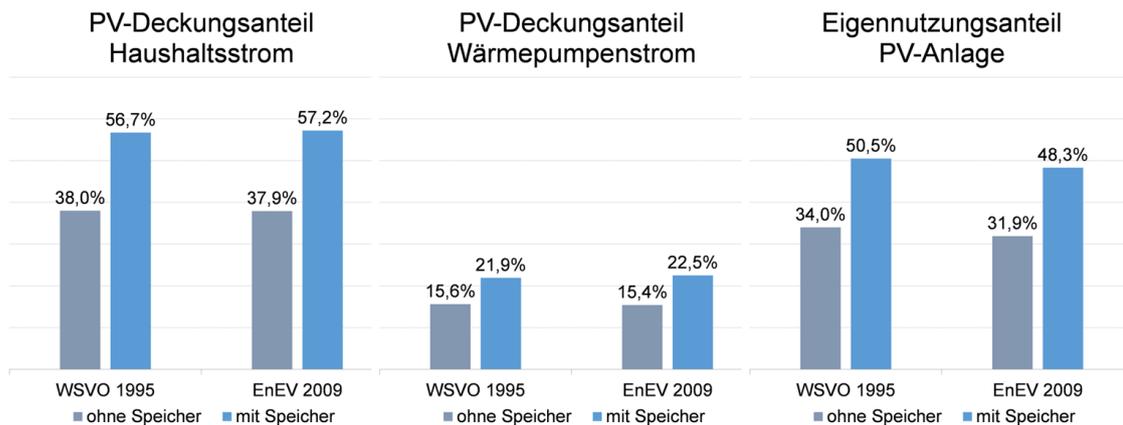


Abbildung 24 Deckungsanteile verschiedener Verbraucher in einem Einfamilienhaus (unterschiedliche Baustandards, PV-Anlage mit 50 W_p je m² Wohnfläche, Wärmepumpe mit JAZ 4, elektr. Speicher mit 1kWh/kWp)

Die Diagramme in Abbildung 25 gelten für Standorte in Deutschland und können für Ein- und Zweifamilienhäuser mit monovalenter elektrischer Wärmepumpe angewendet werden. Unter Berücksichtigung der nutzbaren Stromspeicherkapazität, dem PV-Ertrag sowie dem Strombedarf des Gebäudes können die erzielbaren PV-Eigennutzungs- und Deckungsanteile abgelesen werden.

Im Einfamilienhaus ohne Stromspeicher mit einem Verhältnis von PV-Ertrag zu Jahresstrombedarf von 1 MWh/MWh können bereits über 30 % beim Eigenstromnutzungsanteil als auch beim Deckungsanteil erzielt werden.

An den Verläufen des Eigenstromnutzungsanteils kann festgestellt werden, dass ab einem Verhältnis von Speicherkapazität zu Strombedarf von > 1,25 kWh/MWh eine weitere Vergrößerung des Stromspeichers nur einen geringen Nutzen aufzeigt und der Deckungsgrad nicht nennenswert steigt. Zur Erklärung dient die Speicherkapazität, da größere Stromspeicher in der Nacht nicht vollständig entladen werden können. Somit steht am Folgetag nicht die gesamte Speicherkapazität zur Verfügung.

Bei einer Speicherkapazität von 1 kWh/MWh und einem PV-Ertrag von 1 MWh/MWh, jeweils bezogen auf den Jahresstrombedarf, resultieren Deckungsanteile um 50 %. Durch eine Verdopplung der Speicherkapazität auf 2 kWh/MWh lassen sich die Deckungsanteile lediglich auf 55 % erhöhen.

Die Darstellungen zeigen, dass die Größe des Stromspeichers mit der installierten Leistung der Photovoltaikanlage abgestimmt werden muss. Die Dimensionierung eines Stromspeichers, der zur Erhöhung der Eigenstromnutzung in ein System integriert wird, kann auf Basis der installierten Leistung der PV-Anlage und des Strombedarfs erfolgen. Die Isolinien des PV-Eigennutzungsanteils zeigen einen steileren Verlauf oberhalb von 1,25 kWh nutzbarer Kapazität pro MWh PV-Ertrag. Bei der Betrachtung der Isolinien des Deckungsanteils wird dieser Zusammenhang noch ersichtlicher. Eine Erweiterung der Speicherkapazität über die Diagonale hinaus, bewirkt generell nur einen geringen Anstieg des Deckungsanteils. Um einen hohen Deckungsanteil zu erreichen, muss demzufolge sowohl die Speicherkapazität als auch die PV-Leistung vergrößert werden.

Analog zum Einfamilienhaus werden die Kennwerte in Abbildung 26 für das Mehrfamilienhaus dargestellt. Bei einem Verhältnis von PV-Ertrag zu Jahresstrombedarf von 1 MWh/MWh und ohne Stromspeicher liegt der Eigenstromnutzungsanteil als auch der Deckungsanteil zwischen 35 und 40 %. Auch bei den Mehrfamilienhäusern ist festzustellen, dass ab einem Verhältnis von Speicherkapazität zu Strombedarf von > 1,25 kWh/MWh eine weitere Vergrößerung des Stromspeichers nur einen geringen Nutzen aufzeigt. Der Deckungsgrad kann nicht nennenswert gesteigert werden. Auch beim Deckungsanteil zeigt sich, dass eine signifikante Steigerung oberhalb der Diagonalen nicht mehr gegeben ist.

Die Auswertungen der Einflüsse eines elektrischen Speichers sind im Ein- und Mehrfamilienhausbau sehr identisch. Auslegungs- und Dimensionierungstools für Einfamilienhäuser können somit auch für Mehrfamilienhäuser angewendet werden.

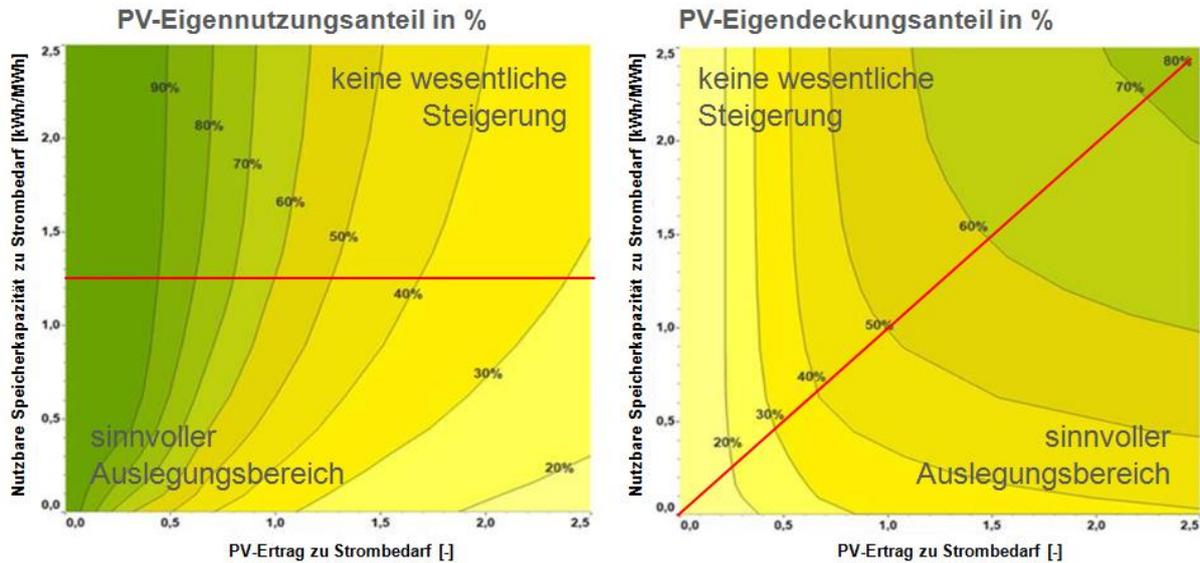


Abbildung 25 PV-Eigennutzungsanteil und -Deckungsanteil von Einfamilienhäusern mit Wärmepumpe [14]

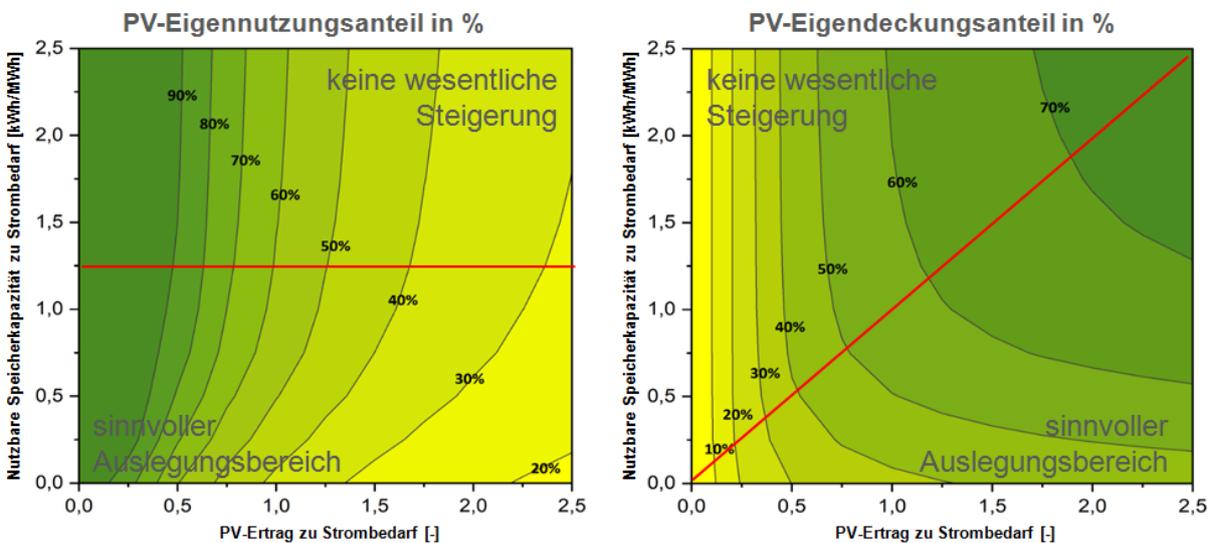


Abbildung 26: PV-Eigennutzungsanteil und -Deckungsanteil von Mehrfamilienhäusern [14]

8.1.4 Zusammenfassung

Als Daumenregel und Ergebnis von Forschungsprojekten mit Wohngebäuden und Wärmepumpeneinbindung kann angesetzt werden, dass bei der Integration von Photovoltaik in die Energieversorgungskonzepte bei einem Verhältnis von 1 MWh PV-Ertrag zu 1 MWh Jahresgesamtstrombedarf (Wärmepumpe und Haushalt) bereits über 30 % des produzierten Stroms selber genutzt sowie 30 % des Gesamtstrombedarfs gedeckt werden können. Bei gleichem Verhältnis zwischen PV-Ertrag und Jahresgesamtstrombedarf und zusätzlicher Integration eines Stromspeichers mit einer nutzbaren Speicherkapazität von 1 kWh pro MWh Strombedarf

kann der Eigennutzungsanteil auf etwa 60 % verdoppelt und der PV-Deckungsanteil auf etwa 50 % erhöht werden.

Die in der Zusammenfassung aufgeführten Varianten (Abbildung 27) basieren zum einen auf einer einfachen Umsetzung ohne größeren technischen Aufwand und zum anderen auf Optimierungsmaßnahmen. Die ausgewählten Systemvarianten zur Eigenstromsteigerung beruhen auf einer thermischen sowie elektrischen Speicherung der eigenproduzierten Stromerträge, entsprechender Regelstrategien und können untereinander kombiniert werden.

Die Simulationsergebnisse an einem Beispielgebäude zeigen, dass durch den Einsatz der verschiedenen Komponenten (Batterie, Pufferspeicher, etc.) der PV-Eigennutzungsanteil von 27 % (Basis) auf über 55 % und der PV-Deckungsanteil von 34 % (Basis) auf über 60 % gesteigert werden kann. Des Weiteren kann der Stromanteil aus Netzbezug bei Einbindung und Umsetzung der Varianten um bis zu 40 % gesenkt werden. Durch die Maßnahmen wird jedoch der Strombedarf um bis zu 4,5 % ansteigen. Dies beruht auf der erhöhten Laufzeit der Wärmepumpe sowie der höheren Vorlauftemperatur im Rahmen der PV-Regelung (Abbildung 27).

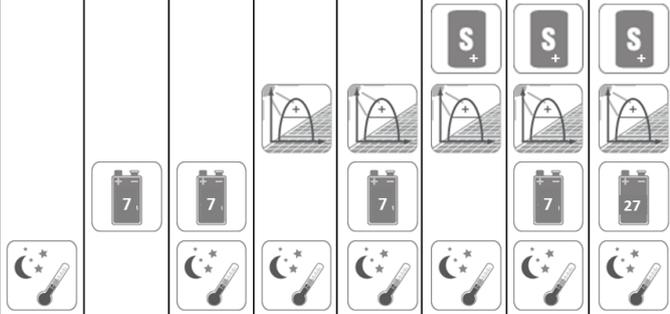
Simulation Kombination	Basis									Pufferspeicher- erweiterung	PV-Regelung	Batteriespeicher (7 kWh oder 27 kWh)	Nacht- absenkung
Gesamtstrombedarf	11.227 kWh	- 2,4 %	0 %	- 2,4 %	+ 1,3 %	+ 1,3 %	+ 4,5 %	+ 4,5 %	+ 4,5 %				
PV-Eigennutzung	27 %	28 %	35 %	36 %	34 %	42 %	38 %	45 %	56 %				
PV-Deckungsanteil	34 %	36 %	42 %	44 %	42 %	49 %	45 %	52 %	62 %				
Netzbezug	7.408 kWh	- 5,2 %	- 11,6 %	- 16,8 %	- 11,1 %	- 15,4 %	- 13,1 %	- 23,5 %	- 40,2 %				

Abbildung 27: Ergebnisse Systemsimulation Steigerung Eigenstromanteil – Jahresauswertung [11]

Trotz deutlicher Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs durch thermische und elektrische Speicher, ist eine größere Auslegung der Komponenten zur Erreichung eines höheren Eigenverbrauchs zu aktuellen Marktbedingungen kaum rentabel. Thermische Speicher sind derzeit wirtschaftlicher als elektrische Batterien. Als Schlussfolgerung ist die Nutzung vorhandener Speicherpotentiale von Warmwasser- und Heizungspufferspeichern sowie der Gebäudemasse durch intelligente Regelungsstrategien derzeit am wirtschaftlichsten.

In WP_{SOURCE} 2.0 wird die PV-Anlage integriert. Bei der Betriebsführung der Wärmepumpe wird jedoch keine Power-to-Heat Regelung hinterlegt. Die Wärmepumpe geht nur bei Wärmebedarfsanforderung in Betrieb. Hinsichtlich der Verteilung des PV-Stroms auf die Verbraucher sieht die in WP_{SOURCE} 2.0 hinterlegte Bilanz vor, dass eigens erzeugter Strom zunächst für den Haushalts- / Nutzerstrom angerechnet wird und dann erst die Wärmepumpe gedeckt wird.

8.2 Photovoltaikmodule

Auf Basis der Angaben von Systemanbietern und Komponentenherstellern, stellt die folgende Recherche einen Überblick der am Markt zurzeit relevanten Anlagen und Komponenten hinsichtlich der Stromerzeugung dar. Die Recherche dient als repräsentativer Überblick und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Neben den Komponenten und der Anlagentechnik, sind das Strahlungsangebot sowie die Ausrichtung und Neigung der Photovoltaikanlage für deren Ertrag ausschlaggebend. In Deutschland liegen die mittleren Erträge zwischen 800 und 1.100 kWh/kW_p, unter der Voraussetzung einer optimalen Ausrichtung und Neigung.[7]

Größer 90 % (Stand 2016) der Photovoltaikzellen, die sog. Wafer, werden aus kristallinem Silizium hergestellt. Dabei wird zwischen monokristallinen und polykristallinen Zellen unterschieden. Diese beiden Zellentypen besitzen Marktanteile von rund 30 % bzw. 70 %. Den restlichen Anteil stellen amorphe Photovoltaikzellen dar, die derzeit im Wesentlichen in der Form von Dünnschichtzellen produziert werden. [8]

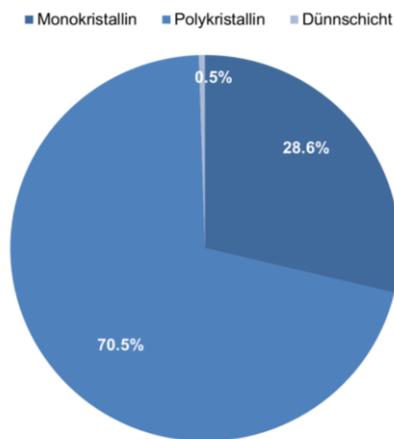


Abbildung 28 Marktanteile der gebräuchlichsten Solarzellentypen (Stand 2016) [8]

Kristalline Photovoltaikzellen

Bei polykristallinen Zellen wird zur Herstellung der Rohstoff Silicium geschmolzen, in Blöcke gegossen und anschließend in Scheiben zersägt. Beim Abkühlen bilden sich unterschiedlich große Kristalle. Verunreinigungen und Kristallgrenzen führen zu einem geringeren Wirkungsgrad gegenüber den monokristallinen Solarzellen, die bei der Herstellung als sogenannter "Einkristall" aus der Schmelze gezogen werden. Durch dieses Herstellungsverfahren entfallen die Einbußen an den Kristallgrenzen.

Zurzeit liegt der Wirkungsgrad von PV-Modulen mit monokristallinen Zellen bei > 22 %, mit polykristallinen Wafern werden Werte zwischen 15 % und 20 % erreicht. Im Vergleich dazu erreichen Module mit amorphen Solarzellen, auch Dünnschichtzellen genannt, aus Silizium etwa die Hälfte der Modulwerte mit polykristallinen Zellen. [9]

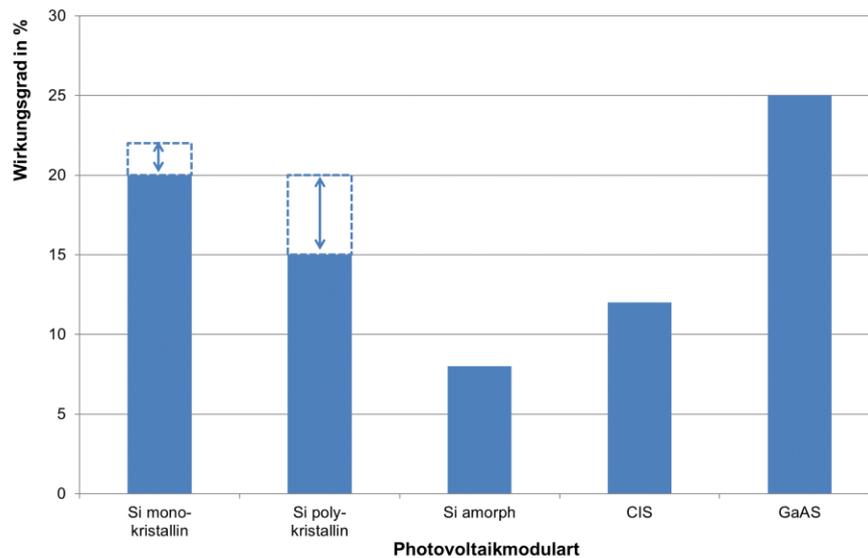


Abbildung 29 Modulwirkungsgrade bei Verwendung unterschiedlicher Solarzellen (Wafer)

Der mittlere Wirkungsgrad eines gesamten Photovoltaiksystems inklusive Leitungsverluste, Ertragseinbußen durch Verschattung und Verschmutzung sowie durch die Umwandlung des Gleichstroms in Wechselstrom, wird als Systemwirkungsgrad bezeichnet. Dieser liegt bei PV-Anlagen mit monokristallinen oder polykristallinen Zellen in einem Bereich von 10 % bis 15 %.

Die aktuellen Entwicklungen und Fortschritte im Bereich der Photovoltaik betreffen im Wesentlichen die Optimierung der Produktion, eine Vereinfachung der Montage und die Logistik. Die Forschung in Bezug auf eine effizientere Nutzung des photoelektrischen Effektes richtet sich hauptsächlich nach neuen und mutmaßlich zukunftsfähigen Technologiefeldern, wie etwa Konzentration PV oder organischen Halbleitern aus.[9]

Dünnschichtmodule - Amorphe und CIS Module

Im Vergleich zu den kristallinen Modulen werden bei den Dünnschichtmodulen keine Kristallblöcke zersägt, sondern das Material direkt, als dünne Schicht, auf das Trägermaterial/ Substrat (z. B. Glas) aufgebracht. Bei der Produktion von CIS-Modulen werden hauptsächlich die Stoffe Kupfer (Cu), Indium (In) und Selen (Se) verwendet.

Dünnschichtmodule sind bis zu 50-mal dünner als kristalline Solarzellen und insbesondere aufgrund des geringeren Materialeinsatzes auch kostengünstiger.

Die am Markt am häufigsten vertretenen Modularten und zugleich einfachste Form unter den Dünnschichtmodulen sind die amorphen (a-Si) und die mikromorphen (μ -Si) Solarzellen. Des Weiteren sind PV-Zellen aus Kupfer-Indium-Selen (CIS) oder Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) sowie Zellen aus Cadmium-Tellurid (CdTe) marktüblich. [9]

Die Wirkungsgrade der Dünnschichtmodule variieren abhängig von der jeweiligen Technologie. Marktübliche, amorphe PV-Module, erreichen einen Modulwirkungsgrad von etwa 8 %. Deutlich besser sind die CI(G)S-Module, bei denen die Modulwirkungsgrade bereits bei etwa 12 % liegen. [9] (siehe Abbildung 29) Dünnschichtzellen haben gegenüber den kristallinen PV-Zellen den positiven Effekt, diffuses (indirektes) Licht effizienter nutzen zu können. Demnach sind sie besonders dann geeignet, wenn eine optimale Ausrichtung oder Neigung der Photovoltaikanlage, z. B. durch örtliche Einschränkungen, nicht möglich ist. Nachteilig ist dagegen das Recycling der CIS-Module, da dieses zum Teil sehr aufwändig ist und für das im Solarmodul befindliche, giftige Selen, besondere Verfahren notwendig sind.

Die im Bereich der Dünnschichtzellen verfügbaren Neuentwicklungen und Sonderbauformen stellen für die im Projekt SolSys betrachteten Anwendungen von Photovoltaik keine relevanten Alternativen dar und werden daher an dieser Stelle nicht weiter diskutiert.

8.2.1 Modulvergleich und Gegenüberstellung

Je nach Anlagengröße und -typ belaufen sich die Investitionskosten (netto) für fertig installierte Photovoltaikanlagen derzeit auf etwa 1.000 bis 1.200 €/kW_p (Stand 2021).[10] Die Anlagenkosten sind in den vergangenen Jahren deutlich gesunken, siehe Abbildung 30. Für eine fertig installierte Photovoltaikanlage kann heutzutage als Gesamtpreis von dem fast dreifachen des Modulpreises ausgegangen werden. Die BOS-Kosten (balance of system) belaufen sich auf rund 60% der Investitionskosten von fertig installierten Aufdachanlagen. Die BOS-Kosten beinhalten u.a. die Wechselrichter, das Montagesystem sowie die Netzanbindung.

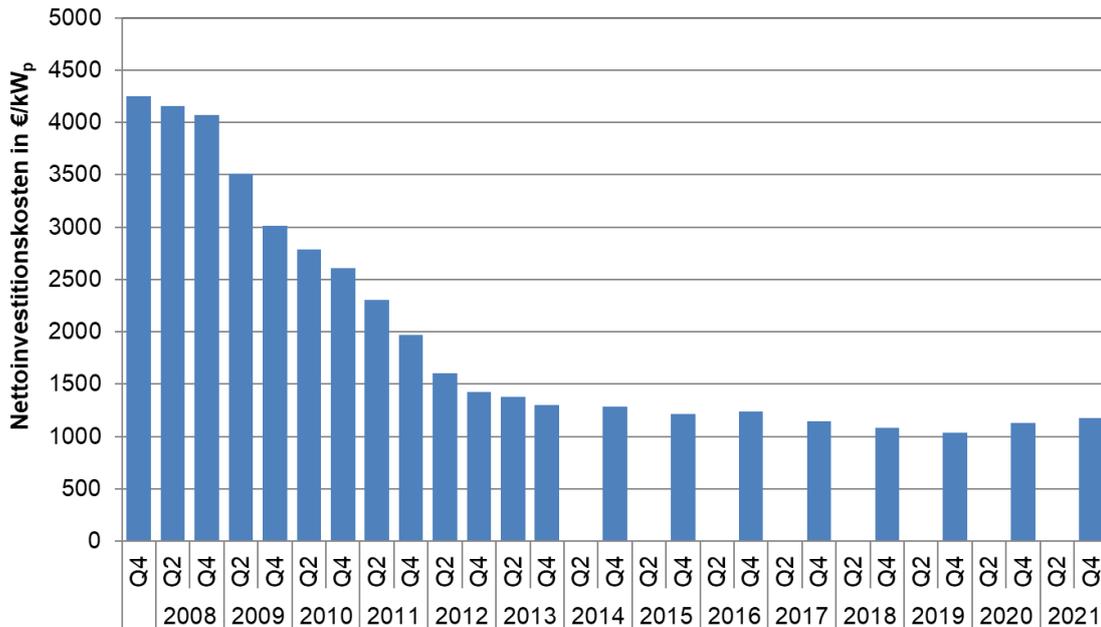


Abbildung 30 Nettoinvestitionskosten von fertig installierten PV-Aufdachanlagen €/kW_p, gültig für Anlagengrößen von 10 bis 100 kW_p (Stand Q4 2021) (in Anlehnung an [9] und [10])

Tabelle 7 Zusammenfassung der PV-Moduldaten

	mono-kristalline PV-Module	polykristalline PV-Module	amorphe PV-Module (Dünnschicht)	CIS-PV-Module (Dünnschicht)
Modulwirkungsgrad in %	20 bis 22	15 bis 20	8	12
spez. Modulkosten (netto) in €/kW _p	500 - 600	500 - 600	350	580
Flächenbedarf für 1 kW _p in m ²	5 - 7	7 - 8	16 -17	rund 10
Modulleistung in W	< 100 – 500	< 100 – 500	< 100 – 540	< 100 – 320

8.3 Elektrische Speicher

Um zeitliche Unterschiede zwischen der Energiebereitstellung durch die PV-Anlage und dem Strombedarf im Gebäude auszugleichen, werden elektrische Speicher in Versorgungskonzepten integriert.

Als Nutzkapazität wird der Teil der Batteriekapazität beschrieben, der für die Anwendung im Betrieb tatsächlich zur Verfügung steht. Im Unterschied zur Nennkapazität ist es der Anteil, der nach Berücksichtigung der Entladetiefe zur Verfügung steht.

Aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit wurde bisher am häufigsten auf Blei-Säure-Batterien oder Blei-Gel-Batterien zurückgegriffen. Die spezifischen Investitionskosten liegen für die Blei-Säure-Batterien mit 150 €/kWh – 1.500 €/kWh (nutzbare Kapazität) um rd. 50 % unter denen von Lithium-Ionen-Batterien (Tabelle 8). Dagegen ist der Vorteil von Lithium-Ionen-Akkumulatoren, dass sie keinen Memoryeffekt haben und sich gut recyceln lassen. Lithium-Ionen-Batterien sind in vielen Anwendungsbereichen (z.B. Notebooks und Mobiltelefone) zum Standard geworden. Auf dem Batteriemarkt für Großbatterien wird anstelle der Lithium-Ionen-Technik die Lithium-Eisen-Phosphat-Technologie eingesetzt. Diese weist eine höhere Zyklenzahl als die der Lithium-Ionen-Batterien und damit eine noch längere Lebensdauer auf. Daneben sind noch sogenannte Redox-Flow- und Hochtemperaturbatterien (Natrium-Schwefel-Batterien) am Markt verfügbar.

Blei-Säure-Batterie

Bedingt durch langjährige Erfahrungen ist die Blei-Säure-Batterie derzeit die am weitesten entwickelte Batterietechnologie. Nicht zuletzt weisen Blei-Säure-Batterien mit rund 150 €/kWh bis 1.500 €/kWh (netto) die geringsten spezifischen Investitionskosten auf.

Bei einer Blei-Säure-Batterie findet die Energiespeicherung mit Hilfe von Elektroden aus Blei und Schwefelsäure statt. Letztere dient sowohl als Elektrolyt als auch als Reaktionspartner. Blei-Säure-Batterien besitzen eine positive und eine negative Elektrode, welche in den Elektrolyten eingetaucht sind. Damit eine Potentialdifferenz entstehen kann, sind die Elektroden durch einen ionenleitenden Separator getrennt (Abbildung 31). Der Separator dient einerseits als Schutz vor Kurzschlüssen und andererseits zur Sicherstellung der Stabilität des Elektrodenmaterials über die Lebensdauer der Batterie. Um ein Austreten von Schwefelsäure zu verhindern, ist die Batterie in einem säurefesten Gehäuse untergebracht. Unterschiede zwischen einzelnen Blei-Säure-Batterien bestehen in der Menge und Zusammensetzung der verwendeten Materialien sowie der Form und der Legierung der Ableiter.

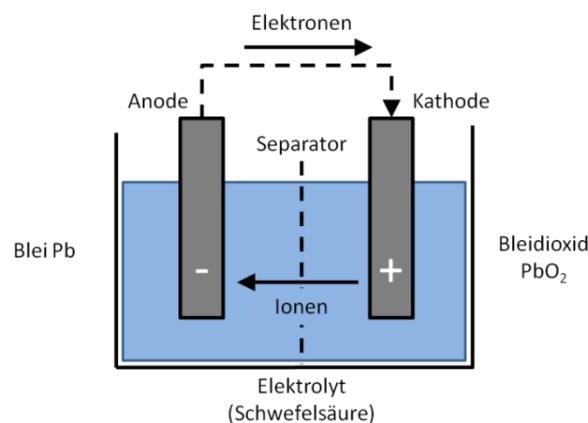


Abbildung 31 Schematischer Aufbau einer Blei-Säure-Batterie

Ein wesentlicher Nachteil von Blei-Säure-Batterien ist die von der Betriebsweise abhängige Alterung. Bei einer Entladetiefe von etwa 50 % bis maximal 70 % erreichen die Batterien bis zu 3.000 Be- und Entladezyklen. Die angegebenen Zyklenzahlen bei Blei-Säure-Batterien gelten für eine Umgebungstemperatur von 20 °C. Wird diese Temperatur um 10 Kelvin überschritten, stellt sich bereits eine Reduktion der Lebensdauer von ca. 25 % ein. Weiterhin sind die minimalen und maximalen Betriebstemperaturen für diese Technologie zu beachten. Temperaturen unter 15 °C sowie über 40 °C sollten gemäß Herstellerangaben vermieden werden. Um ideale Umgebungsbedingungen zu schaffen, sollte der Aufstellungsraum einer Blei-Säure-Batterie belüftet sein.

Im Betrieb mit netzgekoppelten PV-Anlagen liegt die Lebensdauer von Blei-Säure-Batterien bei etwa 5 bis 7 Jahren. Abhängig von der Temperatur und dem Ladezustand können aber auch 15 Jahre erreicht werden. Dies hat zur Folge, dass ein drei- bis vierfacher Batterieaustausch im Lebenszyklus einer PV-Anlage stattfinden muss. Der Wirkungsgrad von Blei-Säure-Batterien liegt zwischen 70 % und 80 %.

Die gute Recyclbarkeit von Blei-Säure-Batterien wirkt sich positiv auf den Ressourcenverbrauch aus. Einerseits ist die Recyclingquote bereits heute sehr hoch, andererseits kann das zurückgewonnene Blei für die Produktion neuer Batterien verwendet werden.

Lithium-Ionen-Batterie

Unter dem Begriff Lithium-Ionen-Batterie wird eine Vielzahl von Batteriesystemen, in denen Lithium in reiner sowie gebundener Form als Aktivmaterial verwendet wird, zusammengefasst. Diese Technologie hat aktuell den stärksten Zuwachs am Markt, da elektrochemische Speicher wie Nickel-Cadmium (NiCd) oder Nickel-Metallhydrid (NiMH) aufgrund der Verwendung von giftigen Schwermetallen in Europa verboten wurden. Lithium-Ionen-Batterien sind vielseitig einsetzbar. Aufgrund des geringen Eigengewichts von Lithium kann im Vergleich zu Blei-Batterien deutlich Gewicht eingespart werden.

Ein wesentlicher Unterschied zu Blei-, NiCd- oder NiMH-Batterien ist, dass keine wässrige sondern wasserfreie, organische Elektrolytflüssigkeiten verwendet werden. Weiterhin bieten Lithium-Ionen-Batterien ein sehr großes Anwendungsspektrum, da unterschiedliche Elektrolyte sowie verschiedene Kombinationen von Elektrodenmaterialien zusammengesetzt werden können und damit unterschiedliche Charakteristika und vielseitige Einsatzmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Im Vergleich zu bspw. NiCd-Batterien tritt zudem kein Memoryeffekt auf, was bedeutet, dass auch nach mehreren Teilentladungen die Zellspannung nicht sinkt.

Bei Lithium-Ionen-Batterien können Entladetiefen bis zu 100 % (angebotene Speicher bis zu 95 %) erreicht werden. Die spez. Investitionskosten sind bei Lithium-Ionen-Batterien jedoch noch sehr hoch, sodass 500 €/kWh bis 6.000 €/kWh veranschlagt werden müssen. Lithium-Ionen-Batterien können im Vergleich zu Blei- oder Nickel-Batterien deutlich höhere Energiedichten und Zyklenfestigkeiten (ca. 1.000 bis 8.000 Vollzyklen) sowie geringere Selbstentladungsraten vorweisen. Ihre Lebensdauer ergibt sich zu 5 bis 20 Jahren. Aufgrund des noch vorhandenen Optimierungspotentials könnten in Zukunft Vollzyklenzahlen bis 10.000 sowie eine weitere Steigerung der Energiedichte erwartet werden.

Der Temperaturbereich für Lithium-Ionen-Batterien liegt zwischen 10 °C und 40 °C, sodass diese ggf. vor äußeren Einwirkungen zu schützen sind. Ein weiterer Nachteil der Lithium-Ionen-Batterien ist ihre extreme Reaktionsfreudigkeit, wodurch bei dieser Technologie die Gefahr besteht, dass bei Über- oder Tiefentladung die Batterie entflammt. Diese Brände sind schwer zu löschen und der Kontakt mit Wasser sollte unterbunden werden. Häufig ist daher der Einsatz einer Steuerelektronik essentiell, welche zur Überwachung möglicher Systemfehler dient und gegebenenfalls ein unsachgemäßes Laden bzw. Entladen unterbricht.

Im Hinblick auf eine mittel- und langfristige Ressourcenverfügbarkeit der in den Lithium-Ionen-Batterien eingesetzten Metalle ist ein umweltgerechtes (und kostengünstiges) Recycling der verwendeten Materialien eine wesentliche Voraussetzung. Bereits heute existieren industrielle Verfahren für die Rückgewinnung der eingesetzten Stoffe. So können in umweltfreundlichen Prozessen u. a. Kobalt, Nickel und Kupfer aus gebrauchten Lithium-Ionen- und Lithium- sowie Polymer-Batterien zurückgewonnen werden. Das Lithium wird in der Prozess-Schlacke zusammen mit den restlichen Schlackemineralien an die Industrie weitergegeben. Möglichkeiten zur Rückgewinnung des Lithiums aus den Schlacken werden zurzeit untersucht.

Redox-Flow-Batterie

Ein neuer Trend im Bereich der stationären Akkumulatoren sind Vanadium-Redox-Flow-Batterien. Eine Vanadium-Redox-Flow-Batterie arbeitet mit einer Technologie, die es wiederaufladbaren Batterietypen ermöglicht, elektrische Energie in chemischen Verbindungen zu speichern. Als elektrochemisch aktive Elemente dienen negativ und positiv geladene Vanadiumelektrolyte, die in jeweils separaten Tanks gelagert werden. Durch die Zirkulation in zwei getrennten Kreisläufen wird an einer Membran eine chemische Reaktion und somit ein Ionenübertragung zwischen den beiden Elektrolyten hervorgerufen. Der modulare Aufbau dieser Batterie ermöglicht die Konstruktion einer Einheit beliebig hoher Leistung und Kapazität. Eine Tiefentladung

ist problemlos. Auch kann der Akkumulator längere Zeit komplett entladen sein, ohne dass es dadurch zu nennenswerten Alterungseffekten kommt.

Redox-Flow-Batterien zeichnen sich durch hohe Zyklenzahlen (> 10.000), Robustheit und große Toleranz gegenüber Tiefenentladung aus. Hinzu kommt, dass diese Batterien so gut wie keine Selbstentladung aufweisen, wodurch auch längere Speicherzeiten realisiert werden können. Die Lebensdauer beträgt derzeit zwischen 10 und 20 Jahren.

Vanadium-Redox-Flow-Batterien sind weder brennbar noch können sie explodieren. Wesentlicher Nachteil dieser Technologie gegenüber Lithium-Ionen-Batterien ist der mit ca. 65 % bis 90 % vergleichbar geringe Wirkungsgrad. Da jedoch das Kosten/Nutzen Verhältnis deutlich besser ist als bei Blei-Säure- oder Blei-Gel-Batterien und erst recht als bei Lithium-Ionen-Akkumulatoren, ist trotz des geringeren Wirkungsgrades derzeit ein stetiges Marktwachstum im Bereich der Vanadium-Redox-Flow-Batterien für stationäre Anwendungen zu verzeichnen.

Der Temperaturbereich des Elektrolyten ist im Gegensatz zu Lithium-Ionen-Batterien mit -5°C bis 40 °C etwas größer, hohe Temperaturen sollten aber dennoch vermieden werden.

Bei Vanadium-Redox-Flow-Batterien ist ein einfaches Recycling möglich, da die Elektrolytflüssigkeit nicht altert und somit nach Ablauf der Batterielebensdauer unmittelbar weiterverwendet werden kann.

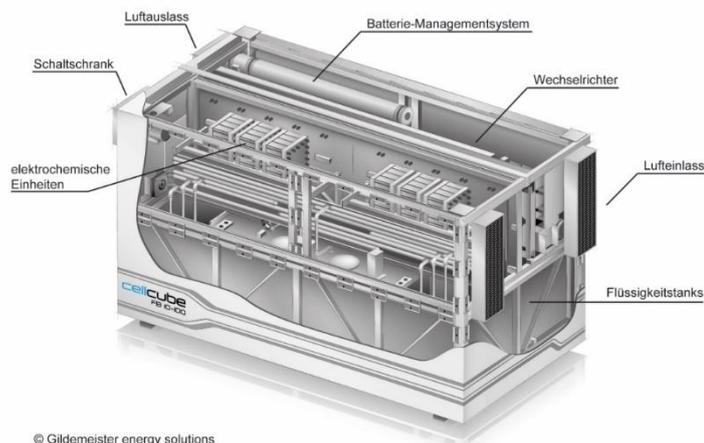


Abbildung 32 Schematische Darstellung des Aufbaus einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie mit Nebenaggregaten [Gildemeister]

NaS-Batterie

Natrium-Schwefel-Batterien, auch Natrium-Schwefel-(NaS)-Akkumulatoren genannt, zählen aufgrund ihrer benötigten Betriebstemperatur von 270 °C bis 350 °C zu den Hochtemperaturbatterien. Diese hohen Temperaturen sind notwendig, damit die Elektroden, bestehend aus flüssigem Schwefel (positive Elektrode) und geschmolzenem Natrium (negative Elektrode), flüssig bleiben. Die Trennung der beiden Elektroden erfolgt durch einen keramischen Separator, der auch als Elektrolyt dient. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu den anderen hier vorgestellten Batteriesystemen, da allein bei den Natrium-Schwefel-Batterien ein fester Elektrolyt und flüssige Elektroden vorliegen.

NaS-Batterien weisen eine hohe Zyklenzahl auf, die jedoch sehr von der Entladetiefe der Batterie abhängig ist. So können bei einer Entladetiefe von 80 % bis zu 2.500 Ladezyklen und bei einer Entladetiefe von 20 % etwa 40.000 Ladezyklen erreicht werden. Eine diskontinuierliche Be- und Entladung bewirkt bei den Batterien hoch Speicherverluste. Zudem tritt durch Abwärme eine Selbstentladung auf, wodurch die Batterien fortwährend beheizt werden müssen. Die Lebensdauer von Natrium-Schwefel-Batterien wird mit etwa 15 bis 20 Jahren veranschlagt. Prinzipiell eignet sich diese Technologie für Anlagen mit regelmäßigem täglichem Zyklus, da durch die hohe Arbeitstemperatur der Zellen, die durch den Lade- und Entladevorgang entsteht, Heizenergie gespart werden kann.

Natrium-Schwefel-Batterien haben einen Wirkungsgrad von etwa 80 % und sind bis zu 97,5% recyclebar, die verbleibenden 2,5% können unbedenklich entsorgt werden.

Tabelle 8 Batteriespeicher zur Anwendung in Wohn- und Nichtwohngebäuden [Herstellerangaben]

Stromspeicher	Blei-Säure	Li-Ion	Redox-Flow	Natrium-Schwefel (NaS)
Wirkungsgrad in %	70 bis 80	90 bis 95	65 bis 90	70 bis 85
Energiedichte in Wh/kg	50 bis 75	200 bis 350	20 bis 70	150 bis 250
Entladetiefe in %	bis 70	bis 100	bis 100	100
Zyklusfestigkeit in Vollzyklen	500 bis 3.000	1.000 bis 8.000	> 10.000	2.500 bis 10.000
Temperaturbereich in °C	15 bis 40	10 bis 40	-5 bis 40	270 bis 350
Lebensdauer in Jahre	5 bis 15 (abh. von Temp. und Ladezustand)	5 – 20 (abh. von Temp. und Ladezustand)	10 bis 20	15 bis 20
Vorteile	- Kosten - Sicherheit - Etablierte Technologie - Recycling	- Lebensdauer - Zyklenzahl - Entladetiefe - Energiedichte - wartungsarm - Gewicht	- hohe Leistungen möglich - Kapazität - Standzeiten - Zyklenzahl - Sicherheit (nicht brennbar)	- Kosten - Lebensdauer - Zyklenzahl
Nachteile	- Lebensdauer - Gewicht - Energiedichte - Belüftung	- Kosten - Sicherheit	- Größe - Gewicht - Wartung	- Arbeitstemperatur (300 - 350 °C) - Standzeiten - Hohe Selbstentladung - potentielle Brandgefahr
Spezifische Investitionskosten (netto) in €/kWh	150 – 1.500	500 – 6.000	600 – 1.200	k.A.

9 AP5 – Kühlung

Für Bürogebäude wird die Kühlung des Gebäudes in das Vordimensionierungsprogramm WP_{SOURCE} mit aufgenommen. Eine ggf. vorhandene Serverkühlung wird bei der durch eine Wärmepumpe zu deckenden Kühl-last jedoch nicht berücksichtigt.

Im Bereich der Serverkühlung kommt es derzeit zu schnellen Veränderungen (Entwicklung, Auslagerung, ...), sodass eine realitätsnahe Einbindung des Kältebedarfs sehr komplex und wahrscheinlich wenig univer-sell abbildbar wäre. Das Monitoring unterschiedlicher Bürogebäude hat zudem gezeigt, dass auch die Ein-bindung einer Serverkühlung zur Regeneration von Niedertemperaturwärmequellen und/oder Unterstützung bei der Wärmebereitstellung anlagentechnisch aufwendig und oft nicht dauerhaft, wie in der Planung ange-setzt, zu realisieren ist.

Für eine Kühlung des Gebäudes mittels einer reversiblen Wärmepumpe bzw. über die freie Kühlung (passive Kühlung) sollen in WP_{SOURCE} die drei Niedertemperaturwärmeübertrager / -quellen

- Luft,
- Erdwärmesonde,
- Eisspeicher und
- Brunnen,
- offenes Gewässer sowie
- kalte Nahwärmenetze

zur Verfügung stehen.

Im Rahmen der Konzeptionierung und Umsetzung des Kühlfalls wird nicht, analog zum Heizfall, auf konkrete Kühlbedarfe zurückgegriffen. Auch aufgrund der von der gegenwärtigen Architektur umgesetzten unter-schiedlichen Glasanteile in den Fassaden und der daraus resultierenden Beeinflussung der Kühllasten wur-den für die Auslegung der Wärmeübertrager vier Kühlbedarfsbereiche definiert:

Kühlbedarf	Bereich
Gering	> 10 – 25 kWh/(m ² a)
Mittel	> 25 – 40 kWh/(m ² a)
Hoch	> 40 – 55 kWh/(m ² a)
Sehr hoch	> 55 – 70 kWh/(m ² a)

Die vier Kühlbedarfsbereiche werden für die Ermittlung von Kühllastprofilen und zur Dimensionierung der Wärmeübertragersysteme herangezogen. Die Kühllastprofile wurden für die unterschiedlichen Kühlbedarfs-bereiche und Standorte (Referenzklimata) durch Simulationen in TRNSYS ermittelt. Die beiden Kältebereit-stellungsmodi a) freie Kühlung und b) aktive Kühlung werden durch Kühllastprofile mit entsprechenden Tem-peraturniveaus berücksichtigt.

Die erarbeiteten Ergebnisse und Auswertungen zur Kühlung von Bürogebäuden über die Niedertemperatur-wärmequellen werden ins Programm aufgenommen. Es erfolgt eine Fortschreibung der Investitionskosten sowie eine ökologische und ökonomische Bewertung.

Kältebedarf

Hinweis: Eine Berücksichtigung einer eventuellen Serverkühlung findet nicht statt.

Modus	berücksichtigen
Kältebedarf	gering (10 bis 25 kWh/m ² a)
<input type="checkbox"/> Erdwärmesonden für ausschließliche freie Kühlung	gering (10 bis 25 kWh/m ² a) mittel (25 bis 40 kWh/m ² a) hoch (40 bis 55 kWh/m ² a) sehr hoch (55 bis 70 kWh/m ² a)

Trinkwarmwasserbedarf

Abbildung 33 Eingabe des Kühlbedarfs in WP_{SOURCE}

10 AP6 – Bivalenter Betrieb der Wärmeerzeuger

Neben der energetischen Versorgung von Neubauten kann auch bei der anlagentechnischen Sanierung oder Modernisierung von bestehenden Heizungsanlagen der bivalente Betrieb von zwei Wärmeerzeugern eine sinnvolle Option sein. Für Bürogebäude und andere Nicht-Wohngebäude, aber auch für Mehrfamilienhäuser, ist eine Heizungsanlage, die den bivalenten Betrieb einer Wärmepumpenanlage gestattet, sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht oft zweckmäßig. Im Versorgungskonzept wird die Wärmepumpe meist vorrangig zur Deckung einer Grundlast herangezogen. Der zweite Wärmeerzeuger dient zur Deckung der Spitzenlast. So wird z. B. zur temporären oder regelmäßigen Unterstützung der Trinkwassererwärmung ein zusätzlicher Wärmeerzeuger, bspw. ein Gasbrennwertkessel, herangezogen. Aufgrund der geringen Leistungsanforderungen ist ein klassischer bivalenter Betrieb in Einfamilienhäusern eher selten zu finden.

Vor diesem Hintergrund werden Wärmeerzeugern, die mit Wärmepumpen zu bivalenten Heizsystemen kombiniert werden können, in das Programm WP_{SOURCE} integriert (siehe Abschnitt 14.3.2.4).

Als zweiter Wärmeerzeuger kann in WP_{SOURCE} ausgewählt werden:

- Gasbrennwertkessel,
- Ölkessel,
- Pelletkessel,
- Heizstab oder
- Fernwärme.

Ein weiterer Anwendungsfall für einen bivalenten Betrieb ist die Einbindung von Solarenergie. Seitens der Hersteller von Wärmepumpen oder Wärmeübertragern für Niedertemperaturwärmequellen sowie von Haustechnikplanern und/oder Architekten das Interesse, die thermische Nutzung von Solarenergie nicht nur zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung, sondern auch für die Raumheizung in die Wärmeversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern zu integrieren. In WP_{SOURCE} erfolgt im Zuge des zweiten Wärmeerzeugers eine Erweiterung auf Kombianlagen zur solarunterstützten Erwärmung von Trinkwasser und zur solaren Unterstützung der Raumheizung in Ein- und Mehrfamilienhäusern. Die Bearbeitung erfolgt unter Kapitel 7.2 und wird nicht als „klassisches“ bivalentes Heizsystem sondern als separate Wärmeerzeugung berücksichtigt.

Neben den zweiten Wärmeerzeugern und der Solarthermie kann auch noch ein Kaminofen in das Wärmeversorgungskonzept integriert werden. Der Kaminofen dient dann als zusätzliche Wärmequelle. Die Einbindung in WP_{SOURCE} ist Abschnitt 14.3.2.5 zu entnehmen.

In Bezug auf Wärmepumpenanlagen werden unter bivalenten Systemen bzw. einer bivalenten Betriebsweise Heizungsanlagen verstanden, die z. B. eine elektrische Wärmepumpe in Kombination mit üblicherweise einem weiteren Wärmeerzeuger (z. B. Gas- oder Festbrennstoffkessel oder Fernwärme) und einer übergeordneten Regelung vereinen. Insbesondere bei der Verwendung von Luft/Wasser-Wärmepumpen ist eine monovalente Betriebsweise ökologisch und ökonomisch oft nicht sinnvoll.

Der bivalente Betrieb eines Wärmepumpensystems kann aus unterschiedlichen Gründen erforderlich sein:

- Die Wärmepumpe kann die für die Raumheizung und/oder die Trinkwassererwärmung geforderte Temperatur nicht ganzjährig oder nur sehr ineffizient zur Verfügung stellen.
- Die minimal zulässige Wärmequellentemperatur für die Wärmepumpe wird im Betrieb unterschritten.
- Der Platzbedarf für die Niedertemperaturwärmequelle reicht für einen monovalenten Betrieb nicht aus.
- Die Wärmepumpe kann die für die Heizung oder Trinkwassererwärmung geforderte Heizleistung nicht ganzjährig zur Verfügung stellen.
- Im Rahmen der energetischen Modernisierung eines Gebäudes wird die vorhandene Heizungsanlage durch eine Wärmepumpe ergänzt. Durch eine Sanierung der Gebäudehülle sinkt die Heizlast, sodass der vorhandene Kessel zu einem späteren Zeitpunkt außer Betrieb genommen werden kann.

- Durch die Verwendung unterschiedlicher Energieträger bieten bivalente Systeme eine höhere Versorgungssicherheit.

Aus unterschiedlichen Anwendungsfällen resultieren unterschiedliche Betriebsweisen zweier Wärmeerzeuger (Abbildung 34). Grundsätzlich kann die Betriebsweise einer Wärmepumpe und eines zusätzlichen Wärmeerzeugers wie folgt umgesetzt sein

- **monovalent**
 Hier erfolgt die Wärmebereitstellung ausschließlich über die Wärmepumpe. Ein zweiter Wärmeerzeuger wird nicht betrieben und ist im Normalfall nicht erforderlich.
- **bivalent parallel**
 Oberhalb des definierten Bivalenzpunktes (z. B. einer festgelegten Außentemperatur) erfolgt die Wärmebereitstellung ausschließlich durch die Wärmepumpe. Unterhalb des Bivalenzpunktes wird der zweite Wärmeerzeuger parallel zur Wärmepumpe betrieben.
- **bivalent teilparallel**
 Oberhalb des Bivalenzpunktes erfolgt die Wärmebereitstellung ausschließlich durch die Wärmepumpe. Unterhalb des Bivalenzpunktes wird der zweite Wärmeerzeuger parallel zur Wärmepumpe betrieben. Liegt die Außentemperatur unterhalb eines zusätzlich definierten Abschaltpunktes, wird die Wärmepumpe abgeschaltet und die gesamte Heizwärme durch den zusätzlichen Wärmeerzeuger bereitgestellt.
- **bivalent alternativ**
 Bei dieser Betriebsart erfolgt die Wärmebereitstellung oberhalb des Bivalenzpunktes ausschließlich durch die Wärmepumpe. Unterhalb des Bivalenzpunktes wird die Wärmepumpe abgeschaltet und die gesamte Heizwärme durch den zweiten Wärmeerzeuger bereitgestellt.

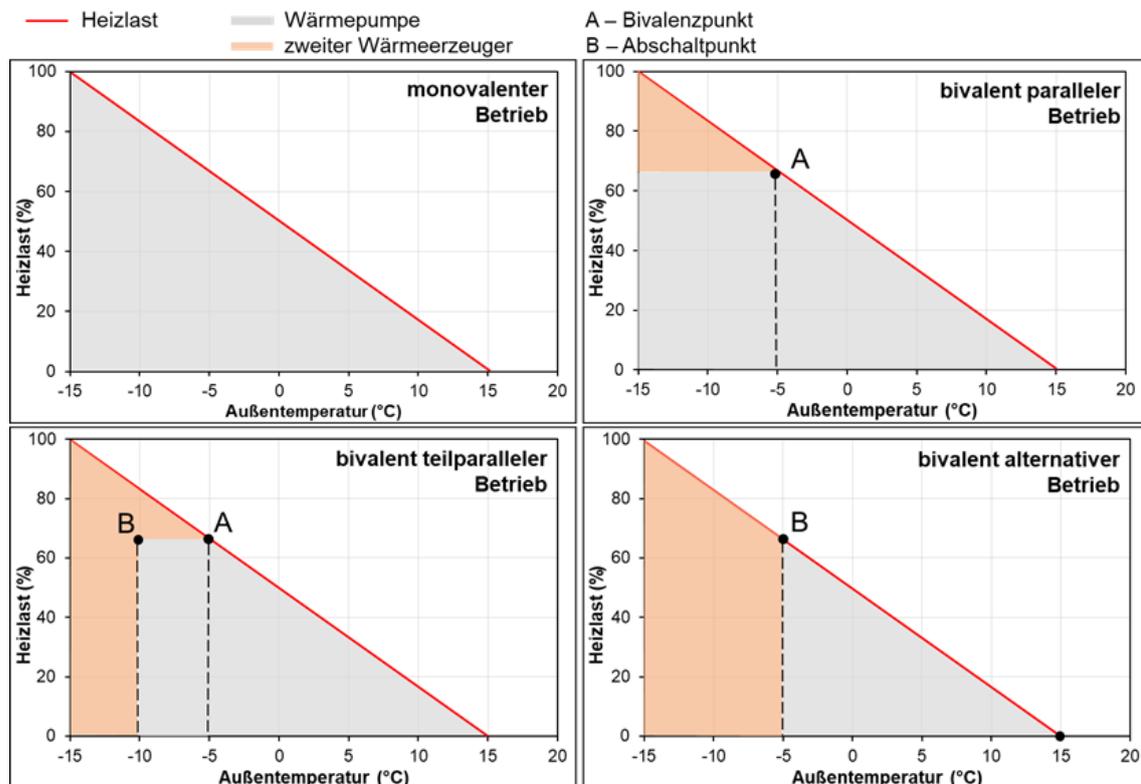


Abbildung 34 Betriebsweisen einer Wärmepumpe und eines zusätzlichen (zweiten) Wärmeerzeugers

Für die Einbindung eines zweiten Wärmeerzeugers in das Wärmeversorgungskonzept im Vordimensionierungsprogramm wird neben dem vorhandenen monovalenten Betrieb der bivalent parallele Betrieb betrachtet. Die Wärmepumpe soll im Konzept den Hauptwärmeerzeuger darstellen und daher ganzjährig die Wärmebereitstellung unterstützen.

Hinsichtlich der Implementierung eines bivalenten Betriebes und der zugehörigen Regelung sowie der Dimensionierung der Anlagenkomponenten orientiert sich die Erweiterung von WP_{SOURCE} an den Vorgaben der DIN V 4701-10 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sowie dem Informationsblatt Nr. 57 des Bundesverbandes der Deutschen Heizungsindustrie (BDH) [17]. Als Berechnungsgröße für den Bivalenzpunkt wird die Außentemperatur herangezogen.

Für die Ermittlung und Festlegung des Bivalenzpunktes stehen dem Nutzer zwei Möglichkeiten zur Verfügung

1. Bivalenzpunkt: direkte Festlegung des Bivalenzpunktes (Außentemperatur), d. h. des Einschaltpunktes des zweiten Wärmeerzeugers.
 Unter Berücksichtigung der Standortangaben und des jeweiligen Gebäudestandards werden in WP_{SOURCE} abhängig vom Bivalenzpunkt Leistungsdaten für die Wärmeerzeuger und deren Anteile an der Deckung des Gesamtwärmebedarfs ermittelt. Diese Größen nehmen Einfluss auf die der Niedertemperaturwärmequelle zu entziehenden Energiemengen und damit die Dimensionierung der zugehörigen Wärmeübertrager.
2. Leistungsanteil: Festlegung des Anteils der Wärmepumpe am Gesamtleistungsbedarf.
 Auf Basis des Leistungsanteils, unter Berücksichtigung der Standortangaben und des jeweiligen Gebäudestandards sowie den Leistungsdaten der Wärmepumpe ermittelt das Programm den Bivalenzpunkt und die Energiemengen, die Einfluss auf die Dimensionierung der Niedertemperaturwärmequellen und die zugehörigen Wärmeübertrager haben.

Weitere Wärmeerzeuger

bivalenter Wärmeerzeuger *) Gaskessel
 *) immer in bivalent-paralleler Betriebsweise (siehe Grafik rechts)

Nutzungsgrad 92 %
 System mit Brennwerttechnik

Auslegung nach Bivalenzpunkt
 Außentemperatur am Bivalenzpunkt -5.0 °C

Ist die benötigte Leistung zur Trinkwarmwasserbereitstellung deutlich höher als die maximale Heizlast, kann es sein, dass der bivalente Erzeuger nie genutzt wird, da die Wärmepumpe auch bei niedrigen Temperaturen immer genügend Leistungsreserven zur Deckung des Heizwärmebedarfs aufweist.

zusätzlicher Kaminofen vorhanden

(zum Vergrößern anklicken)

Abbildung 35 Auswahl der Wärmeerzeuger und Auslegungskriterien in WP_{SOURCE} 2.0

11 AP7 – Siedlungen und Quartiere

Vor dem Hintergrund der Energiewende ist eine energieeffiziente Wärmebereitstellung für Raumheizung und erwärmtes Trinkwasser unumgänglich. Für die Wärmeversorgung von Siedlungen und Quartieren bilden Nahwärmenetze mit Wärmepumpen zukünftig ein wichtiges Infrastrukturelement. Wärmepumpen können die benötigte Wärme im Vergleich zu fossilen Wärmeerzeugern mit geringen Primärenergieanteilen bereitstellen und verfügen, richtig dimensioniert, über eine hohe Effizienz. Dabei bieten sie die Möglichkeit einer räumlichen und zeitlichen Abstimmung von Wärmequelle, Wärmeerzeugung und Wärmenachfrage über Netzauslegung, Netztemperaturen und Wärmespeicher. Auf diese Weise können wirtschaftlich und technisch optimierte Wärmeversorgungssysteme geschaffen werden.

Die Einbindung von Wärmepumpen in Nahwärmenetze kann die Erschließung von zuvor ungenutzten und natürlichen Niedertemperaturwärmequellen zur Wärmebereitstellung ermöglichen. Dadurch können die Primärenergieanteile und CO₂-Emissionen bei der Wärmeerzeugung reduziert werden.

11.1 Netztypologien

Aus den im Projekt erarbeiteten Grundlagen und betrachteten Beispielnetzen lassen sich drei unterschiedliche Netztypologien für eine zukunftsorientierte Nahwärmeversorgung von Quartieren mit Wärmepumpen definieren (Abbildung 36). Die Konzepte unterscheiden sich in den Netztemperaturen, Betriebsweisen und nutzbaren Niedertemperaturwärmequellen sowie in den Einsatzgebieten.

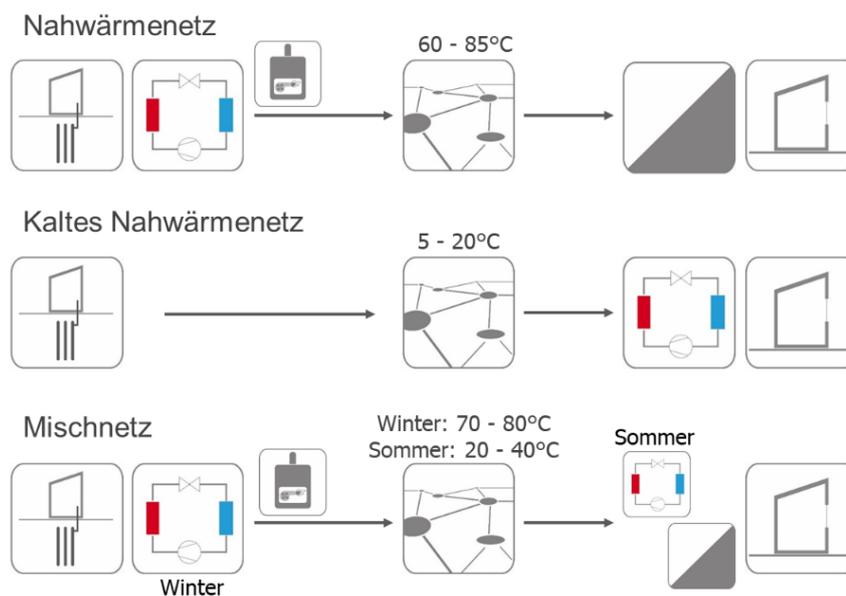


Abbildung 36 Netztypologien für die Wärmeversorgung von Siedlungen und Quartiere

11.1.1 Konventionelles Nahwärmenetz mit zentraler Wärmepumpe

Der Aufbau konventioneller Nahwärmenetze ist in erster Linie für Gebiete mit zu versorgenden Gebäuden interessant, in denen bislang gebäudeinterne und brennstoffbasierte Wärmeerzeugung vorliegt, die hohe Vorlauftemperaturen voraussetzen. Damit kommen vor allem Bestandsquartiere mit konventionellen Heizungssystemen in Betracht, die in der Regel zudem hohe Wärmebedarfsdichten aufweisen. Wohn- und Mischgebiete mit Mehrfamilienhäusern und Gewerbeimmobilien sind für konventionelle Nahwärmeversorgungskonzepte besonders interessant. Aufgrund der niedrigeren Wärmebedarfsdichte sind Versorgungsgebiete mit reiner Einfamilienhausbebauung (insbesondere Neubauten) weniger geeignet. Für die Verbraucher

fallen bei der Umstellung auf eine konventionelle Nahwärme überschaubare Investitionen, im Wesentlichen in neue Heizungstechnik, an (Tausch der alten Heizungsanlage gegen einen Hausübergabestation für die Nahwärme).

Temperaturniveau

In Verbindung mit einer Umweltwärmequelle stellt eine zentrale Wärmepumpe (Deckung der Grundlast des Wärmenetzes) in Kombination mit einem weiteren Wärmeerzeuger Vorlauftemperaturen zwischen 60 °C und 85 °C zur Verfügung. Das Temperaturniveau des Nahwärmenetzes reicht in der Regel für die Raumheizung und die Trinkwassererwärmung aus. Je nach Wärmeentzug liegt die Rücklauf-temperatur zwischen 50 °C und 35 °C.

Wärmequellen

Als Wärmequellen für die Wärmepumpen kommen sowohl Erdwärmesonden, Grundwasser sowie solarthermisch gespeiste Langzeitwärmespeicher in Frage. Bietet das Versorgungsgebiet die notwendige Infrastruktur, kann zusätzlich Abwasser als Wärmequelle nutzbar gemacht werden.

konventionelles Nahwärmenetz mit zentraler Wärmepumpe				
Versorgungsgebiet	Gebäude	Netz	Wärmeerzeugung	Wärmequelle
<ul style="list-style-type: none"> Bestandsquartiere Wohn- und Mischgebiet 	<ul style="list-style-type: none"> Hausübergabestation konventionelles Heizsystem (hohe Vorlauf-temperaturen) Warmwasser / Speicherladesystem 	<ul style="list-style-type: none"> Vorlauf-temperatur 60°C bis 85°C 	<ul style="list-style-type: none"> zentrale Wasser/Wasser-Wärmepumpe oder Sole/Wasser-Wärmepumpe (Grundlast) BHKW bzw. Biomasseverbrennung 	<ul style="list-style-type: none"> Erdwärmesonden Grundwasser Abwasser Solarthermie mit Langzeitwärmespeicher

Abbildung 37 Übersicht konventionelles Nahwärmenetz mit zentraler Wärmepumpe

11.1.2 Kaltes Nahwärmenetz mit dezentralen Wärmepumpen

Ein kaltes Nahwärmenetz mit dezentralen Wärmepumpen eignet sich besonders zur Versorgung von Neubaugebieten mit Wohnbebauung. Der Vorteil kalter Nahwärme besteht nicht unbedingt im Wärmepreis, sondern in der Einbindung des Netzes in Versorgungsgebiete, die sich durch niedrige Wärmebezugsdichten, unsichere Bedarfsstrukturen und mögliche Erweiterungen infolge weiterer Aufsiedlungen auszeichnen. Kalte Nahwärmenetze sind insbesondere vor dem Hintergrund interessant, dass Wärmeverbräuche von Häusern im Zuge von Gebäudesanierungen (Gebäudedämmung) sinken und infolge dessen die Wärmebedarfsdichten abnehmen. Um einen wirtschaftlichen Betrieb der Verteilnetze zu gewährleisten, kann in Neubaugebieten ein Anschlusszwang an eine kalte Nahwärme sinnvoll sein.

Temperaturniveau

Mit Sole als Wärmeträger stellen die Netze üblicherweise Temperaturen im Bereich von 5 °C bis etwa 20 °C bereit. Aufgrund der geringen Wärmeverluste und ggf. sogar Wärmegewinnen aus der Umgebung, lässt sich kalte Nahwärme auch bei geringen Wärmebedarfen effizient betreiben. Für den normalen Netzbetrieb wird kein zusätzlicher Wärmeerzeuger benötigt. Die Wärmepumpen sind in den Gebäuden verbaut und beziehen ihre Wärme aus dem Netz. Bei der Verwendung von Ökostrom für die Wärmepumpen kann die Wärmeversorgung damit CO₂-neutral betrieben werden.

Die Beförderung des Wärmeträgers im Verteilnetz wird durch die einzelnen Förderpumpe der dezentralen Wärmepumpen in den angeschlossenen Gebäuden realisiert. Liegt kein Wärmebedarf vor, steht der Wärmeträger im Verteilnetz still. Um eine Absenkung des Temperaturniveaus durch Wärmeübertrager zwischen Wärmequelle und Verteilnetz zu vermeiden, durchströmt der Wärmeträger aus der Niedertemperaturwärmequelle das Verteilnetz direkt.

Wärmequelle

Abhängig von den lokalen Bedingungen können eine Reihe von Umweltwärmequellen zur Verfügung stehen, die zur Deckung der benötigten Last ausreichen und einen zusätzlichen Wärmeerzeuger erübrigen. Gängige Wärmequellen sind in diesem Zusammenhang vor allem Erdwärmesonden und Agrothermiekollektoren sowie Langzeitwärmespeicher wie Eisspeicher oder Erdspeicher.

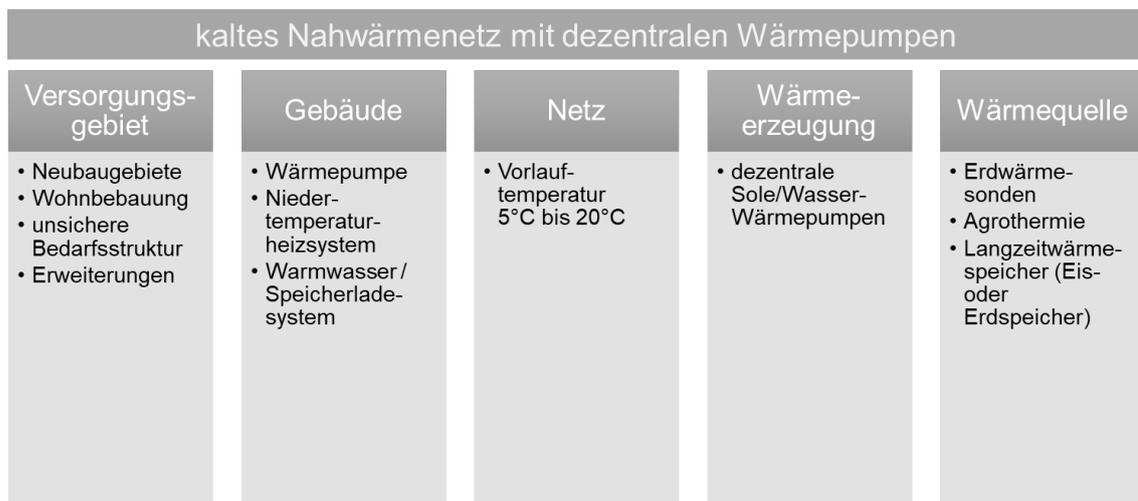


Abbildung 38 Übersicht kaltes Nahwärmenetz mit dezentralen Wärmepumpen

11.1.3 Mischnetz

Die Umstellung eines bestehenden (konventionellen) Nahwärmenetzes auf ein Mischnetz mit zentraler und dezentralen Wärmepumpen kann die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Wärmeversorgung verbessern. Hierbei wird das Netz in den Wintermonaten als konventionelles Nahwärmenetz betrieben. Als Wärmeerzeuger dient z. B. ein BHKW zusammen mit einer zentralen Wärmepumpe. In den Sommermonaten erfolgt eine Reduzierung der Netztemperatur, die Heizwärmebereitstellung und Trinkwassererwärmung erfolgt mithilfe dezentraler Wärmepumpen in den angeschlossenen Gebäuden. Die Heizzentrale mit dem BHKW kann während dieser Zeit abgeschaltet werden. Mischnetze bieten den Vorteil, Wärme auf bedarfsorientierten Temperaturniveaus bereit zu stellen. Da die vorhandenen Nahwärmetrassen genutzt werden, sind für die Umstellung auf ein Mischnetz üblicherweise keine Arbeiten an den Leitungen notwendig. Für den Netzbetreiber entstehen meist nur relativ geringe Investitionskosten.

Temperaturniveau

Mischnetze bieten den Vorteil, Wärme auf bedarfsorientierten Temperaturniveaus bereit zu stellen. In den Wintermonaten werden die Netze als konventionelle Nahwärmenetze mit zentraler Wärmeerzeugung und Netzvorlauftemperaturen im Bereich von etwa 70 °C bis 80 °C betrieben. Werden keine hohen Vorlauftemperaturen mehr benötigt (Übergangszeiten und Sommermonate), erfolgt eine Reduzierung der Netzvorlauf-temperatur auf etwa 20 °C bis 40 °C.

Wärmequelle

Als Wärmequelle für die Wärmepumpe können grundsätzlich alle Umweltwärmequellen eingesetzt werden, die auch für den Wärmepumpenbetrieb in einem konventionellen Nahwärmenetz genutzt werden. Aufgrund der beständigen Quellentemperaturen während der Wintermonate von rund 10 °C bietet sich insbesondere die Nutzung von Erdwärmsonden oder Grundwasser an.

Mischnetz mit zentraler und dezentralen Wärmepumpen				
Versorgungsgebiet	Gebäude	Netz	Wärmeerzeugung	Wärmequelle
<ul style="list-style-type: none"> Bestandsquartier Wohn- und Mischgebiet vorhandenes Netz 	<ul style="list-style-type: none"> Wärmepumpe Hausübergabestation konventionelles Heizsystem (hohe Vorlauftemperaturen) Warmwasser / Speicherladesystem 	<ul style="list-style-type: none"> Vorlauf-temperatur Sommer: 20°C bis 40°C Vorlauf-temperatur Winter: 70°C bis 80°C 	<ul style="list-style-type: none"> Sommer: dezentrale Wasser/Wasser-Wärmepumpen Winter: zentrale Wärmepumpe und BHKW 	<ul style="list-style-type: none"> Erdwärmsonden Grundwasser Solarthermie mit Langzeitwärmespeicher

Abbildung 39 Übersicht Mischnetz mit zentralen und dezentralen Wärmepumpen

11.2 Liste der betrachteten Quartiere und Siedlungen

Im Rahmen des Quervergleichs wurden 90 Siedlungen und Quartiere in ganz Deutschland ermittelt. Es ist zu beachten, dass diese Analyse auf eine begrenzt zur Verfügung stehende Datengrundlage beruht und deutlich mehr Versorgungsnetze in Quartieren und Siedlungen umgesetzt wurden. Die Ergebnisse stellen daher einen Überblick über umgesetzte Versorgungsnetze und deren Konzepte dar.

Da nicht für alle Quartiere und Siedlungen alle betrachteten Informationen vorlagen, stellen die Auswertungen größtenteils nur einen Teilbereich dar.

Tabelle 9 Überblick über die in die Auswertung mit einbezogenen Quartiere und Siedlung

Ort	Projektname	Inbetriebnahme	Netztyp
Aparthotel Parkallee			Konventionell
Auhagen	Dühlholzkäampe-Süd	2021	Kalte Nahwärme
Bad Nauheim	"Bad Nauheim Süd"; angrenzend an "Am Holzweg"		Kalte Nahwärme
Bad Nauheim	"Am Holzberg"; Baugebiet östlich der "Römerstraße" Stadtteil Rödtdgen	2022	Kalte Nahwärme
Bedburg-Kaster			Kalte Nahwärme
Bergheim		2015	Konventionell
Berlin	Neulichterfelde	in Planung	Kalte Nahwärme
Berlin	Karlshorst	seit 2016 gebaut	Konventionell
Berlin Lichterfelde	Märkische Scholle	2014	Konventionell
Berlin-Zehlendorf		2016	Kalte Nahwärme
Biberach	Hochvogelstraße	2016	Kalte Nahwärme
Bodenmais		2014	Mischnetz
Böklund	Dammbrück	2022	Kalte Nahwärme
Borken	Baugebiet Schmeing		Kalte Nahwärme
Crailsheim		2003	Konventionell
Damme	Westlich der Bahn	Baubeginn 2021	Kalte Nahwärme

Darmstadt	Echo Holzhof Park		Kalte Nahwärme
Darmstadt Bessungen	Alte Gärtnerei		Kalte Nahwärme
Dingolshause	Mönchstockheimer Weg 3		Kalte Nahwärme
Dollnstein		2014	Mischnetz
Dorsten	Neue Stadt Wulfen bzw. Primärenergiesparende Wärmeversorgung der Wohnsiedlung Stadtkern West	1982	Kalte Nahwärme
Dortmund-Hörde		2011	Kalte Nahwärme
Drammen	in Norwegen		Konventionell
Dronninglund	in Dänemark		Konventionell
Eckernförde	Noorblick (alte Fachhochschule)	2020	Kalte Nahwärme
Eckernförde	Berender Redder	2014	Kalte Nahwärme
Esslingen	Grüne Höfe	2019	Kalte Nahwärme
ETH Zürich	Hönggerberg	2013	
FGZ- Friesenberg		2019	
Fischerbach		2013	Kalte Nahwärme
Flensburg	Claire-Morré-Straße	Baubeginn 2011	Kalte Nahwärme
Frankfurt	Stadtgärten	2019	Mischnetz
Gau-Algesheim			Kalte Nahwärme
Gelsenkirchen	Kokerei Hassel "Wohnen am Stadtteilpark"	Baubeginn 2020	Kalte Nahwärme
Geltingen	Geltinger Bucht	Baubeginn 2017	Kalte Nahwärme
Gerolzhofen	Am Nützelbach		Kalte Nahwärme
Greven	Klimaschutzsiedlung Emsterrassen	2015	Konventionell
Grevenbroich	An Mevissen		Konventionell
Hamburg		2017	Konventionell
Hamel	Solarsiedlung am Ohrberg	2000	Kalte Nahwärme
Harthausen	Südlicher Woggraben - Teilbereich Ost		Kalte Nahwärme
Haßfurt	Am Osterfeld II	2016	Mischnetz
Hilter a.T.W.	Erkings Hof	Baubeginn 2021	Kalte Nahwärme
Hüsby	Schief-Schetten-Redder	Baubeginn 2019	Kalte Nahwärme
Ilsfeld		2019	Konventionell
Ingelheim	Gänsberg		Kalte Nahwärme
Ingelheim	Park De Roock		Kalte Nahwärme
Kaarst	Stadtinsel Kaarst	2019	Kalte Nahwärme
Kerpen	Vinger Weg		Mischnetz
Kerpen	Quellenpark Horrem	in Vorplanung	Mischnetz
Loose	An der Kollholmer Au		Kalte Nahwärme
Ludmilla	EINS – Plusenergiesiedlung; Ludmilla-Wohnpark Landshut		Kalte Nahwärme
Ludwigsburg		2011	Konventionell
Maikammer	Eulbusch 3		Kalte Nahwärme
Mainz	Küferweg		Kalte Nahwärme
Mainz-Weisenau	Gartenquartier		Konventionell
Malchen	bei Darmstadt, Leben im 21. Jahrhundert		Kalte Nahwärme
March- Hugstetten		2009	Kalte Nahwärme
Markdorf	Projekt Siebenhaller	2010	Konventionell
Meitingen		Teilbetrieb seit 2018	Kalte Nahwärme
München	Am Ackermannbogen	2006	Konventionell
Neustadt am Rübenberge	Hüttengelände – Das Klimaquartier am Rübenberge	2022	Kalte Nahwärme
Nümbrecht		2012	Kalte Nahwärme
Nümbrecht	Benroth	in Planung	Konventionell
Offenbach am Main	Kaiserlei	geplant 2022	Kalte Nahwärme
Petershagen	Energieinsel Petershagen	2020	Kalte Nahwärme
Radevormwald	Karhausen		Kalte Nahwärme
Reetdorf	Geltinger Birk	2020	Kalte Nahwärme
Reichenbach	an der Fils		Kalte Nahwärme
Rendsburg	Uhrenblock	2019	Kalte Nahwärme

Rieseby	Rieseby	2019	Kalte Nahwärme
Rostock			Konventionell
Rottenburg-Ergenzingen	Öchsner II		Kalte Nahwärme
Schifferstadt	Max-Ernst-Str	2017	Kalte Nahwärme
Schleswig	Wichelkoppeln "Erdeis 2"	2021	Kalte Nahwärme
Schleswig	Auf der Freiheit	2022	Kalte Nahwärme
Schwebheim	Strüdelein Ost		Kalte Nahwärme
Schwielowsee	Blütenviertel	Baubeginn 2020	Kalte Nahwärme
Sickingen	Jungenddorf Sickingen		Konventionell
Soest	"Soester Norden"	2021	Kalte Nahwärme
Sommerach	Südl. Baugebiet Volkacher Str. 3		Kalte Nahwärme
Suurstoffi-Areal	Risch/Rotkreuz	2012	
Troisdorf		2015	Kalte Nahwärme
Viersen	Oststraße 2	2018	Konventionell
Warendorf	In de Brinke		Kalte Nahwärme
Wien	Geblergasse	2019	Konventionell
Wiesbaden	Doppelhaussiedlung		Kalte Nahwärme
Wiesentheid	Weihersbrunnen 3		Kalte Nahwärme
Wulfen - Dorsten	Wulfen	1975	Kalte Nahwärme
Wüstenrot	Wüstenrot	2012	Kalte Nahwärme

11.3 Quervergleich der Versorgungskonzepte von Quartieren und Siedlungen

11.3.1 Netztypologie

Von den 89 erfassten Wärmenetzen sind 21 als konventionelles Nahwärmenetz, 62 als kaltes Nahwärmenetz und 6 als Mischnetz konzipiert. (Abbildung 40) Es wird deutlich, dass neu errichtete Quartiere und Siedlungen mit einem kalten Nahwärmenetz ausgebaut werden.

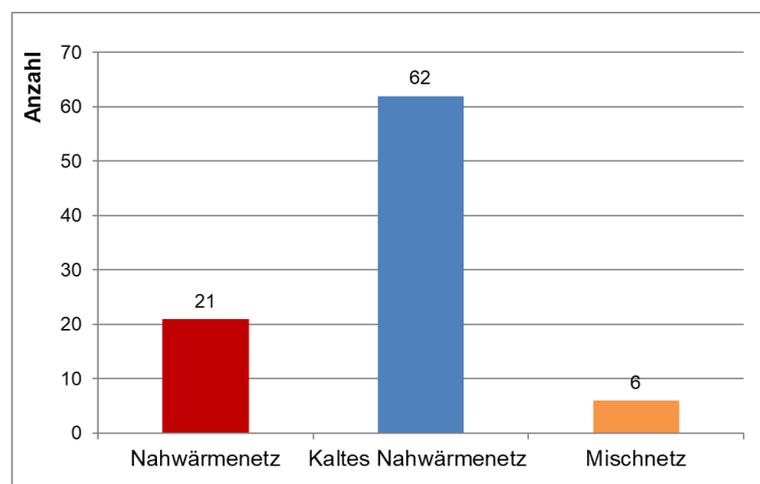


Abbildung 40 Verteilung der Netztypologien innerhalb der betrachteten Quartiere und Siedlungen

11.3.2 Niedertemperaturwärmequellen

Die betrachteten Netze nutzen unterschiedlichste Umweltwärmequellen und Übertragungssysteme zur Wärmebereitstellung. Grundsätzlich wird bei den unterschiedlichen Netztypologien auch zwischen Wärmequellen für die Wärmebereitstellung über die Wärmepumpe und den erforderlichen Zusatzerzeugern im Netz unterschieden.

Bei den betrachteten Netzen werden insgesamt 40 der Wärmenetze von Erdwärmesonden und 20 Netze von Erdwärmekollektoren gespeist. Jeweils ein Netz hat Agrothermiekollektoren und Erdspeicher implementiert.

17 der betrachteten Netze nutzen Wasser als Wärmequelle zur Wärmebereitstellung, sechs davon verwenden Grundwasserbrunnen. Insgesamt verwenden drei Netze einen Eisspeicher und weitere drei Netze machen sich Abwasser als Wärmequelle zu Nutzen. Neben den betrachteten Wärmequellen verwenden fünf der Netze unterschiedlichste Wasserwärmequellen wie Regenwasser (Zisterne), Meerwasser oder Sumpfungswasser, die in der Betrachtung unter diverser Wasserquellen zusammen gefasst wurden.

Neben den zuvor beschriebenen Wärmequellen nutzen zudem sechs der Netze Abwärme, 13 Netze Solarthermie und ein Netz Energiezäune als Wärmequelle für die Wärmebereitstellung mithilfe von Wärmepumpen.

Zur zusätzlichen Wärmeerzeugung wird von drei der Netze eine Biomasseverbrennung betrieben, acht der Netze haben BHKWs in den Netzbetrieb integriert, weitere zwei Netze nutzen den Rücklauf von Fernwärmenetzen und ebenfalls acht Netze betreiben Gas-Brennwertkessel zur Spitzenlastdeckung. (Abbildung 41)

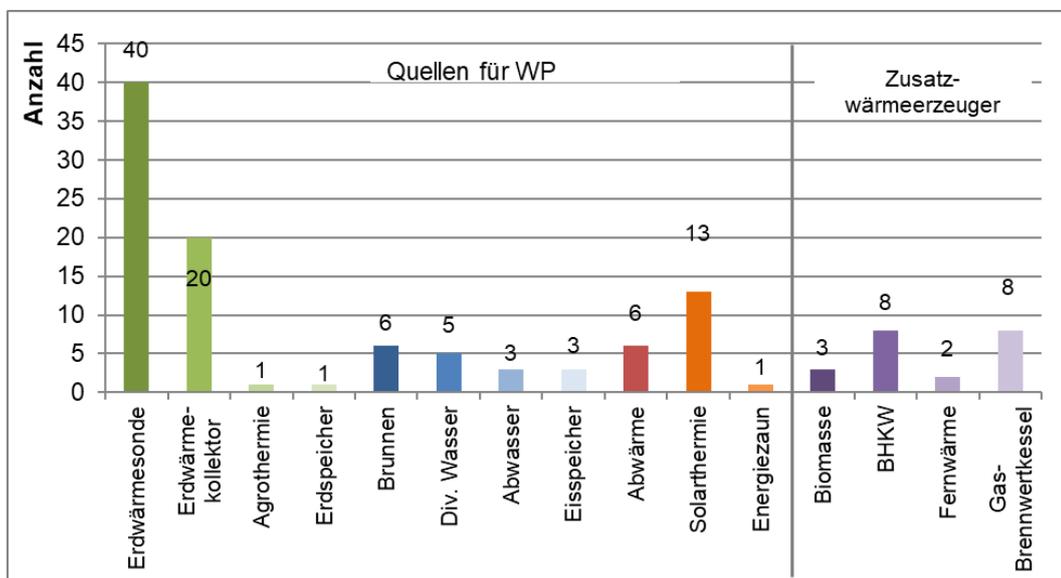


Abbildung 41 Art der verwendeten Wärmequellen in den betrachteten Netzen sowie Zusatzwärmeerzeuger sowie Anzahl der Netze, die die Quelle nutzen

Anhand der Auswertung wird deutlich, dass häufig eine Kombination aus verschiedenen Wärmequellen genutzt wird, um den Wärmebedarf zu decken. Die jeweiligen Kombinationen in den betrachteten Wärmenetzen ist in Abbildung 42 dargestellt.

11 Quartiere werden über eine Kombination aus Wärmepumpe und Zusatzerzeuger im Parallelbetrieb versorgt. Acht der Quartiere haben außerdem einen Zusatzerzeuger zur Spitzenlastdeckung implementiert.

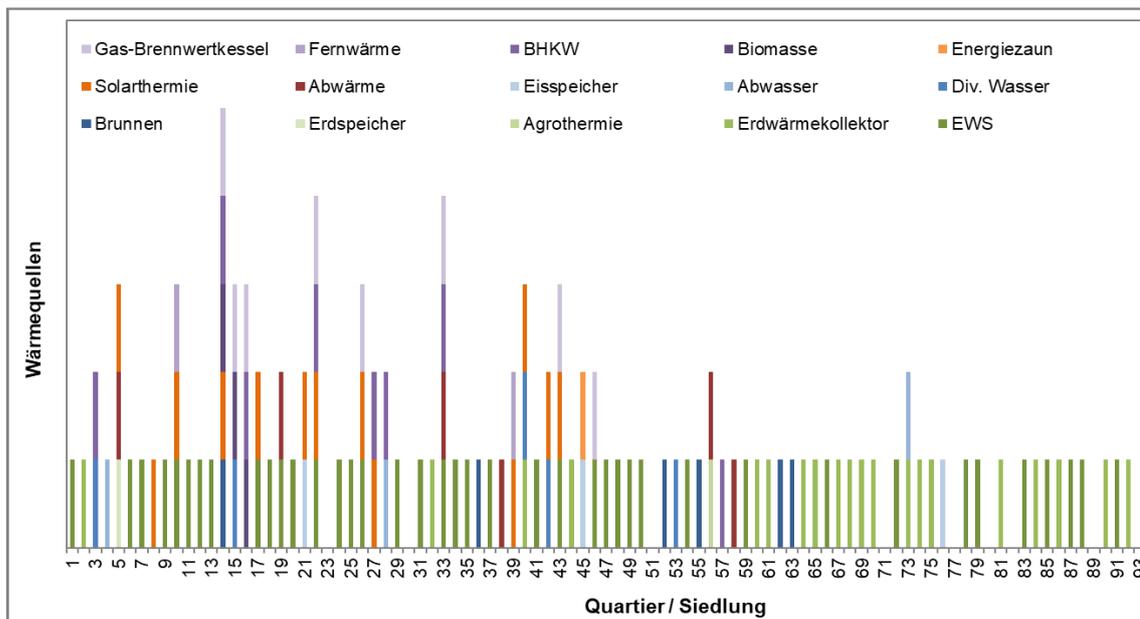


Abbildung 42 Umgesetzte Wärmequellen in den jeweiligen Netzen

11.3.3 Temperaturniveau der Vorlauftemperaturen im Netz

Die Vorlauftemperaturen unterscheiden sich je nach Auslegung des Netzes. In Abbildung 43 sind die Vorlauftemperaturen der betrachteten Beispielnetze aufgeführt. Die Werte für kalte Nahwärmenetze beziehen sich auf die angenommenen Temperaturen des Warmleiters. Es ist zu beachten, dass diese aufgrund von Quelltemperaturänderungen oder dezentralen Wärmeeinspeisungen im Jahresverlauf nicht konstant gehalten werden.

Die Vorlauftemperaturen der konventionellen Nahwärmenetze liegen ganzjährig zwischen 32 und 90 °C. Im Mittel liegt die Vorlauftemperatur bei 66 °C. Dies entspricht den geforderten Temperaturen für konventionelle Heizungssysteme und Trinkwarmwasserbereitung.

Während der Wintermonate stellen die Mischnetze Wärme auf einem Temperaturniveau von 62 bis 80 °C zur Verfügung. In den Sommermonaten schalten die Netze auf eine Niedertemperaturversorgung und die Vorlauftemperatur sinkt auf 17 bis 40 °C. Die mittlere Vorlauftemperatur im Hochtemperaturbetrieb liegt bei 73 °C und im Niedertemperaturbetrieb bei 29 °C. Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt über dezentral liegende Wärmepumpen.

Das Temperaturniveau des Warmleiters der kalten Nahwärmenetze liegt zwischen 5 und 35 °C. Im Mittel liegt die Temperatur bei 12 °C.

Die Jahresmittelwerte der Vorlauftemperaturen in den Netzen entsprechen den Auslegungsparametern für die jeweiligen Typologien.

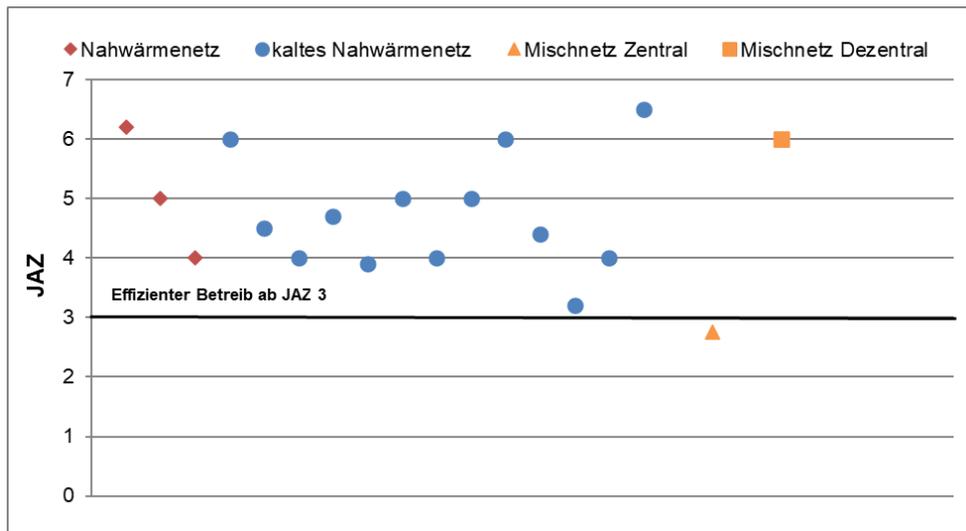


Abbildung 44 Durchschnittliche Jahresarbeitszahlen der integrierten Wärmepumpen in den betrachteten Quartiers- und Siedlungsnetzen

11.3.5 Versorgungsgebiet

Anhand der Betrachtung der Beispielnetze lassen sich Aussagen über die typischen Versorgungsgebiete der verschiedenen Netztypologien treffen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in den erfasste Siedlungen und Quartiere um die 200 - 300 Wohneinheiten versorgt und eingebunden werden und überwiegend Wohnungsbau mit Ein- und Mehrfamilienhäuser vorhanden sind.

Die untersuchten konventionellen Nahwärmenetze versorgen sowohl Neubau- als auch Bestandsquartiere. Bei den versorgten Quartieren handelt es sich sowohl um reine Wohnquartiere, Quartiere aus Nichtwohngeländen und Mischquartieren. Es handelt sich bei den versorgten Gebieten nie um eine reine Einfamilienhausbebauung. Die Struktur zeigt, dass in 5 Gebieten Einfamilienhäuser, in einem Gebiet Reihenhäuser und in 13 Gebieten Mehrfamilienhäuser sowie 5 Gebiete mit sonstigen Einrichtungen versorgt werden. (Abbildung 45)

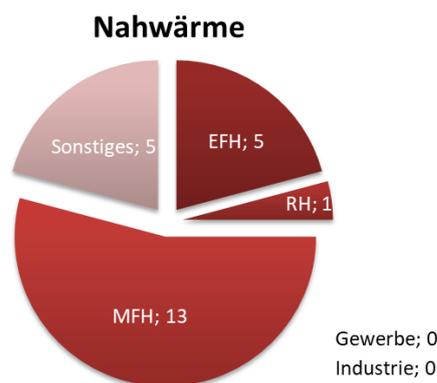


Abbildung 45 Versorgungsgebiet konventioneller Nahwärmenetze – Anzahl der Gebiete

Die betrachteten kalten Nahwärmenetze werden hauptsächlich in Neubaugebieten betrieben. In 42 Gebieten sind Einfamilienhäuser, in 15 Reihenhäuser und in 31 Gebieten Mehrfamilienhäuser sowie 15 Gebiete mit sonstigen Einrichtungen als auch 3 Gebiete mit Gewerbe versorgt werden. Keines der Beispielnetze dient der Versorgung von Industrie. (Abbildung 46)

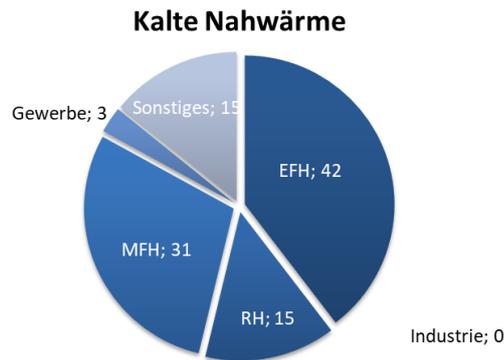


Abbildung 46 Versorgungsgebiet Kalte Nahwärmenetze – Anzahl der Gebiete

In den untersuchten Mischnetzen dient die Wärmeversorgung vorrangig für Bestands- und Neubauquartieren mit Mehrfamilienhäusern sowie Einfamilienhausbebauung und Nichtwohngebäuden wie Gewerbe oder kommunale Einheiten. Insgesamt werden in 3 Gebieten Einfamilienhäuser, in 1 Gebiet Mehrfamilienhäuser, in 2 der Gebiete gewerbliche Einrichtungen und in einem Industriebetriebe versorgt. (Abbildung 47)

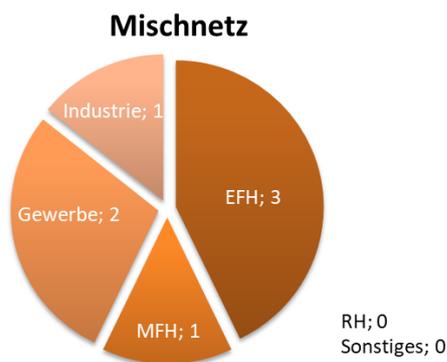


Abbildung 47 Versorgungsgebiet Mischnetze – Anzahl der Gebiete

Die Betrachtung der Versorgungsgebiete der unterschiedlichen Netztypologien hinsichtlich der Anzahl der versorgten Wohneinheiten lässt einen genaueren Vergleich der Netzarten zu. (Abbildung 48)

In den Quartieren mit einem konventionellen Nahwärmenetze sind zwischen 48 und 1.350 Wohneinheiten. Im Mittel werden 326 Wohneinheiten eingebunden.

Bei den kalten Nahwärmenetze handelt es sich um Wohneinheiten zwischen 11 und 2.500. Im Mittel werden 224 Wohneinheiten versorgt.

Bei der geringen Anzahl an Mischnetzen können zwischen 40 und 800 Wohneinheiten erfasst werden. Im Mittel werden hier rund 218 Wohneinheiten versorgt.

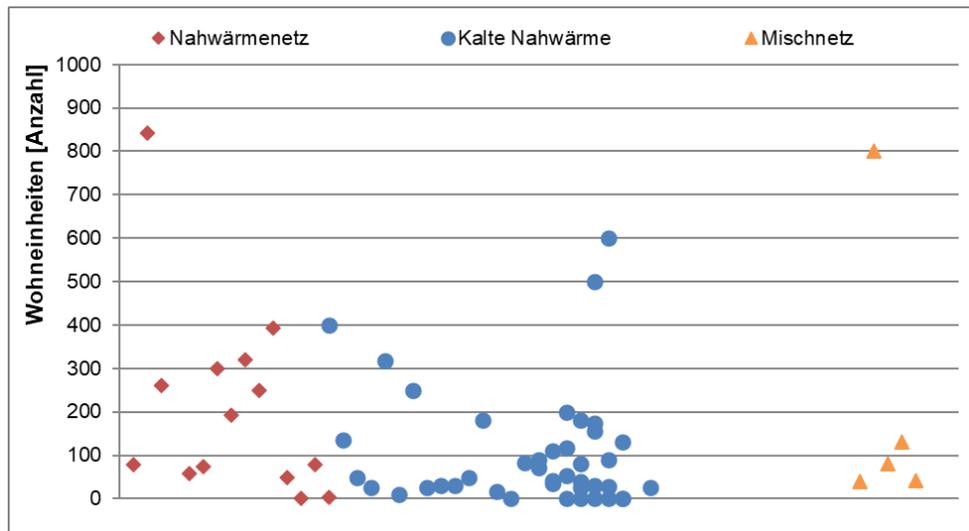


Abbildung 48 Anzahl der Wohneinheiten in den betrachteten Siedlungen und Quartieren

11.3.6 Wärme- und Kältebereitstellung sowie -bedarfe

Über die Dimensionierung und Auslegung der Wärmenetze in den Quartieren und Siedlungen können nur wenige Informationen gesammelt werden. Auf Basis der vorhandenen Unterlagen, kann eine Richtung der Dimensionierung und Bedarfe aufgezeigt werden.

Die installierte Wärmeleistung der betrachteten Nahwärmenetze liegt zwischen 0,13 und 3,1 MW, bei den kalten Nahwärmenetze zwischen 0,06 und 0,9 MW und für die Mischnetze werden Leistungen von 0,4 bis 1,4 MW genannt. Im Durchschnitt beläuft sich die Wärmeleistung der Netze auf rund 0,7 MW. (Abbildung 49) Der erfasste Wärmebedarf in den betrachteten Quartiersnetzen liegt zwischen 200 und 4.702 MWh/a. Dies ergibt einen spezifischen Wärmebedarf von rund 11,75 MWh/WE.

Die Wärmeleistung der installierten Wärmepumpen in den betrachteten Netzen liegt zwischen 55,8 und 13.200 kW.

Bei der bereitgestellten bzw. benötigten Kälteleistung in den Quartieren und Siedlungen ergeben sich Werte zwischen 0,15 und 175 MW.

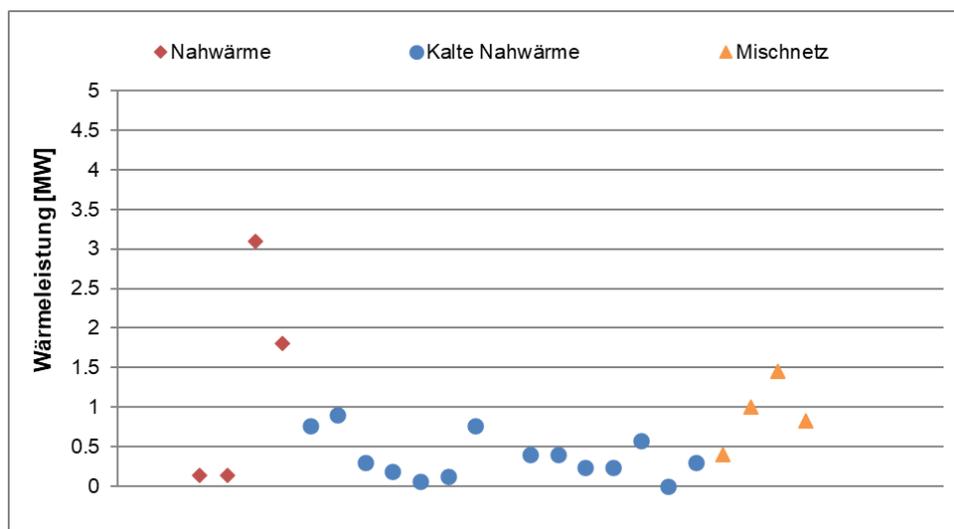


Abbildung 49 Bereitstellende Gesamtwärmeleistung der Quartiere und Siedlungen

11.4 Implementierung von Siedlungen und Quartieren in WP_{SOURCE}

WP_{SOURCE} basiert auf Simulationen und Auslegungen auf der Grundlage detaillierter Gebäudebeschreibungen. Die im Programm hinterlegten Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Bürogebäude bilden unterschiedliche Baustandards mit unterschiedlichen Wärme- und Kältebedarfen ab. Der wärmetechnische Standard und die Nettoraumfläche der Gebäude sind wesentliche Grundlage der Berechnungen in WP_{SOURCE}.

Siedlungen und Quartiere und deren Baumassen sind vielseitig und können in der gebotenen Genauigkeit nicht als „Regelkonzepte“ oder „Referenzgebäude“ abgebildet werden.

Fazit: WP_{SOURCE} ist ein Vordimensionierungsprogramm für Einzelgebäude. Die Anwendung auf Siedlungen und Quartiere ist in der vorliegenden Version nicht möglich.

12 AP8 – Erweiterung der betrachteten Standorte

Bezüglich der Übertragbarkeit von WP_{SOURCE} auf einen erweiterten geographischen Betrachtungsbereich wurde die Anwendbarkeit des Programms auf fünf europäische Standorte außerhalb Deutschlands im Rahmen des Forschungsprojekts untersucht. Neben ortsspezifischen Wetterdaten und geologischen Bedingungen wurden länderspezifische Gebäudestandards und Bautraditionen vergleichend betrachtet.

Die untersuchten Standorte repräsentieren typische Klimaregionen innerhalb Europas und die damit verbundenen Unterschiede im Hochbau sowie länderspezifische Bautraditionen. Von Nordeuropa nach Südeuropa wurden die folgenden Standorte für die Untersuchungen gewählt:

- Helsinki (Finnland)
- Stockholm (Schweden)
- Straßburg (Frankreich)
- Zürich (Schweiz)
- Athen (Griechenland)

Die Wetterdaten für die gewählten Standorte wurden nach dem Muster der 15 für Deutschland definierten Klimaregionen (Testreferenzjahre) und zugehörigen Repräsentanzstationen mittels Meteororm® 7.1.10 [16] generiert und zur Übernahme in die TRNSYS-Simulationsumgebung in das Format der DWD-Testreferenzjahre konvertiert. Zur Generierung von Wetterdaten gilt das Programm Meteororm® im Rahmen von Forschungsprojekten sowie im Bereich Normung und bei der Erstellung von Richtlinien aber auch für kommerzielle Anwendungen als anerkannter Standard, siehe auch Abschlussbericht zu future:heatpump [1].

Tabelle 10 geografische Koordinaten und Höhenlagen der gewählten Standorte*

	geografische Breite, Nord [°]	geografische Länge, Ost [°]	Höhe über normal Null [m]
Helsinki	60,200	24,945	28
Stockholm	59,325	18,070	26
Straßburg	48,582	7,740	137
Zürich	47,390	8,530	418
Athen	37,985	23,730	92

*Hinweis: Je nach Quelle unterscheiden sich die geografischen Koordinaten und die angegebenen Höhenlagen der einzelnen Standorte. Die in der Tabelle gelisteten Koordinaten und Höhen über Normal Null sind in Meteororm® 7.1.10 hinterlegt und liegen den generierten Wetterdaten zugrunde.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Mittelwerte der monatliche Umgebungstemperatur und die Mittelwerte der monatlichen Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Fläche (Globalstrahlung) an den gewählten europäischen Standorten. Beide Größen sind im Vergleich zu entsprechenden Daten der deutschen Klimaregionen dargestellt.

Zunächst ist augenscheinlich, dass der Standort Athen sowohl bezüglich der Mittelwerte der monatlichen Umgebungstemperatur als auch in Bezug auf die monatliche Bestrahlungsstärke (Globalstrahlung) signifikant von den anderen europäischen aber auch von den 15 deutschen Referenzklimaregionen abweicht. Eine Übertragbarkeit von WP_{SOURCE} auf den Standort Athen ist ohne geeignete und umfassende Anpassungen des Programms daher nicht möglich.

Die anderen Standorte der vorliegenden Untersuchung liegen deutlich näher im Bereich der deutschen Klimaregionen, wobei die Umgebungstemperaturen der untersuchten Standorte die der Deutschen Klimare-

gionen quasi „einhüllen“. Dabei liegen die Werte der Umgebungstemperaturen im Monat Juli im oberen Bereich der Werte der deutschen Klimaregionen. Auch die Mittelwerte der monatlichen Bestrahlungsstärke (Globalstrahlung) an den untersuchten Standorten liegen im Wesentlichen in dem von den deutschen Klimaregionen aufgespannten Bereich, wobei – mit Ausnahme der nordeuropäischen Standorte Stockholm und Helsinki – die Bestrahlungsstärken der gewählten, außerhalb Deutschlands liegenden Standorte, in den Monaten Mai bis Juli über den meisten deutschen Klimaregionen liegen.

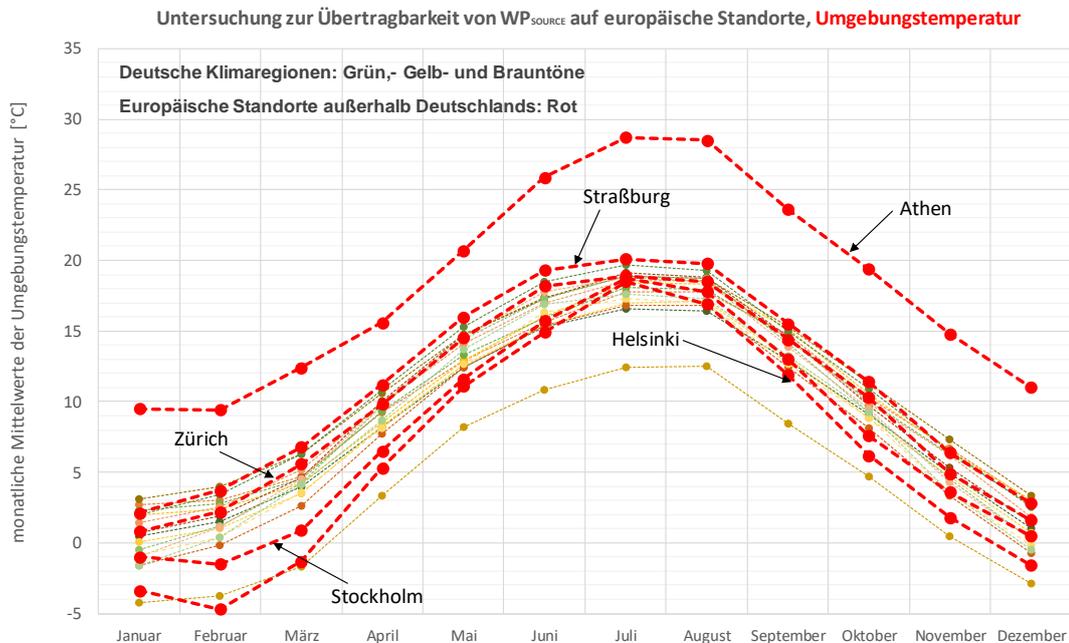


Abbildung 50 Mittelwerte der monatlichen Umgebungstemperatur an den gewählten europäischen Standorten außerhalb Deutschlands im Vergleich zu den 15 Klimaregionen in Deutschland

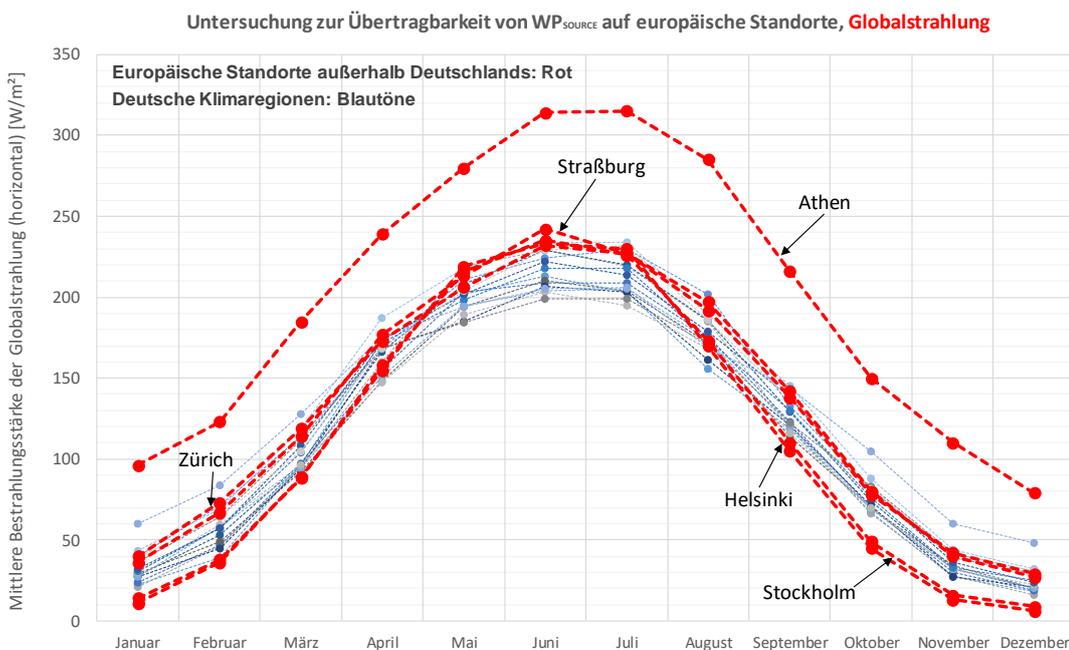


Abbildung 51 Mittelwerte der monatlichen Bestrahlungsstärke (Globalstrahlung) an den gewählten europäischen Standorten außerhalb Deutschlands im Vergleich zu den 15 Klimaregionen in Deutschland

Neben den klimatischen Bedingungen (Wetterdaten vor Ort) wurden die geologischen Bedingungen des Untergrundes an den untersuchten Standorten denen am deutschen Referenzstandort Potsdam gegenübergestellt. Für eine thermische Nutzung des Erdreichs (Untergrundes) sind dabei insbesondere die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit des Bodens von entscheidender Bedeutung. Grundsätzlich gilt für beide Parameter, dass in Bezug auf die Nutzung des Bodens größere Werte günstiger sind, als kleinere.

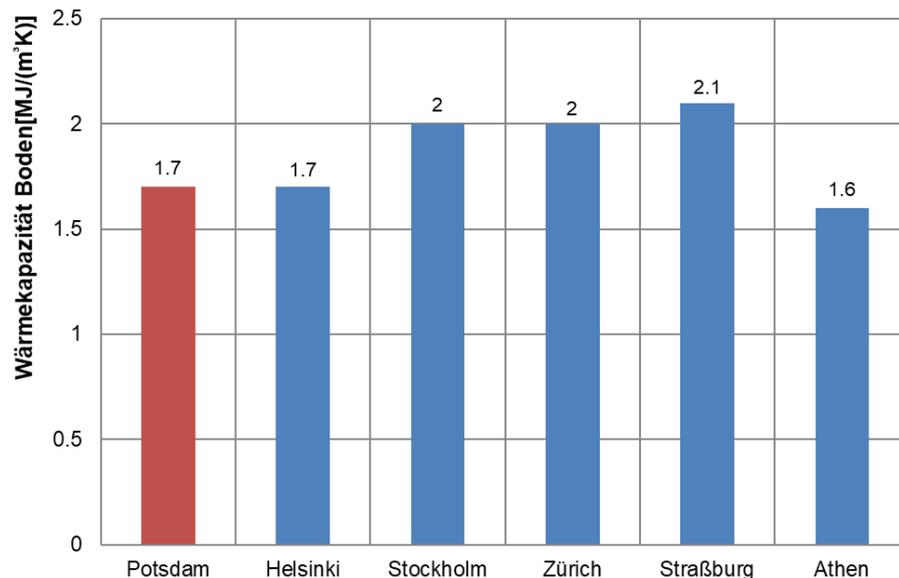


Abbildung 52 Durchschnittliche Wärmekapazität der Böden an den untersuchten Standorten im Vergleich zu Potsdam

Abbildung 52 zeigt die durchschnittlichen Wärmekapazitäten der Böden an den gewählten Standorten im Vergleich zur Wärmekapazität des Bodens am Standort Potsdam. Mit Ausnahme von Athen weisen die Böden an den gewählten Standorten höhere oder zumindest die gleiche (Helsinki) Wärmekapazität auf, wie der deutsche Standort. Aber auch der Wert von Athen liegt nur etwa 6 % unter dem von Potsdam.

Die nachfolgende Abbildung 53 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten der Böden an den gewählten Standorten im Vergleich zur Wärmeleitfähigkeit des Bodens am Standort Potsdam. Mit Ausnahme von Helsinki, wo die Wärmeleitfähigkeit des Bodens (wie auch die Wärmekapazität) der von Potsdam gleicht, verfügen die Böden an den übrigen untersuchten Standorten verglichen mit Potsdam über (etwas) geringere Wärmeleitfähigkeiten. Für eine thermische Nutzung des Untergrundes sollte dessen Wärmeleitfähigkeit min. 1,0 W/(m·K) betragen. Dieser Mindestwert für die Wärmeleitfähigkeit ist auch im Vorauslegungsprogramm WP_{SOURCE} 2.0 implementiert und stellt eine Anwendungsgrenze dar.

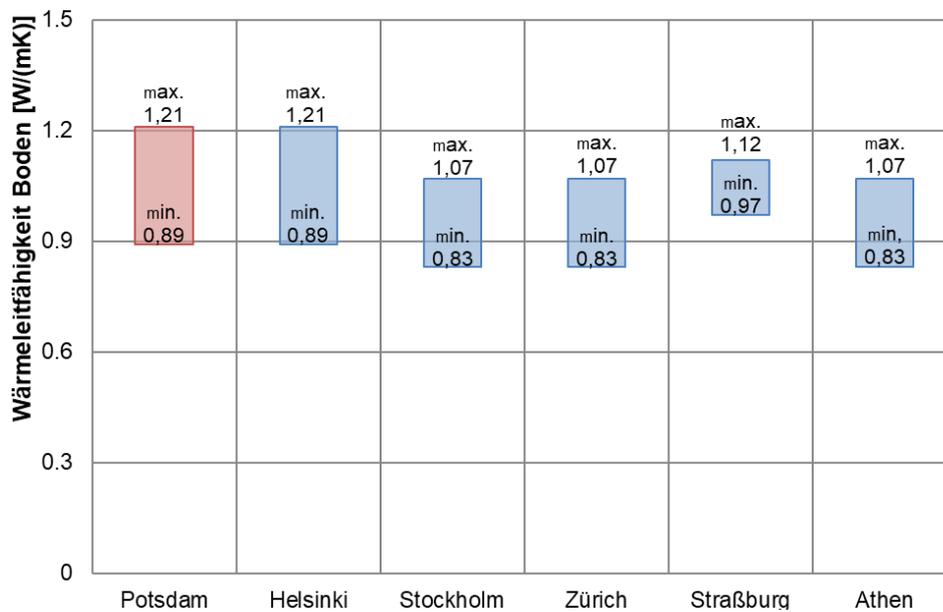


Abbildung 53 Durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit der Böden an den untersuchten Standorten im Vergleich zu Potsdam, Datenquelle (Grundlage): EU-Projekt “ThermoMap”

Die bisher betrachteten Aspekte Klima/Wetter sowie Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes beziehen sich auf natürliche Gegebenheiten an den untersuchten Standorten. Diese natürlichen Gegebenheiten finden ihren Niederschlag auch in länderspezifischen Baustandards und Bautraditionen. Um die Möglichkeit einer Übertragbarkeit von WP_{SOURCE} auf europäische Standorte außerhalb Deutschland abschätzen zu können, wurden neben den natürlichen Bedingungen die

- länderspezifischen Baustandards und –bestimmungen,
- Bautraditionen und verwendeten Baustoffe,
- Heizungsanlagentechnik (z. B. Peripherie einer Wärmepumpe),
- zeitlichen Heizlastverteilung,
- Wärmeverteilung im Gebäude und
- Nutzerbedürfnisse

untersucht und miteinander verglichen.

Als Beispiel der Auswirkungen unterschiedlicher länderspezifischer Baustandards und –bestimmungen sowie unterschiedlicher Bautraditionen und ggf. differierender Baustoffe gibt Abbildung 54 die durchschnittlichen U-Werte wesentlicher Bauteile von Gebäuden an den gewählten Standorten außerhalb von Deutschland wieder. Zum Vergleich sind die U-Werte der gleichen Bauteile in Deutschland eingefügt.

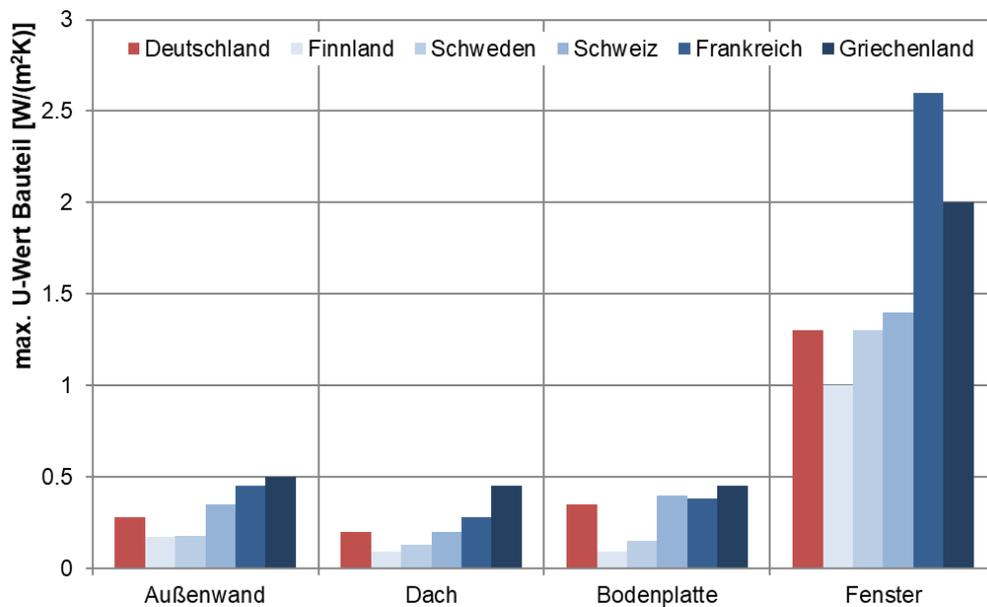


Abbildung 54 Durchschnittliche U-Werte von Bauteilen an den untersuchten Standorten im Vergleich zu Deutschland, Datenquelle (Grundlage): zebra-monitoring.enerdata.eu, gbpn.org/databases-tools, slideshare.net/SitraEkologia

Auch vor dem Hintergrund der zu Beginn dieses Kapitels dargestellten Wetterdaten lässt sich konstatieren,

- dass das Zusammenwirken der klimatischen Bedingungen (Wetterdaten), länderspezifischer Baustandards und -bestimmungen sowie der Bautraditionen und verwendeten Baustoffe ggf. zu (zeitlichen) Heizlastverteilungen führt, die außerhalb des überprüften Gültigkeitsbereiches von WP_{SOURCE} liegen.
- dass standortspezifische, an einem Ort außerhalb der Bundesrepublik anzutreffende und z. B. eine Niedertemperaturwärmequelle betreffende Besonderheiten in WP_{SOURCE} ggf. nicht oder nur unzureichend implementiert sind.
- dass sich die Anlagentechnik (z. B. Peripherie einer Wärmepumpe), die Wärmeverteilung im Gebäude und/oder die Nutzerbedürfnisse von den in WP_{SOURCE} getroffenen Annahmen signifikant unterscheiden können.

Fazit: WP_{SOURCE} sollte nur nach eingehender Prüfung der Rahmenbedingungen auf europäische Standorte außerhalb Deutschlands übertragen und angewendet werden. Dies gilt sowohl für die diesem Abschlussbericht zugrunde liegende Programmversion WP_{SOURCE} 2.0 als auch alle im Vorfeld von WP_{SOURCE} 2.0 erstellten Programmversionen, z. B. WP_{SOURCE} 1.0 und WP_{SOURCE} 1.1.

13 AP9 – Monitoring

Wie bereits im Forschungsprojekt „future:heatpump - Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen“ (BMWK, FKZ 03ET1273A) werden im Rahmen eines „Low-Level-Monitorings“ verschiedene Gebäudetypen mit unterschiedlichen Niedertemperaturwärmeübertragern messtechnisch untersucht. Bei der Gebäudeauswahl wird zum einen darauf geachtet, dass unterschiedliche Niedertemperaturwärmequellen und -übertrager wie Erdwärmesondenfelder, Energiepfahlanlagen und Außenluft vorkommen. Zum anderen sollen die Gebäude bivalent betrieben werden, so dass auch ein zweiter Wärmeerzeuger in die Wärmebereitstellung integriert ist. Im Bereich der Wohngebäude (Mehrfamilienhäuser) wird die Gebäudeheizung und Trinkwassererwärmung untersucht. Bei Nichtwohngebäuden erfolgt die Systembetrachtung für den reinen Heizfall.

Im Projekt werden fünf unterschiedliche Gebäude erfasst und dokumentiert. Dabei handelt es sich um Neubauten mit insgesamt drei unterschiedliche Wärmeübertragungssysteme für die Wärmepumpenanlagen. Die untersuchten Gebäude splitten sich in zwei Mehrfamilienhäuser und drei Büro- und Verwaltungsgebäude auf. Alle Systeme in den Bürogebäuden 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 55.

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 fünf erfassten Gebäude sowie ein Quervergleich der Gebäude- und Anlagenkonzepte.

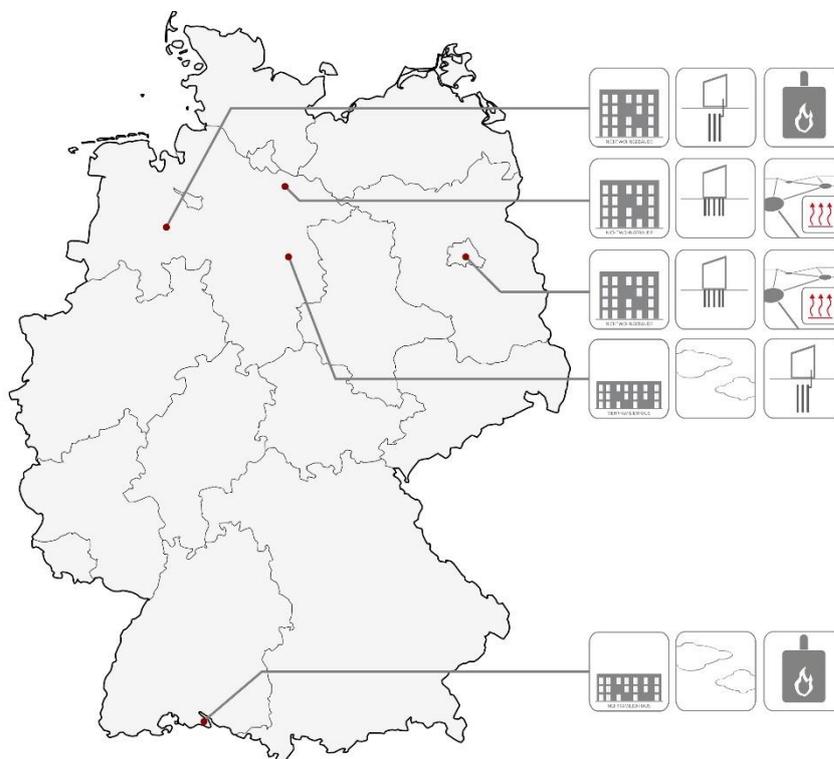


Abbildung 55 Standorte der im Forschungsprojekt untersuchten Gebäude

13.1 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 drei bis vier Jahre. Mit den 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 sowie zweiter Wärmeerzeuger. Das Messkonzept aller Gebäude und Anlagen zeigt beispielhaft Abbildung 56. 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: Niedertemperaturwärmequelle und Wärmeübertrager,
- Sekundärseitig: Gebäude (Heizung und Trinkwarmwasser sowie Kühlung) sowie zweiter Wärmeerzeuger
- Stromverbrauch: Verdichter der Wärmepumpe und Umwälzpumpen,
- Datenerfassung: Energiemengen und Leistung, Temperaturen und Volumenströme.

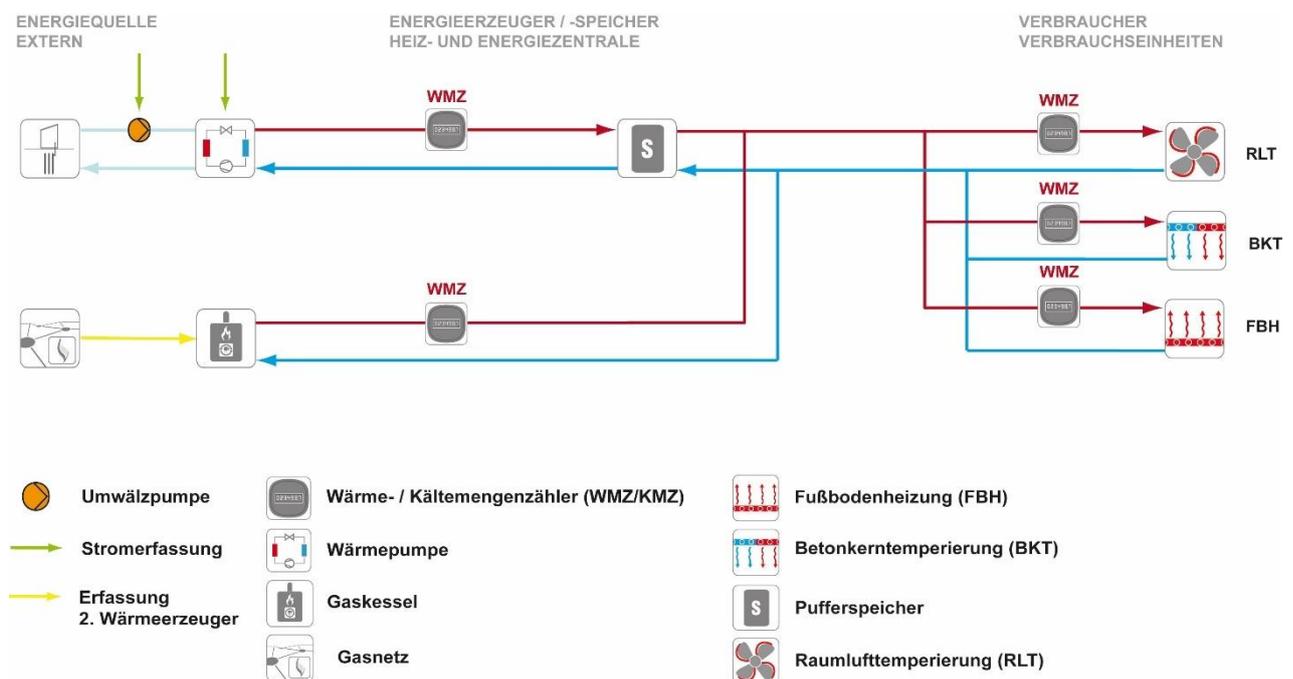


Abbildung 56 Beispiel für ein Messkonzeptschema der Anlagentechnik der jeweiligen Gebäude

13.2 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 57 zu entnehmen.

Die Grenzen der Bilanzen werden gesetzt zu:

JAZ₁ Betrachtung des Stromverbrauchs und der Energiemengen nur in Bezug auf die Wärmepumpe (Verdichter).

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

JAZ₂ Betrachtung des Stromverbrauchs und der Energiemengen in Bezug auf die Wärmepumpe (Verdichter) und die Umwälzarbeit quellenseitig (Erdreich).

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

In der Auswertung und Gegenüberstellung der untersuchten Anlagen werden im Rahmen des Forschungsprojektes nur die JAZ₁ und die JAZ₂ 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.

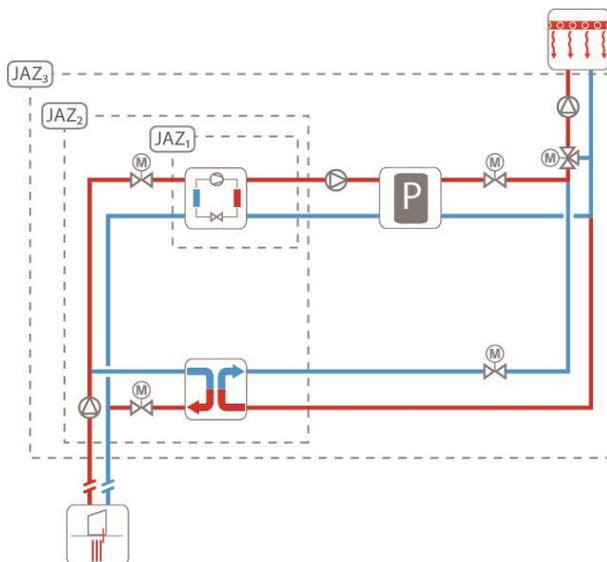


Abbildung 57 Bilanzgrenzen für die Bildung der Arbeitszahl

13.3 Monitoringgebäude

Die aus der Gebäude- und Anlagenanalyse ermittelten Kenndaten zeigen Abbildung 58 und Abbildung 59. Dabei werden zwei Wohngebäude und drei Bürogebäude innerhalb des Forschungsprojektes messtechnisch erfasst. Von 2002 bis 2016 erfolgt die Fertigstellung der Gebäude. Eine detaillierte Gebäudeübersicht mit Angaben zu den Gebäuden, den Wärmequellen, den Übergabesystemen, etc. befindet sich im Anhang (siehe Anlage 3 – Steckbriefe Gebäude). Die entsprechenden Kenndaten können den dort hinterlegten Steckbriefen entnommen werden.

Gemäß Energiekonzept verfügen die fünf betrachteten Objekte jeweils unterschiedliche Konzeptansätze in Bezug auf die Beheizung der Gebäude (z. B. Fußbodenheizung, stat. Heizkörper, Lüftungsanlagen). Alle fünf Gebäude sind mit einer Fußbodenheizung ausgestattet, drei Gebäude haben zusätzlich Heizkörpern. Die Wärmepumpe versorgt neben der Raumheizung in zwei Gebäuden auch die Trinkwassererwärmung. Bei drei Gebäuden (Bürogebäude) ist eine Lüftungsanlage installiert, deren Luft ebenfalls über die eingebaute Wärmepumpe vorkonditioniert wird.

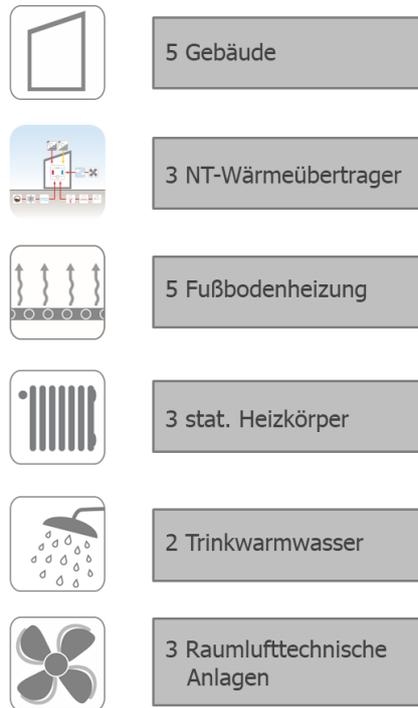


Abbildung 58 Statistische Verteilung der Übergabesysteme in den untersuchten Gebäuden

		Neubau	
Mehrfamilienhaus	1		Erdwärmesonden, 2016 11 x 135 - 200 m, WP 140 kW _{th} NGF 7.100 m ² Luft-WP 50 kW _{th} Monitoring 2018 - 2021
	2		Luft-WP, 2016 WP 13.2 kW _{th} NGF 1.140 m ² Gaskessel 35 kW _{th} Monitoring 2018 - 2021
Nichtwohngebäude	3		Energiepfähle, 2002 101 x 19.2 m, WP 82 kW _{th} NGF 3.957 m ² Fernwärme 250 kW _{th} Monitoring 2014 - 2017
	4		Energiepfähle, 2003 196 x 8.50 m, WP 107 kW _{th} NGF 20.700 m ² Fernwärme 885 kW _{th} Monitoring 2018 - 2021
	5		Erdwärmesonden, 2010 25 x 100 m, WP 2x 70 kW _{th} NGF 6.750 m ² Gaskessel 200 kW _{th} Monitoring 2018 - 2021

Abbildung 59 Gebäude und Wärmeübertragungssysteme im Low-Level-Monitoring innerhalb des Forschungsprojektes

13.4 Quervergleich der Gebäude- und Anlagenkonzepte

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus dem Monitoring der untersuchten Anlagen ergebnisspezifisch gegenübergestellt. 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 2014 bis 2017 bzw. von 2018 bis 2021 (Tabelle 11).

Anzumerken ist:

- Im Büro 3 liegt derzeit (im Monitoringzeitraum) kein planmäßiger Betrieb der Anlage vor; weshalb der Anteil der Wärmepumpe sehr gering ist. Die Planung sah einen Deckungsanteil über die Wärmepumpe vor rund 30 % vor.
- Beim Bau des Büro 4 wurden erdgekoppelte Wärmepumpen erst in Versorgungskonzepte integriert und stand noch in den Kinderschuhen. Im Gebäude wurde daher die Geothermie als „Test“ integriert und nimmt daher nur einen sehr geringer Anteil ein. Zudem sind hier Energiepfähle verwendet worden, so dass auch nicht mehr Energie zur Verfügung steht. Geplant waren jedoch ca. 20% der Wärme über die Wärmepumpe bereit zu stellen.

Tabelle 11 Monitoringzeiträume der Gebäude und Anlagen im Low-Level-Monitoring des Forschungsprojektes „future:heatpump_II“ (EWS - Erdwärmesonden, EP – Energiepfähle, FW - Fernwärme)

Gebäude	1	2	3	4	5
Wärmeübertrager /	EWS	Luft	EP	EP	EWS
2. Wärmeerzeuger	Luft-WP	Gaskessel	FW	FW	Gaskessel
Monitoringzeitraum	2018 - 2021	2018 - 2021	2014 - 2017	2018 - 2021	2018 - 2021

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.

13.4.1 Wärmebereitstellung

Die statistische Verteilung der Wärmebereitstellung der Gebäude auf die Raumheizung und die Trinkwassererwärmung ist kein Anlagenkennwert, vermittelt jedoch einen ersten Eindruck zur Funktionsweise und Auslastung der Wärmepumpenanlage sowie der Anteile und die Kombination mit dem zweiten Wärmeerzeuger. 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 oder den Mitarbeitern in den Bürogebäuden. 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 Verteilungsschlüssel von Heizung zu Trinkwarmwasser hat sich daher in den letzten Jahren deutlich geändert. Abbildung 60 zeigt den Vergleich der mittleren Deckungsanteile zwischen Heizung und Trinkwassererwärmung über die Zeit des Monitorings. Anhand des Vergleichs der Deckungsanteile ist festzustellen, dass

- die Wärmepumpen sehr unterschiedliche Anteile an der Wärmebereitstellung einnehmen. Dieser liegt zwischen < 10% bis zu 85%.
- bei den Versorgungskonzepten die Wärmeerzeuger auch parallel auf unterschiedliche Systeme laufen.
- bei den Mehrfamilienhäusern die Trinkwassererwärmung eine Anteil von 30 – 40% erreichen kann.

- bei den hier untersuchten Nichtwohngebäuden die Trinkwassererwärmung nicht über das Wärmepumpensystem erfolgt bzw. die Trinkwarmwasserbereitung generell über Durchlauferhitzer umgesetzt wird.
- bei den Bürogebäuden der Fokus auf der Wärmebereitstellung der Raumheizung liegt.
- die Wärmepumpen 10 – 85 % des Gesamtwärmeverbrauch decken.
- die Anteile der Wärmepumpen an der Raumheizung 10 – 85% und bei der Trinkwarmwasserbereitung 20 - 30% darstellen.

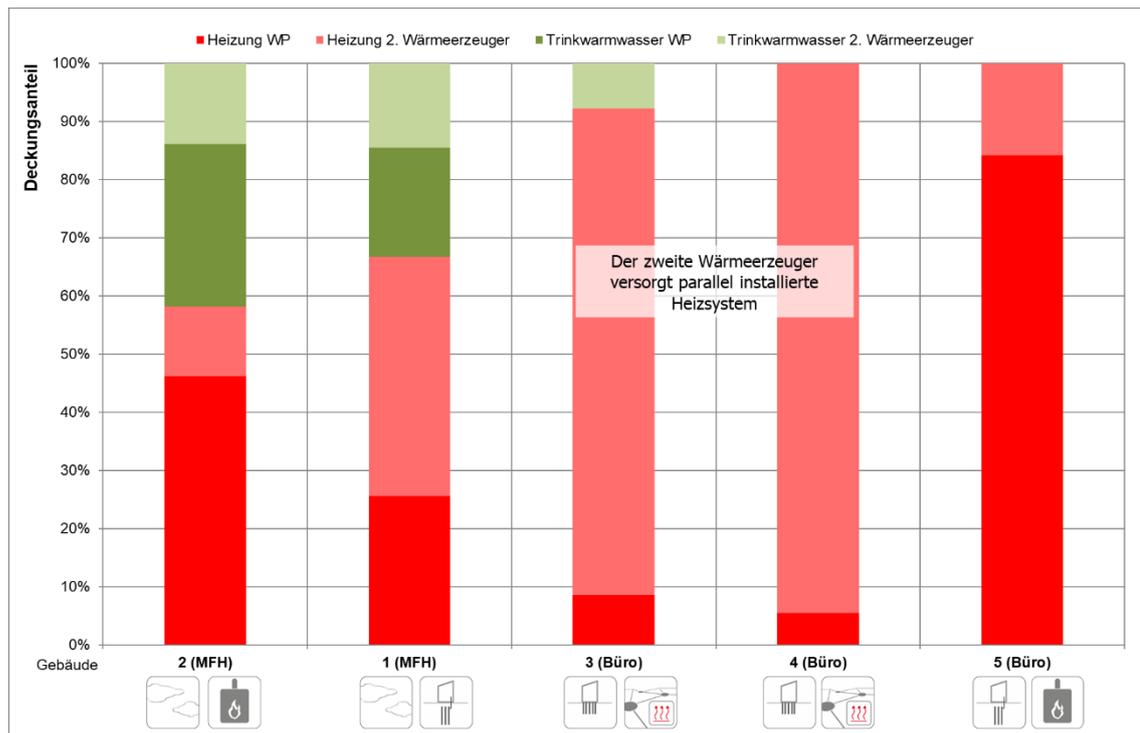


Abbildung 60 Im Rahmen des Monitorings gemessene mittlere Deckungsanteile der Wärmebereitstellung der untersuchten Wärmeübertrager mit zugehörigen Niedertemperaturwärmequellen und zweitem Wärmeerzeuger

13.4.2 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 Fußbodenheizungen zur Konditionierung der Gebäude verwendet werden. In Abbildung 61 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 erfassten Austrittstemperaturen aus den Wärmeübertragern zwischen -2°C und 28°C (Sommerbetrieb) liegen. In die erdgekoppelten Übertrager wird mit Temperaturen von 0°C bis 28°C gefahren. Die hohen Temperaturen sind vor allem in den Sommermonaten der Fall.
- obwohl in den Gebäuden Niedertemperaturheizsysteme für die Raumheizung installiert sind, kurzzeitig Vorlauftemperaturen $> 55^{\circ}\text{C}$ erfasst werden. Im Mittel liegen die Vorlauftemperaturen für die Raumheizung über die Wärmepumpen jedoch gemäß Planung zwischen 25 und 45°C . Höhere Temperaturen bis 65°C werden dann über den 2. Wärmeerzeuger bereitgestellt.

- für die Trinkwassererwärmung Vorlauftemperaturen bis 70 °C gemessen werden, was auf die Legionellenschaltung bei zentralen Systemen zurückzuführen ist.

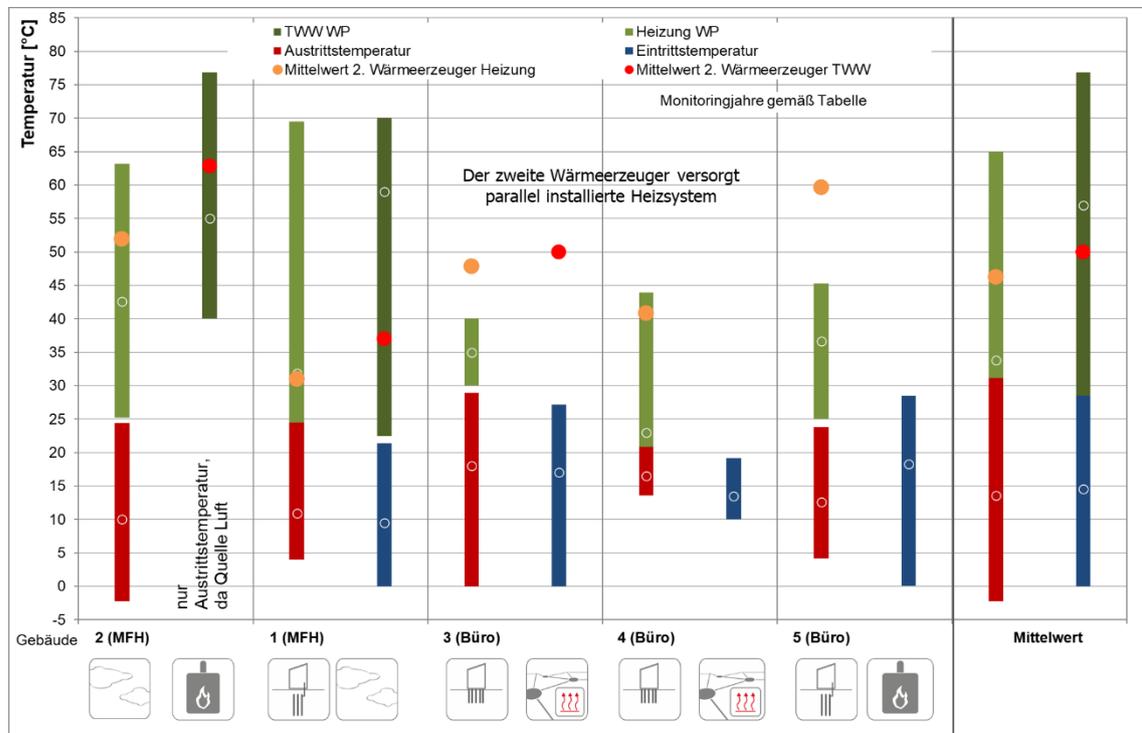


Abbildung 61 Im Rahmen des Monitorings gemessene Ein- und Austrittstemperaturen der untersuchten Wärmeübertrager mit zugehörigen Niedertemperaturwärmequellen und Vorlauftemperaturen der Wärmeübergabesysteme sowie Vorlauftemperaturen der 2. Wärmerezeuger

13.4.3 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. 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,
- Schwankungen in der JAZ ausschließlich infolge geänderter Betriebsführungen zu beobachten sowie durch die verwendete Wärmepumpentechnologie bedingt sind.
- bei den meisten Anlagen Jahresarbeitszahlen JAZ_1 über 3,0 erreicht 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.

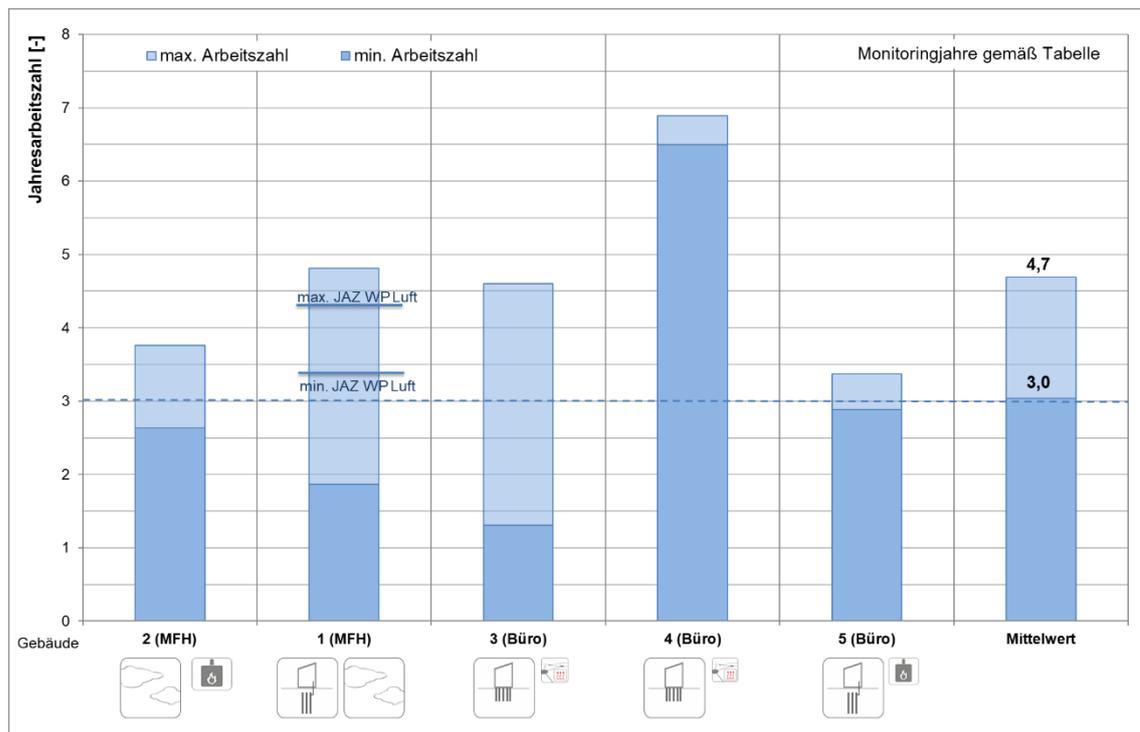


Abbildung 62 Im Rahmen des Monitorings ermittelte Jahresarbeitszahlen (JAZ1) der am Monitoring beteiligten Gebäuden (mit unterschiedlichen Niedertemperaturwärmequellen und –wärmeübertragern)

13.4.4 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 an Heizwärme (die Daten sind nicht witterungsbereinigt) sowie durch Änderungen in der Betriebsführung der Anlage oder verändertem Bedarf an erwärmtem Trinkwarmwasser.

Für verschiedene Wärmequellen und -übertragungssysteme sind die spezifischen Jahresenergieerträge bezogen auf einen Meter Erdwärmesonde oder Energiepfahl in Abbildung 63 dargestellt.

Aus dem Vergleich ist aber abzuleiten, dass

- Erdwärmesonden einen deutlich höhere Entzugsenergien als Energiepfähle bieten. Die Entzugsenergien liegt zwischen 60 bis 150 kWh/m bei Erdwärmesonden und zwischen 3 bis 20 kWh/m bei Energiepfählen.

Für das Mehrfamilienhaus Gebäude 1 ist anzumerken, dass hier die sehr hohen Entzugsenergien durch eine Anomalie im Erdreich verursacht werden. Der Standort liegt auf einem Salzstock und erzielt somit hohe Entzugsleistungen.

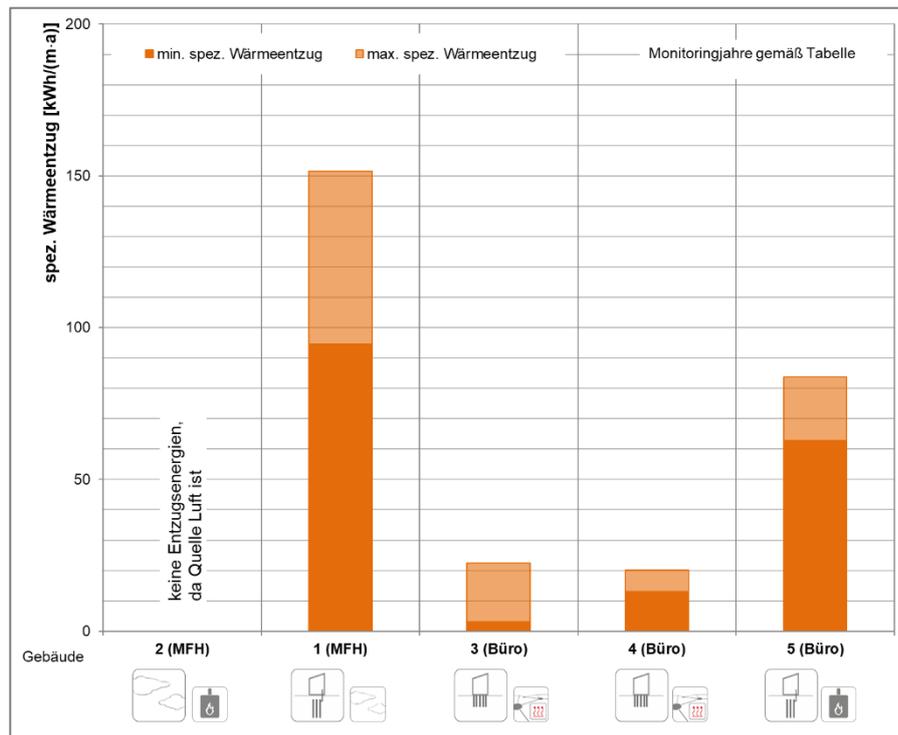


Abbildung 63 Im Rahmen des Monitorings ermittelter spezifischer Wärmeentzug der untersuchten Wärmeübertrager mit zugehörigen Niedertemperaturwärmequellen (nicht witterungsbereinigt)

13.4.5 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 sowie der Energiebezug des 2. Wärmeerzeugers definiert. Regenerative Energieerzeugungssysteme im Gebäude z. B. Photovoltaik-Anlagen zur Eigenstromversorgung werden nicht berücksichtigt und gegen gerechnet. 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 dem GebäudeEnergieGesetz (GEG 2020) (nicht erneuerbarer Anteil) für

- Strommix von 1,8,
- Erdgas von 1,1 und
- für Fernwärme 0,7 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 64 zeigt die spezifischen Jahres-Primärenergieverbrauchswerte der Vergleichsgebäude. Die Spanne der Kennwerte reicht von < 10 bis $80 \text{ kWh}_{PE}/(\text{m}^2_{NGF} \cdot \text{a})$. Der Mittelwert aller aufgeführten Gebäude liegt für den spezifischen Primärenergieverbrauch bei $\sim 42 \text{ kWh}_{PE}/(\text{m}^2_{NGF} \cdot \text{a})$.

In der Abbildung sind ebenfalls die Primärenergieverbräuche eingetragen, wenn die Gebäude nur über den 2. Wärmeerzeuger versorgt werden würden (PE-Verbrauch ohne WP), sprich keine Wärmepumpe in die Versorgung eingebaut wäre.

Es zeigt sich, dass

- der Primärenergieeinsatz abhängig ist von der Art des 2. Wärmeerzeugers und steigt mit der Häufigkeit seiner Nutzung.

- bei den Gebäuden, wo bereits der Anteil der Wärmepumpe gering ist (Gebäude 3 und 4) der Primärenergieverbrauch nicht mehr deutlich ansteigt. In den anderen Fällen sich der Primärenergieverbrauch um >50% erhöhen kann.
- der thermische Gebäudestandard und das Nutzerverhalten relevant sind.

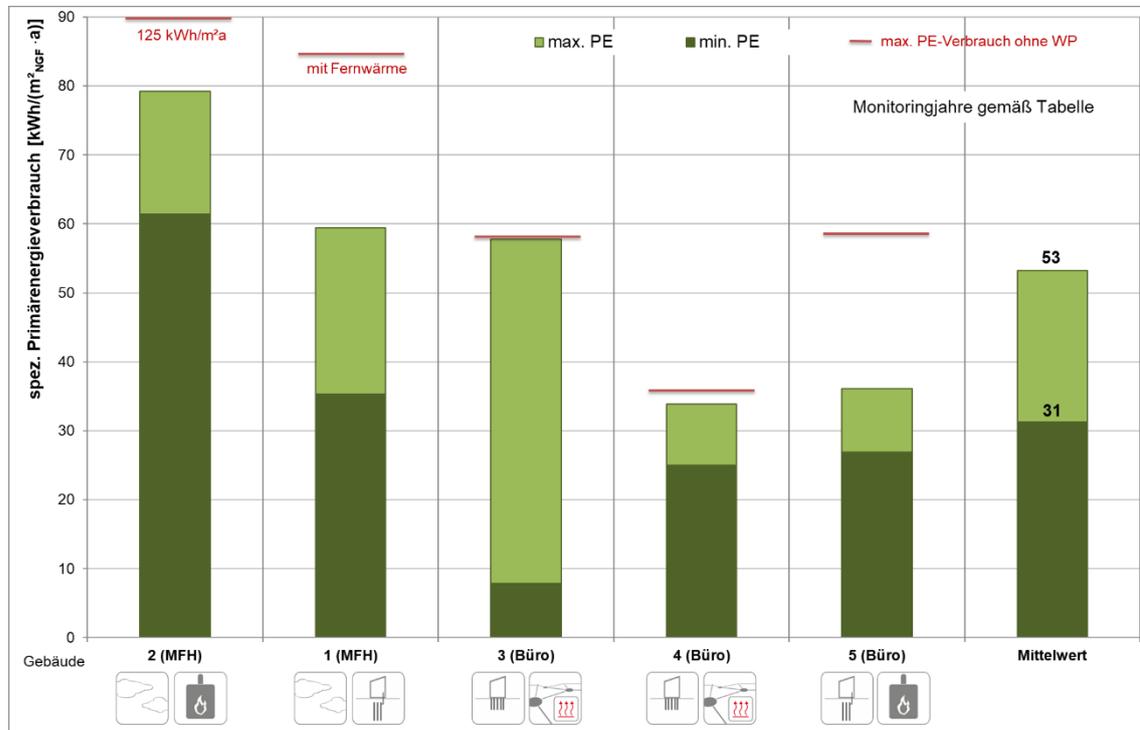


Abbildung 64 Im Rahmen des Monitorings ermittelte spezifische Primärenergiebedarfe durch den Betrieb der Wärmepumpen (nur Wärmepumpenstromverbrauch) und dem 2. Wärmeerzeuger

Als Indikator für die Umweltbelastung wird der Strom- sowie Gas- und Fernwärmeverbrauch in das CO₂-Äquivalent umgerechnet. Die Kohlendioxid-Emissionen werden mit Hilfe von CO₂-Äquivalentkennzahlen und dem Endenergieverbrauch ermittelt. Damit werden auch die anfallenden CO₂-Emissionen für die vorgelagerten Prozessketten wie beispielsweise die Förderung, die Verarbeitung und der Transport erfasst.

Für die Berechnungen wird ein Treibhausgase CO₂-Äquivalent

- für Strommix von 366 g/kWh_{EE},
- für Erdgas von 201 g/kWh_{EE} und
- für Fernwärme von 280 g/kWh_{EE} angesetzt.

Für den Vergleichsfall werden die CO₂-Emissionen eines Autos für 100 km Fahrstrecke herangezogen als auch wieder die CO₂-Emissionen aufgenommen ohne Einbindung einer Wärmepumpe.

Die für das Projekt ermittelten CO₂-Emissionen sind im Wesentlichen abhängig von der Anlagen- und Betriebseffizienz. Abbildung 65 zeigt die spezifischen CO₂-Emissionen der Vergleichsgebäude. Die Spanne der Kennwerte reicht von < 5 bis 21,3 kg CO₂/(m²_{NGF}·a). Der Mittelwert aller aufgeführten Gebäude liegt für die spezifischen CO₂-Emissionen bei ~11 CO₂/(m²_{NGF}·a).

Es zeigt sich auch bei den CO₂-Emissionen, dass

- die CO₂-Emissionen abhängig sind von der Art des 2. Wärmeerzeugers und steigt mit der Häufigkeit seiner Nutzung.
- bei den Gebäuden, wo bereits der Anteil der Wärmepumpe gering ist (Gebäude 3 und 4) auch die CO₂-Emissionen nicht mehr deutlich ansteigt. In den anderen Fällen können die CO₂-Emissionen um >50% bis mehr als das Doppelte ansteigen.

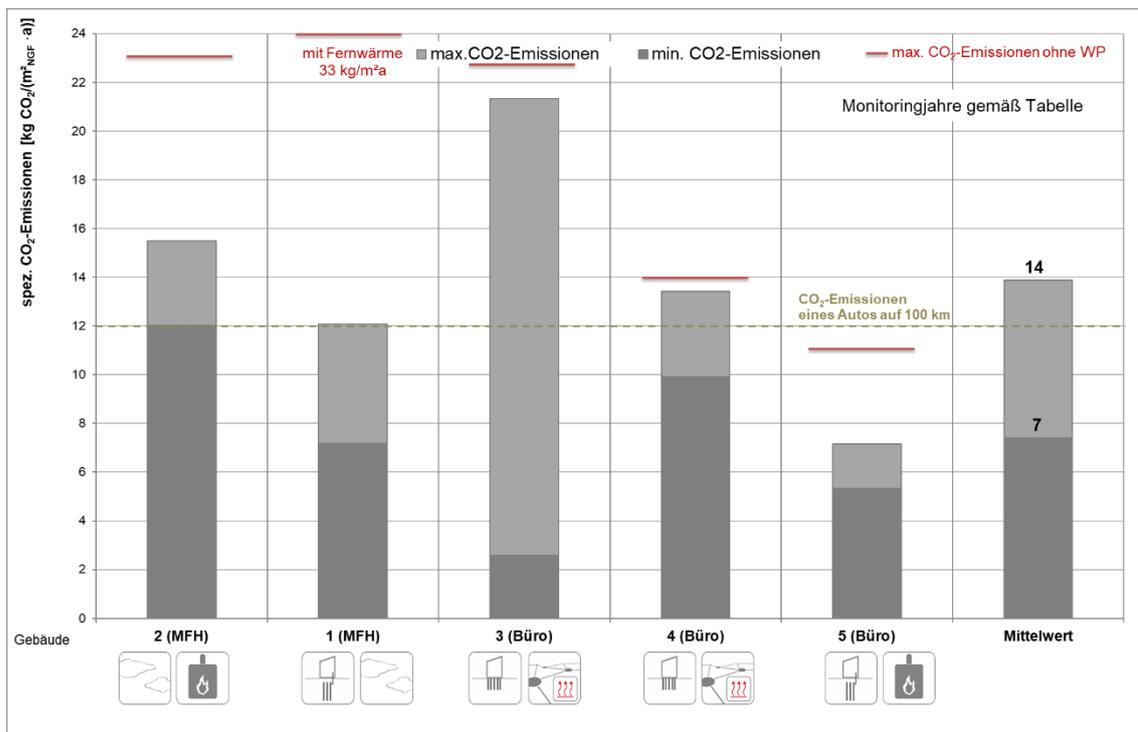


Abbildung 65 Im Rahmen des Monitorings ermittelte spezifische CO₂-Emissionen durch den Betrieb der Wärmepumpen (nur Wärmepumpenstrom) und dem 2. Wärmerezeuger

13.4.6 Fazit des Monitorings

Die untersuchte Anlagen weisen größtenteils die in der Planung definierten Verbrauchswerte auf. Ein höherer Verbrauch (Abweichungen von der Planung) oder Fehlbetriebe, wie bei Gebäude 3) können sehr gut durch den 2. Wärmerezeuger gedeckt bzw. abgefangen werden.

Die Wärmepumpenanlagen laufen im Allgemeinen zuverlässig und effizient. Es konnten zudem keine gravierenden Beschwerden bei den Nutzern verzeichnet werden.

In vielen Gebäuden war eine Einregulierungsphase und das Monitoring erforderlich, um den planungsgemäßer Betrieb und den Betriebswechsel zwischen Wärmepumpe und 2. Wärmerezeuger zu erreichen. Fehler oder Probleme lagen u.a. in der fehlerhaften Regelung. So übernahm der 2. Wärmerezeuger einen höheren Anteil an der Wärmeerzeugung. Bei den erdgekoppelten NT-Quellen, die zum Heizen und Kühlen genutzt werden, kann dies zur „Schädigung“ des Erdreichs führen, wenn die Bilanz zwischen Wärmeeintrag und -entzug nicht mehr übereinstimmt. Eine nutzer- / betriebsabhängige Abstimmung zwischen den Wärmerezeugern ist zwingend erforderlich.

Die erfassten Unterschiede bei den Jahresarbeitszahlen beruhen größtenteils auf der jeweiligen Betriebsführung sowie auf einen nicht planungsgemäßen Betrieb, teilweise schon vor der Monitoringphase. Eine Abminderung der JAZ durch die Trinkwassererwärmung ist nur gering registriert. Erst eine monatlicher Analyse lässt den Einfluss in den Sommermonaten erkennen.

Hinsichtlich der ökologischen Bewertung ist eine Kopplung von Wärmepumpe und einem zweiten Wärmerezeuger sinnvoll. Der Anteil der Wärmepumpe stellt die erneuerbare Energie im Versorgungskonzept dar und erhöht somit deutlich den Anteil der nutzbaren regenerativen Energie.

Es ist klar ersichtlich, dass eine Reduktion der CO₂-Emissionen und des Primärenergieverbrauchs durch den Einsatz der Wärmepumpen stattfindet.

14 AP10 – Erweiterung und Ergänzung von WP_{SOURCE}

Bei der Erweiterung von WP_{SOURCE} zum Programm WP_{SOURCE} 2.0 wurden neben den aufgeführten Ergebnissen aus den Arbeitspaketen AP1 - AP9 auch Hinweise und Anmerkungen von Nutzern mit Bezug auf die Programmversion 1.0 berücksichtigt.

Im Folgenden werden die programmtechnischen Anpassungen und Überarbeitungen (u. a. zu der Berechnungsmethode und zur Benutzeroberfläche) beschrieben.

14.1 Änderung der Berechnungsmethode

Das Vordimensionierungsprogramm wurde um eine Abschätzung solarer Deckungsanteile (Solarthermie und Photovoltaik) sowie der Kombination der Wärmepumpe mit einem weiteren Wärmeerzeuger (bivalenter Betrieb) sowohl für den Heizbetrieb ergänzt. Infolge der Dynamik solarer Einstrahlung, der Außentemperatur und des Strombedarfs lassen sich aus Monatsbilanzen keine detaillierten Ergebnisse mehr ableiten. Aus diesem Grund erfolgte eine Anpassung der Berechnungsmethode in Richtung einer zeitlich hoch aufgelösten Betrachtung der einzelnen Energieströme in und aus dem Gebäude.

Für ein besseres Verständnis der Änderungen wird zunächst der in WP_{SOURCE} 1.0 verwendete Berechnungsansatz beschrieben, eine detaillierte Beschreibung ist dem Abschlussbericht von „future:heatpump“ [1] zu entnehmen. Anschließend folgt die Argumentation des im Wesentlichen neu entwickelten Berechnungsansatzes in WP_{SOURCE} 2.0. Im Rest dieses Kapitels wird die neue Berechnungsmethode ausführlich dargestellt.

Durch die Ergänzung von weiteren Komponenten und Versorgungskonzeptoptionen in WP_{SOURCE} 2.0 und damit die Ausweitung des Berechnungsganges (solarer Deckungsanteile für Solarthermie und/oder Photovoltaik und bivalenter Betrieb), wurde eine Vielzahl neuer Freiheitsgrade eingeführt. Diese zusätzlichen Freiheitsgrade müssen von WP_{SOURCE} 2.0 und der programminternen Simulation abgedeckt werden. Mit dem bisherigen Rechenmodell ist dies in einer praktikabel Art und Weise nicht darstellbar. Beispielsweise könnte mit der Berechnungsmethode aus WP_{SOURCE} 1.0 der Deckungsanteil einer solaren Stromerzeugung zwar nach dem Verhältnis der Dachfläche zur Photovoltaikfläche mittels Interpolation aus einem Kennfeld abgeschätzt werden, jedoch bedeutete bereits die Einführung eines weiteren Freiheitsgrades (z. B. eine Option für die PV-Anlage) die doppelte Anzahl an Simulationen. Gleiches gilt für die Implementierung eines zweiten Wärmeerzeugers. Durch die Kombination einer PV-Anlage mit einem zweiten Wärmeerzeuger ergibt sich erneut eine Verdoppelung der Freiheitsgrade und Anzahl der notwendigen Simulationen und Berechnungen, usw. Diese exponentielle Zunahme der notwendigen Simulationen gilt gleichermaßen für die durchzuführenden TRNSYS-Simulationen. Auch wenn einzelne Simulationen durch offensichtlich Zusammenhänge ggf. eingespart werden können, wird deutlich, dass mit der Erweiterung der Programmooptionen und damit Zunahme der Freiheitsgrade eine nicht mehr darstellbare Anzahl der sowohl in TRNSYS als auch WP_{SOURCE} durchzuführenden Simulationen einher geht. Dieser Umstand war für die Entwicklung einer neuen Berechnungsmethode im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung von WP_{SOURCE} 1.1 zur Programmversion WP_{SOURCE} 2.0 entscheidend.

Photovoltaikanlage

Wichtige Kennzahlen bei Integration einer Photovoltaikanlage sind der Eigennutzungs- und der Eigendeckungsanteil. Der Eigennutzungsanteil (ENA) beschreibt den prozentualen Anteil des von einer PV-Anlage erzeugten Stroms, der im Gebäude genutzt wird. Der Eigendeckungsanteil (EDA) gibt an, welchen Anteil des gesamten Strombedarfs der selbst genutzte Strom entspricht.

Dem ursprünglichen Ansatz von WP_{SOURCE} folgend, die Ergebnisse von vielen numerischen Simulationen mit TRNSYS durch Interpolation und Vereinfachungen auf das vom Nutzer untersuchte Gebäude zu übertragen, wurde zunächst versucht einfache Zusammenhänge zwischen Strombedarf des Gebäudes, Größe der PV-Anlage, Größe einer eventuell vorhandenen Batterie sowie der solaren Einstrahlung am betrachteten Standort zu finden. Es wurde jedoch schnell deutlich, dass beispielsweise der tabellarische Ansatz aus Kley [19]

sehr stark vereinfacht ist und keine hinreichend gute Ableitung des ENA und des EDA sowie keine Berücksichtigung aller relevanten Rahmenbedingungen einer PV-Anlage erlaubt. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass die zeitlichen Verläufe von Strombedarf, -erzeugung und -speicherung eine wichtige Rolle spielen und gleiche Jahresbedarfe und Erzeugungsmengen praktisch nie die gleichen Eigennutzungsanteil (ENA) und Eigendeckungsanteil (EDA) beinhalten.

Zweiter Wärmeerzeuger

Eine ähnliche Schlussfolgerung ergab sich auch bei Überlegungen zur Berücksichtigung eines zweiten Wärmeerzeugers zum Aufbau bivalenter Heizsysteme. Für den Deckungsanteil des zweiten Wärmeerzeugers sind insbesondere zeitliche Korrelation von Außentemperatur und Wärmebedarf entscheidend. Aus diesem Grund lassen sich Simulationsergebnisse von in TRNSYS abgebildeten Mustergebäuden oft nur schwer oder gar nicht auf vom Nutzer spezifizierte Gebäude übertragen.

Da WP_{SOURCE} 2.0 weiterhin allen Anwendern über MS Excel zugänglich sein soll, wurden sämtliche neuen Rechenmodelle und Berechnungen in der Skriptsprache VBA (Visual Basic for Applications) programmiert und implementiert. VBA ist eine standardmäßig in Microsoft Office integrierte Programmiersprache, die unter anderem von MS Excel interpretiert und ausgeführt werden kann. Damit werden zur Ausführung von WP_{SOURCE} neben Microsoft Office (Excel) keine weiteren Programmbestandteile oder softwareseitigen Voraussetzungen auf dem System des Nutzers vorausgesetzt oder benötigt.

Ein Nachteil von VBA besteht in der Ausführungsgeschwindigkeit des Programmcodes, die abhängig vom Anwendungsfall um den Faktor 10 und mehr unter der von kompilierten Programmcodes liegt. Aus diesem Grund werden mathematische Modelle und Berechnungsalgorithmen in WP_{SOURCE} 2.0 meist vereinfacht implementiert. Dennoch werden die grundsätzlichen physikalischen Zusammenhänge innerhalb der Modelle realitätsnah wiedergegeben und ein Vergleich der Ergebnisse untereinander ist absolut zulässig. Da das Programm jedoch nicht den Anspruch ähnlich hoher Rechengeschwindigkeit und Genauigkeit kommerzieller Simulationsprogramme erhebt, die auf kompilierten Programmcodes basieren, sondern als Ergebnis eines Forschungsprojektes zu Niedertemperaturwärmequellen für Wärmepumpen die Projektergebnisse in einem Vorauslegungsprogramm vereint, ist der angesprochene Nachteil aus Sicht der Autoren vertretbar.

14.1.1 Rechenmodell und Ansatz von WP_{SOURCE} 1.0

In WP_{SOURCE} 1.0 werden die drei Gebäudetypen Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus und Bürogebäude mit ihren bauwerks- und komponentenspezifischen Konfigurationen sowie ihrer Kubatur derart abgebildet, dass sie mit Blick auf Deutschland typische Merkmale dieser drei Gebäudetypen repräsentieren. Die Gebäudebeschreibungen wurden in der Simulationsumgebung TRNSYS, Version 17 erstellt und in integrale Gebäude- und Anlagenmodell für die unterschiedlichen Gebäudetypen zur Simulation mit TRNSYS implementiert. Um die wesentlichen in Frage kommenden Wärmebedarfswerte vom Passivhaus bis zum Altbau abzudecken, wurden von jedem Gebäudetyp Modifikationen der Gebäudehülle derart definiert, dass sich am Referenzstandort Potsdam Heizwärmebedarfe von 15 bis 200 kWh pro m² und Jahr ergeben.

Auf der Grundlage der sich aus diesem Vorgehen ergebenden Mustergebäude wurden in der Simulationsumgebung TRNSYS Simulationsdecks erstellt, in denen neben den Gebäudemodellen und zugehörigen Algorithmen zur Berücksichtigung standardisierter thermischer Lasten für Trinkwarmwasserentnahmen auch Heizungsanlagentechnik inkl. Wärmepumpe(n) und Wärmepumpenperipherie integriert sind. Einen besonderen Schwerpunkt der integrierten Heizungsanlagentechnik stellen detaillierte Modelle der jeweils zu untersuchenden Niedertemperaturwärmequelle für die Wärmepumpe dar. Damit der Einfluss des Systems aus Niedertemperaturwärmequelle und -wärmeübertrager isoliert betrachtet und bewertet werden kann, verblieb die gesamte Anlagentechnik – mit Ausnahme der untersuchten Niedertemperaturwärmequellen und NT-Wärmeübertragersysteme sowie ihrer Dimensionen – bei den einzelnen Gebäudetypen unverändert. Abschließend wurden die unterschiedlichen Niedertemperaturwärmeübertrager anhand der zugehörigen Simulati-

onsdecks für die unterschiedlichen Mustergebäude dimensioniert. Zusammen mit projektrelevanten Voruntersuchungen und Schaffung einer Datengrundlage für WP_{SOURCE} 1.0 und WP_{SOURCE} 2.0 sowie stichprobenartigen Kontrollen der Ergebnisse, der Ermittlung verschiedener Umrechnungsfaktoren zwischen den 15 Klimaregionen und Auslegungsfaktoren für die Wärmeerzeuger wurden etwa 5000 Systemsimulationen durchgeführt.

Wird vom Nutzer von WP_{SOURCE} 1.0 das jeweilige Gebäude eingegeben, interpoliert das Programm zur Auslegung der unterschiedlichen Niedertemperaturwärmeübertrager zwischen den jeweils mittels TRNSYS generierten Ergebnissen für den entsprechenden Gebäudetyp mit dem nächst höheren und nächst niedrigeren Wärmebedarf sowie gegebenenfalls standortabhängigen Einflussfaktoren. In der Programmversion 1.0 spiegeln die so ermittelten Ergebnisse realistische Größen für eine Vorauslegung wider.

14.1.2 Neues Rechenmodell und Vorgehen in WP_{SOURCE} 2.0

Um die oben erläuterten Schwierigkeiten zu umgehen, wird die sich in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen, der jeweiligen Niedertemperaturwärmequelle und dem verwendeten Wärmeübertrager einstellende Quellenaustrittstemperatur mittels TRNSYS Simulationen ermittelte und WP_{SOURCE} 2.0 zur Verfügung gestellt. Die Berechnung der Energieflüsse (siehe auch Kapitel 14.4) des gesamten Energieversorgungssystems inklusive einer ggf. vorhandenen Solarthermieanlage, einem zweitem Wärmeerzeuger und/oder Kaminofen und/oder einer Photovoltaikanlage mit oder ohne elektrischem Speicher findet ab WP_{SOURCE} Version 2.0 innerhalb des Vorauslegungsprogramms statt.

Für die viertelstündliche Bilanzierung sind sowohl für den Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarf als auch für den Bedarf an Haushaltsstrom geeignete Bedarfsprofile in viertelstündlicher Auflösung notwendig. Während für Trinkwarmwasser- und Haushaltsstrom verallgemeinerte Bedarfsprofile, beispielsweise aus der VDI 4655 verwendet werden können, sollte der Heizwärmebedarf detaillierter und an das jeweilige Gebäude und an Nutzerangaben angepasst sein. – Insbesondere das Gebäude spielt eine wesentliche Rolle bei der Vordimensionierung der Niedertemperaturwärmequelle für eine Wärmepumpe und muss daher hinreichend detailliert berücksichtigt werden. Um bisherige Ergebnisse für die NT-Quellenauslegung weiterhin verwenden zu können, muss zudem eine gute Übereinstimmung mit den Lastprofilen und -verläufen der TRNSYS-Simulationen sichergestellt sein. Zwar ließen sich die in TRNSYS verwendeten Profile hinterlegen und simulierte Lastverläufe in das VBA Skript einbinden, aufgrund der Menge an Datenpunkten und Zeitreihen ergäbe sich für das Programm jedoch ein hoher Speicherbedarf verknüpft mit langen Ladezeiten. Aus diesem Grund wird auch die Berechnung des Wärmebedarfs im neuen VBA-Rechenkern durchgeführt. Die zunächst aufwendige Programmierung erlaubt zusätzlich die Berechnung von Kältelasten, inkl. der Ableitung der im Rahmen von AP 5 notwendigen Kältebedarfsprofile.

Die in VBA implementierte Gebäudesimulation berechnet das Bedarfsprofil einer idealen Heizung und benötigt prinzipiell dieselben Eingangsdaten wie entsprechende TRNSYS-Simulationen. Diese sind Angaben zum Standort, die Wand- und Fensterflächen inkl. der Wandaufbau und Fenstertyp, Sollwerte für die Raumtemperatur etc. Mithilfe eines Strahlungsmodells werden zunächst aus den Standortwetterdaten die Direkt- und Diffusstrahlung auf alle Wand- und Fensterflächen bestimmt. Mit der Raumtemperatur aus dem vorhergehenden Zeitschritt lassen sich durch Lösen von Differentialgleichungen die Wandtemperaturen auf der Innenseite der Wände berechnen. Mit den momentanen energetischen Gewinnen durch solare Einstrahlung auf das Gebäude und die vorhandenen Wärmekapazitäten ergibt sich ein Wärmestrom, der entweder zu einer Temperaturerhöhung im Gebäude führt oder aber – um die Solltemperatur im Gebäude zu gewährleisten – die momentane Heizlast und damit die benötigte Heizleistung darstellt. Bei dem in VBA umgesetzten Gebäudemodell wurden insbesondere mit Blick auf den im Gebäude stattfindenden Strahlungsaustausch und die gebäudeinterne thermische Zonierung Vereinfachungen vorgenommen. Nach erfolgter Kalibrierung verschiedener Modellparameter stimmen das thermische Verhalten des Gebäudes und die energetisch relevanten Ergebnisse gut mit den zur Validierung verwendeten TRNSYS-Modellen überein.

Wie erläutert wird der Strombedarf einer Wärmepumpe über zweidimensionalen Polynomen 2. Ordnung mit den Eingangsgrößen Eintrittstemperatur auf der Verdampfer- und Eintrittstemperatur auf der Kondensatorseite (Nutzenseite) sowie dem Wärmebedarf ermittelt. In der Berechnung mittels VBA muss analog zu den TRNSYS-Simulationen ein Heizungssystem mit Wärmespeicher(n) abgebildet werden. Nur so lässt sich, insbesondere mit Blick auf die Trinkwarmwassererwärmung, die puffernde Wirkung eines Speichers berücksichtigen. Durch die Implementierung eines mehrschichtigen Speichermodells (10 Temperaturzonen) lassen sich zudem die momentane Eintrittstemperatur vom Speicher in die Wärmepumpe und auch die aus dem Speicher kommende Kollektoreintrittstemperatur bestimmen.

14.2 Berechnung der Lastprofile (Wärmebedarf und Strombedarf)

Durch die große Anzahl von Freiheitsgraden, die insbesondere das Heizlastprofil beeinflussen, ist es nicht praktikabel für jedes Gebäude, jede Gebäudehülle und für jede Klimaregion ein hochaufgelöstes, mit TRNSYS generiertes Heizlastprofil in WP_{source} zu hinterlegen. Stattdessen wurde für die jeweiligen Gebäudetypen ein Rechenmodell entwickelt, das wesentliche Einflussgrößen abbildet und im Vergleich mit dem TRNSYS-Modell bei gleichen Eingangsgrößen vergleichbare Ergebnisse liefert.

14.2.1 Heizlastprofil

Ausgangspunkt des Modells ist eine Wärmekapazität C_{Raum} , die das Luftvolumen des Gebäudes inklusive aller Zwischenwände abbildet. Diese Wärmekapazität ist auf sieben Seiten – vier Außenwänden, zwei Dachflächen und eine Bodenplatte – von einer mehrschichtigen Wand umgeben. Außenwände und Dachflächen grenzen an die Außenluft, die Bodenplatte an das Erdreich. Um den Einfluss von direkter und diffuser solarer Einstrahlung auf die Außenwände und das Dach zu berücksichtigen, wird den Bauteilen anstelle der Außentemperatur die sogenannte Sonnenlufttemperatur¹ aufgeprägt.

Die in WP_{SOURCE} 2.0 verwendeten Wetterdaten entsprechen denen der Programmversion 1.0 und damit unverändert den allen TRNSYS Simulationen in den Projekten future:heatpump und future:heatpump II zugrunde liegenden Wetterdaten, siehe auch den Abschlussbericht zu future:heatpump [1].

Da die Solarstrahlung neben der Heizlastberechnung auch für Solarthermie- und Photovoltaikanlagen verwendet wird, ist eine genaue Berechnung der Direkt- und Diffusstrahlung auf eine beliebig orientierte und geneigte Fläche erforderlich. Für die Berechnung der Strahlungsdaten aus den hinterlegten Zeitreihen der Normal- und horizontalen Diffusstrahlung wurde die Berechnungsmethodik der PVLib² adaptiert. Die Diffusstrahlung wird über ein Strahlungsmodell von Perez³ mit den in TRNSYS verwendeten Koeffizienten berechnet.

In WP_{SOURCE} 2.0 sind alle in den TRNSYS-Gebäudemodellen für die jeweiligen Gebäude verwendeten Wandaufbauten sowie sämtliche Fenster- und Lüftungsanlagenparameter hinterlegt. In Abhängigkeit des vom Nutzer angegebenen Heizwärmebedarf werden die zugehörigen Bauteilkenngrößen für die Heizlastberechnung verwendet. Für den Wärmestrom innerhalb der Wand gilt – nachfolgend beispielhaft zwischen Schicht 2 und 3:

$$\dot{Q}_{2 \rightarrow 3} = \frac{A_{\text{Querschnitt}}}{\frac{1}{2} \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{1}{2} \frac{d_3}{\lambda_3}} \cdot (T_3 - T_2)$$

¹ Gleichung 1.70 (Seite 44) in „Bernd Glück: Innovative Wärmeübertragung und Wärmespeicherung“, FKZ 0327370C

<https://berndglueck.de/lowex.php>

² <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/>

³ Perez, R. et. al 1988. “The Development and Verification of the Perez Diffuse Radiation Model”. SAND88-7030

d bezeichnet die Dicke, λ die Wärmeleitfähigkeit der jeweiligen Schicht. Der Wärmestrom nach *außen* berechnet sich zu

$$\dot{Q}_{\text{außen} \rightarrow 1} = \alpha_{\text{außen}} \cdot A_{\text{Wand}} \cdot (T_{\text{außen}} - T_1)$$

entsprechend der nach *innen* zu

$$\dot{Q}_{5 \rightarrow \text{innen}} = \alpha_{\text{innen}} \cdot A_{\text{Wand}} \cdot (T_5 - T_{\text{innen}})$$

In den obigen Gleichungen bezeichnet α den Wärmeübergangskoeffizienten von der Oberfläche der an die Außenbedingungen grenzenden Schicht nach außen bzw. den Wärmeübergangskoeffizienten von der an die Innenbedingungen (Raum) grenzenden Schicht nach innen. Die Gleichungen werden in Abhängigkeit der jeweiligen Schichttemperatur als lineares Gleichungssystem $A\vec{x} = \vec{b}$ formuliert.

Zu Beginn eines Zeitschritts der Heizlastberechnung liegt $T_{\text{Außen}}$ aufgrund der gegebenen Wetterdaten bereits fest. Für die anderen Temperaturen in und an den Bauteilen dienen die Temperaturen des vorhergehenden Zeitschritts als Startbedingungen. Für diese Temperaturen wird das lineare Gleichungssystem über den Tridiagonal-Algorithmus (Thomas-Algorithmus) gelöst, so dass sich die Temperaturen T_1 bis T_5 ergeben.

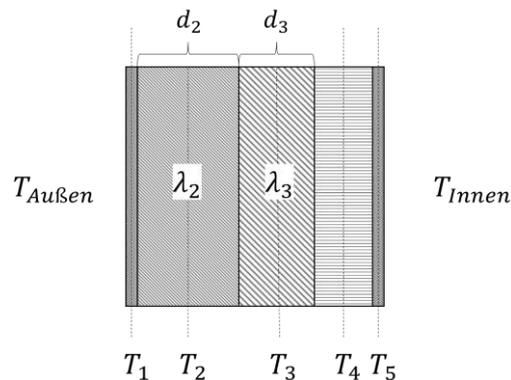


Abbildung 66: Beispielhafter Wandaufbau für die Heizlastberechnung

Um den Tridiagonal-Algorithmus anwenden zu können, werden die Temperaturen der Schichten aller sieben Wände nacheinander und nicht gekoppelt berechnet. Die Wärmeströme durch die einzelnen Wände werden nach der Berechnung der Temperaturen mit den über den betreffenden Zeitschritt gemittelten Temperaturwerten bestimmt. Liegt die Innenraumtemperatur zu Beginn und am Ende eines Zeitschritts bei 21 °C und strömt Wärme von innen nach außen, entspricht der Wärmeverlust genau der benötigten Heizleistung einer *idealen* Heizung. Im jedem anderen Fall wird die berechnete Raumtemperatur implizit mittels eines iterativen Verfahrens bestimmt, d. h. die Berechnung so lange für verschiedene Raumtemperaturen T_{neu} durchgeführt, bis gilt

$$T_{\text{neu}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Raum}}(T_{\text{neu}})}{C_{\text{Raum}}} \cdot dt + T_{\text{alt}}$$

Dabei entspricht C_{Raum} der gesamten Wärmekapazität des Gebäudeinneren und \dot{Q}_{Raum} dem Wärmestrom in oder aus dem Raum. Ein Unterschreiten der Raumsolltemperatur (21 °C) innerhalb eines Zeitschritts dt wird durch eine dynamische Anpassung der Zeitschrittweite berücksichtigt.

Solaren Energieeinträge (Gewinne) durch Fensterflächen werden vereinfacht berücksichtigt. Die Solarstrahlung auf ein Fenster ergibt sich, wie auch die auf eine Wand, aus dem Einstrahlwinkel zwischen direkter Strahlung und Flächennormalen (Fensterfläche bzw. Wandfläche) und der aktuellen Direktstrahlung zuzüglich der auf das Fenster treffenden Diffusstrahlung. Wie bereits oben erwähnt, wird die Diffusstrahlung über ein Strahlungsmodell von Perez berechnet. Die energetisch wirksame, durch ein Fenster eintretende Solarstrahlung, ergibt sich aus der Multiplikation der auf die verglaste Fläche treffenden Strahlung mit einem einfallswinkelabhängigen g-Wert der Verglasung. Die g-Werte der verwendeten Verglasungen wurden aus der

TRNSYS-Bibliothek übernommen. Innerhalb des Gebäudes werden die solaren Gewinne zum Teil als konvektive Wärmegewinne, zum Teil als Strahlungsgewinne der dem Fenster gegenüberliegenden Wand sowie der Bodenplatte berücksichtigt. Die Anteile von konvektiven und radiativen solaren Gewinnen wurden derart gewählt, dass die aus der Berechnung resultierenden Lastprofile möglichst gut mit denen der TRNSYS-Referenzsimulationen übereinstimmen. Abbildung 67 zeigt, dass trotz der Vereinfachungen bei der Berechnung der Heizlast das resultierende Lastprofil gut mit dem mittels TRNSYS zuvor berechneten Lastprofil (Referenz) für das gleiche Gebäude übereinstimmt.

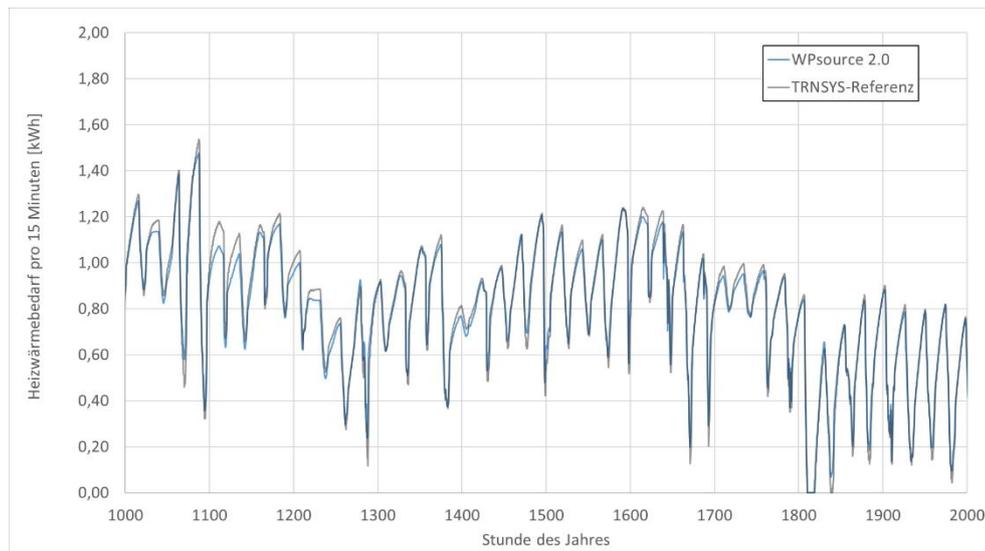


Abbildung 67: Mittels WP_{SOURCE} 2.0 und TRNSYS berechnete Heizlastlastprofile für ein Einfamilienhaus mit einem Heizwärmebedarf von 100 kWh/(m²a) am Standort Potsdam (Ausschnitt)

Für das der Abbildung 67 zugrunde liegende Einfamilienhaus am Standort Potsdam zeigen sich lediglich zum Ende der Heizperiode (Frühjahr) und zu ihrem Anfang (Herbst) Differenzen zwischen dem mittels TRNSYS simulierten und dem mit WP_{SOURCE} 2.0 generierten Lastprofil: Die Heizperiode des in WP_{SOURCE} 2.0 implementierte Modell beginnt etwas früher (ab ca. Stunde 5900) und dauert etwas länger (bis etwa Stunde 3900). Bezogen auf die während der gesamten Heizperiode umgesetzte Energiemenge ist die zusätzliche Energie im Frühjahr und Herbst des Mittels WP_{SOURCE} 2.0 generierten Lastprofil jedoch marginal, siehe Abbildung 68.

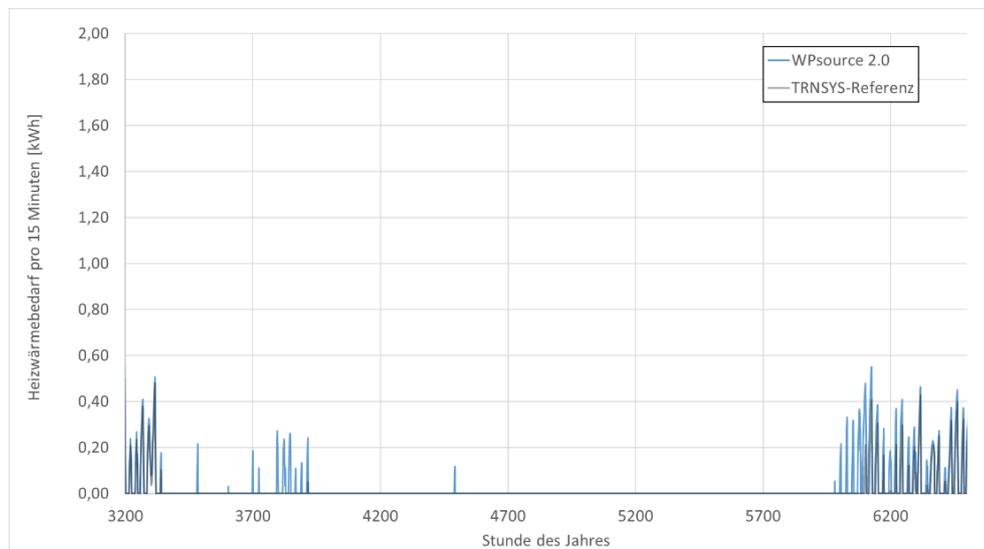


Abbildung 68: Differenzen zwischen den mittels WP_{SOURCE} 2.0 und TRNSYS berechnete Heizlastlastprofile zum Ende und am Anfang der Heizperiode; Einfamilienhaus am Standort Potsdam, Heizwärmebedarf 100 kWh/(m²a)

14.2.2 Trinkwarmwasser / Haushaltsstrom

Entnahme und Lastprofile für Trinkwarmwasser und Haushaltsstrom für Ein- und Mehrfamilienhäuser werden abhängig von den Nutzereingaben auf der Grundlage der verwendeten Wetterdaten nach dem in VDI 4655 beschriebenen Verfahren dynamisch aus den in der Richtlinie hinterlegten Typtagen berechnet. Demgegenüber werden für die Entnahme von Trinkwarmwasser und Nutzerstrom für das Bürogebäude fest hinterlegte Profile verwendet. Die Profile orientieren sich an den Nutzungszeiten von Bürogebäuden gemäß DIN 18599 Teil 10. Der absolute Trinkwarmwasserbedarf ist DIN V 18599 Teil 10, Tabelle 7 entnommen. Dieser Trinkwarmwasserbedarf wird an der Gebäudefläche und dem vom Nutzer angegebenen Gesamtbedarf skaliert.

Für Mehrfamilienhäuser kann zudem ein Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt werden. Die Berechnung eines Gleichzeitigkeitsfaktors ist in ⁴ beschrieben.

14.3 Bilanzierung der Energieströme und Bemessung der Energieversorgung

Die Bilanzierung der Energieströme und Bemessung der Energieversorgung erfolgt in WP_{SOURCE} 2.0 in zwei Schritten:

Zunächst wird das System wärmeseitig bilanziert. Mit den daraus ableitbaren Strombedarfen für eine Wärmepumpe, Zirkulationspumpen und gegebenenfalls Energieträgerbedarfe einen zweiten Wärmeerzeuger, erfolgt im Anschluss die stromseitige Bilanzierung. Die einzelnen Modellierungsansätze sind in Abschnitt 14.3.2 beschrieben.

14.3.1 Energieströme und Bilanzen

Aus dem gegebenen Trinkwarmwasserprofil wird ermittelt, zu welcher Zeit welcher Massenstrom aus dem Speicher entnommen werden muss, um den Bedarf zu decken. Je nach Auswahl durch den Nutzer ist der Speicher entweder ein reiner Trinkwarmwasserspeicher oder ein Kombispeicher (für Trinkwarmwasser und Raumheizung mit solarthermischer Unterstützung). Im Fall von Durchlauferhitzern entfällt der Speicher und

⁴ Roggenkamp, Rosebrock, Wilken: LIKE-Q: Abschätzung der CO₂-Emissionen eines Neubauquartiers in der Rahmenplanung“ (BauSIM 2020)

die Bedarfsanforderung aus einem Trinkwarmwasserprofil (Energieanforderung) wird instantan vom Durchlauferhitzer gedeckt. Über die vom Nutzer vorgegebenen Werte für Frischwasser- und Zapftemperatur lässt sich der Massenstrom für den Fall bestimmen, dass die Speichertemperatur, beziehungsweise die Austrittstemperatur am eingetauchten Trinkwasserwärmeübertrager im Kombispeicher, der geforderten Zapftemperatur entspricht. Da dieser Fall sowohl in der Praxis als auch in der Modellierung quasi nie eintritt, findet eine Umrechnung des Massenstroms auf die aktuelle Speichertemperatur statt. Liegt die Speichertemperatur bzw. die Austrittstemperatur am Trinkwasserwärmeübertrager unter der Solltemperatur für die Zapfung, wird dem Speicher dennoch Wasser und damit verbunden Energie entnommen und ein *Fehlenergiebedarf* verzeichnet.

Um die Trägheit des Raumheizungssystems abbilden zu können, was insbesondere bei Systemen mit Inverter-Wärmepumpen ohne Heizungsspeicher wichtig ist, wird eine *zusammenfassende Kapazität* eingeführt, die alle wärmeabgebenden Oberflächen repräsentiert. Der die Wärmeübertragung an die Räume charakterisierende *kA*-Wert wird anhand der Vor- und Rücklauftemperaturen sowie der Heizlast im Auslegungspunkt berechnet und stark vereinfacht über die gesamte Berechnung als konstant angesetzt. Mit dieser Vorgabe wird ermittelt, welche Temperatur die *zusammenfassende Kapazität* haben müsste, um bei bekannter Raumtemperatur den berechneten Wärmebedarf zu decken. Ist die Raumtemperatur zu niedrig und die Speichertemperatur hinreichend hoch, wird die *zusammenfassende Kapazität* und damit das Raumheizungssystem durchströmt und dem Raum Wärme zugeführt. Im anderen Fall wird die Zirkulationspumpe abgeschaltet und die Wärmepumpe geht außer Betrieb. Wird für das Bürogebäude eine separate RLT-Anlage definiert, wird dem Speicher der durch den Nutzer vorgegebene Anteil an Heizenergie direkt entnommen und die Kapazität des Heizungssystems überbrückt.

Das Speichermodell prüft intern, ob die Temperatur zur Trinkwarmwasser- und/oder Wärmeentnahme zur Raumheizung an der entsprechenden Anschlusshöhe zur Trinkwasserentnahme bzw. des Heizkreisvorlaufs ausreicht und fordert im anderen Fall eine Erwärmung des Speichers durch die Wärmepumpe an. Das Betriebsverhalten der Wärmepumpe wird über Kennlinien abgebildet. In Abhängigkeit der Quelleneintritts- und senkenseitigen Vorlauftemperatur repräsentieren diese die momentane thermische und elektrische Leistung sowie den COP der Wärmepumpe.

Wird trotz Betriebs der Wärmepumpe die Solltemperatur für das aus dem Speicher austretende Wasser nicht erreicht, geht ein ggf. vorhandener zweiter Wärmeerzeuger (bivalenter Betrieb) in Betrieb und erhöht die Speicheraustrittstemperatur – sofern möglich – auf die Solltemperatur.

Sämtliche Energieströme werden mithilfe eines expliziten Verfahrens mit für die Dauer eines Zeitschritts konstanten Temperaturen berechnet. Um infolge dessen physikalisch unsinnige Ergebnisse zu vermeiden, ist es absolut notwendig die Zeitschrittweite der aktuellen Situation und den jeweiligen Bedingungen der in die Berechnungen eingehenden Komponenten anzupassen. Aus diesem Grund wurde ein adaptives Zeitschrittverfahren implementiert, das, basierend auf den Massenströmen in und aus dem Speicher sowie in und aus dem oder den eingetauchten Wärmeübertragern, einen passenden Zeitschritt ableitet. Anstelle der grundsätzlich angesetzten Viertelstunde kann dieser Zeitschritt stark reduziert nur wenige Sekunden betragen. Der über das adaptive Zeitschrittverfahren abgeleitete Zeitschritt wird auf die gesamte wärmeseitige Berechnung und nicht allein auf das Speichermodell angewendet.

Nach erfolgter wärmeseitiger Bilanzierung erfolgt die deutlich einfachere stromseitige Bilanzierung. Dazu wird zunächst der gesamte Strombedarf addiert und, sofern vorhanden, der Stromerzeugung der PV-Anlage gegengerechnet. Bei der Berücksichtigung einer PV-Anlage wird zunächst der Haushalts- bzw. Nutzerstrom, dann der Hilfsstrom und zuletzt der Strom für die Wärmeerzeugung gedeckt. Die einzelnen regenerativen Deckungsanteile werden parallel berechnet und programmintern mitgeschrieben. Ist zusätzlich eine Batterie vorhanden, wird diese entsprechend be- oder entladen und geht in die Bilanzierung ein.

14.3.2 Verwendete Modelle und Annahmen

Im Folgenden wird die Funktionsweise der einzelnen Modelle kurz erläutert.

14.3.2.1 Thermischer Speicher

Für den thermischen Speicher wird in Anlehnung an die TRNSYS-Komponenten Type 60⁵ und Type 340⁶ ein Speichermodell mit zehn Temperaturschichten modelliert. Die Be- und Entladung erfolgt über sogenannte *double ports*. *Double ports* sind Rohrpaare, bei denen die Rohre auf verschiedenen Höhen des Speichers zum Fluidein- und -austritt angeschlossen sind, z. B. Vor- und Rücklauf des Heizkreises. Für ein Rohrpaar (*double port*) gilt, dass der eintretende Massenstrom gleich dem austretenden ist. Edelstahlwellrohrwärmeübertrager, wie sie in WP_{SOURCE} der Trinkwassererwärmung dienen, erstrecken sich im Allgemeinen über mehrere Temperaturschichten des Speichers. Ihr Wärmeübertragungsvermögen wird mehrschichtig abgebildet und über die in [DRUECK] angegebenen Zusammenhänge charakterisiert. Darüber hinaus beinhaltet das Speichermodell auf Höhe der entsprechenden *double ports* Temperatursensoren für Trinkwarmwasser, Heizungswärme oder Kälte. Über diese wird dem Wärme- oder Kälteerzeuger signalisiert, dass der Speicher beheizt bzw. gekühlt werden muss. Über die Lösung eines linearen Gleichungssystems werden die Bilanzgleichungen aller Schichten innerhalb eines Zeitschritts gekoppelt gelöst, wobei der Wärmeübergang zu den Wärmeübertragern als expliziter Quell- oder Senkenterm Berücksichtigung findet. Die Zeitschrittweite hängt von den Massenströmen und den Temperaturdifferenzen ab und beträgt wenige Sekunden bis maximal 15 Minuten.

Wenn für die Bereitstellung von erwärmtem Trinkwasser nicht die Option *Durchlauferhitzer* ausgewählt ist, wird im Energieversorgungssystem ein Trinkwarmwasserspeicher verwendet und modelliert. Mit der Ausnahme des Einsatzes einer Inverter-Wärmepumpe, bei der das Heizungssystem ohne Pufferspeicher ausgeführt wird, wird das Energieversorgungssystem zur Raumbeheizung stets mit einem Speicher (Heizungspufferspeicher) modelliert. Wählt der Nutzer eine Solarthermieanlage zur Trinkwarmwasser und Heizungsunterstützung, wird ein Kombispeicher verwendet. Anstelle der einzelnen Speicher für Trinkwarmwasser und Raumheizung wird aus diesem sowohl Trinkwarmwasser entnommen als auch der Heizwärmebedarf gedeckt.

Muss Kälte (nur im Bürogebäude) bereitgestellt werden, wird analog zu den Wärmespeichern ein mehrschichtiger Kältespeicher modelliert.

Die Speichergröße wird auf der Grundlage gängiger Auslegungskriterien vor der Berechnung programmiert ermittelt. Sie kann vom Nutzer geändert werden.

14.3.2.2 Wärmepumpe(n)

Das Betriebsverhalten der unterschiedlichen Wärmepumpentypen wird über Kennfelder charakterisiert, anhand derer die thermische und elektrische Leistung sowie der COP bzw. der EER (Energy Efficiency Ratio, Leistungszahl bei der Kälteerzeugung) für jede Kombination aus Quelltemperatur und Vorlauftemperatur der Wärmepumpe berechnet werden.

Innerhalb eines Zeitschrittes kann eine Wärmepumpe immer nur entweder einen Trinkwarmwasser-, einen Heizwärme- oder einen Kältebedarf decken. Aus diesem Grund kann es innerhalb eines Zeitschritts zu Fehlenergien (nicht gedecktem Bedarf) kommen. Nicht gedeckter Bedarf wird im darauf folgenden Zeitschritt gedeckt.

⁵ Brian J Newton, „Modeling of Solar Storage Tanks“

⁶ Harald Drück, „MULTIPOINT Store – Model for TRNSYS“

Der Nutzer gibt in WP_{SOURCE} an, ob es sich um eine ON/OFF-Wärmepumpe oder ein Inverter-Gerät handelt. Die Dimensionierung erfolgt programmintern anhand des aus den berechneten Lastprofilen ermittelten Bedarfes. Der Nutzer kann die programmintern berechnete notwendige Leistungen mit einer eigenen Vorgabe überschreiben.

Die thermische und die elektrische Leistung werden je nach Wärmepumpentyp entweder über bivariate Polynome, über bilineare Interpolation innerhalb eines zwei- oder bei Inverter-Wärmepumpen eines dreidimensionalen Kennfeldes oder über in der hplib⁷ beschriebene lineare Polynome berechnet.

Die unterschiedlichen Interpolationsmethoden werden in WP_{SOURCE} 2.0 wie folgt angewendet (für Luft/Wasser-, Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen):

- ON/OFF-Gerät – Bivariate Polynome
- Reversible ON/OFF-Gerät – Bilineare Interpolation im Kennfeld
- Inverter-Gerät – hplib Polynome

Im Folgenden werden die genannten Interpolationsmethoden erläutert.

Bivariate Polynome

Die Betriebscharakteristiken der sechs aus einer Vielzahl am Markt verfügbarer Geräte abgeleiteten Referenzwärmepumpen für WP_{SOURCE} in den Programmversionen 1.0 und 2.0 sowie auch die Wärmepumpen im Rahmen der im Vorfeld durchgeführten TRNSYS-Simulationsstudien wurden bzw. werden mittels bivariater Polynome der Form

$$Q_{Kond.} = a_1 + a_2 * T'_{Verd.} + a_3 * T'_{Kond.} + a_4 * T'_{Verd.} * T'_{Kond.} + a_5 * T'^2_{Verd.} + a_6 * T'^2_{Kond.}$$

$$P_{el} = b_1 + b_2 * T'_{Verd.} + b_3 * T'_{Kond.} + b_4 * T'_{Verd.} * T'_{Kond.} + b_5 * T'^2_{Verd.} + b_6 * T'^2_{Kond.}$$

$$T'_{Verd.} = \frac{T_{Verd.}}{273,15} + 1 \qquad T'_{Kond.} = \frac{T_{Kond.}}{273,15} + 1$$

berücksichtigt.

Das Indize *Kond.* bezeichnet die Temperatur am Austritt des Kondensators, also die Vorlauftemperatur auf der Nutzenseite der Wärmepumpe. Das Indize *Verd.* bezeichnet die Temperatur am Verdampfeintritt, also die Eintrittstemperatur aus der Niedertemperaturwärmequelle in die Wärmepumpe.

Die Bestimmung der Koeffizienten erfolgte zunächst mit Hilfe des Ansatzes für das TRNSYS-Wärmepumpenmodell Type 401 (M. Wetter, Th. Afjei). Eine Extrapolation von Betriebspunkten über den zur Koeffizientenbestimmung mittels bivarianten Polynomen zugrunde liegenden Wertebereiche hinaus birgt jedoch signifikante Unsicherheiten und die Gefahr erhöhter Ungenauigkeit. Sie ist ohne geeignete Verifizierungsverfahren der Ergebnisse kritisch zu sehen und zu vermeiden.

Bilineare Interpolation im Kennfeld

Die Methode der 'bilinearen Interpolation im Kennfeld' ist in Bezug auf eine Extrapolation von Betriebspunkten der Methode mittels bivarianten Polynomen vorzuziehen. Bei der bilinearen Interpolation im Kennfeld wird zunächst zwischen zwei Vorlauftemperaturen und anschließend zwischen zwei Quellentemperaturen linear interpoliert. Nachteilig an dieser Methode ist die bereits per Definition geringere Genauigkeit (2. Ordnung) gegenüber einem Ansatz mit bivariaten Polynomen (3. Ordnung). Demgegenüber erscheinen extrapolierte Betriebspunkte meist realistischer und auch das Ermitteln von Polynomkoeffizienten entfällt.

⁷ Tjarko Tjaden, Hauke Hoops, Kai Rösken. (2021). RE-Lab-Projects/hplib: heat pump library (v1.3).

hplib Polynome

Als dritte Methode/Möglichkeit können Polynome der sogenannten 'hplib' verwendet werden. Mittels dieser Polynome werden aus frei verfügbaren Heatpump Keymark Datensätzen mittlere Kennlinien errechnet. Vorteil einer Verwendung der hplib ist die gute Datengrundlage sowie stimmige Abbildung von ON/OFF-Wärmepumpen. Um weitere Wärmepumpenmodelle in die mittlere Kennlinie einfließen zu lassen, können neue Polynome generiert werden. Nähere Informationen finden sich unter: <https://github.com/RE-Lab-Projects/hplib/>



Abbildung 69 Implementierung von Wärmepumpenkennlinien in WP_{SOURCE} 2.0

14.3.2.3 Solarkollektor (Solarthermie)

Der Wirkungsgrad eines thermischen Sonnenkollektors kann über die Gleichung

$$\eta_{koll} = \eta_0 - k_1 \frac{(\theta_{koll} - \theta_a)}{q_s} - k_2 \frac{(\theta_{koll} - \theta_a)^2}{q_s}$$

nach Bollin⁸ charakterisiert werden. Dabei werden abhängig vom Kollektortyp, also z. B. Flachkollektor, Vakuumröhrenkollektor oder CPC-Vakuumröhrenkollektor unterschiedliche Wärmeverlustkoeffizienten k_1 und k_2 angesetzt. Weitere Eingangsparameter der Kennlinien sind der Konversionsfaktor η_0 des betreffenden Kollektors, die momentane Einstrahlung q_s , die Außentemperatur θ_a sowie die Kollektortemperatur θ_{koll} , für die gilt

$$\theta_{koll} = \frac{\theta_{koll,ein} - \theta_{koll,aus}}{2}$$

⁸ Elmar Bollin: Automation regenerativer Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden

Die Kollektoreintrittstemperatur $\theta_{koll,ein}$ entspricht der Zulaufftemperatur in den Kollektor. In WP_{SOURCE} 2.0 ist das die entsprechende Austrittstemperatur aus dem Speichermodell.

Um die Kollektoraustrittstemperatur $\theta_{koll,aus}$ zu berechnen, wird die Gleichung

$$0 = \theta_{koll,ein} + \eta_{koll}(\theta_{koll,aus}) \cdot \frac{A_{koll} q_s}{\dot{m}_{koll} c_{p,koll}} - \theta_{koll,aus}$$

über ein iteratives Verfahren gelöst. Dabei entspricht A_{koll} der aktiven Kollektorfläche, \dot{m}_{koll} dem Massenstrom durch den Kollektor und $c_{p,koll}$ der spezifischen Wärmekapazität des Wärmeträgers (Wasser-Glykol-Gemisch).

In WP_{SOURCE} 2.0 gibt der Nutzer an, ob die Solarthermieanlage allein für die Trinkwassererwärmung oder auch zur Heizungsunterstützung dient oder dienen soll. Anschließend wird der Kollektortyp gewählt und damit programmintern die zugehörigen Werte für die Koeffizienten k_1 und k_2 gesetzt. Es folgen Angaben zur Gesamtfläche, zur Ausrichtung und Neigung des Kollektors und zum Bezug der Flächenangabe. Der Flächenbezug wird für die programminterne Berechnung der thermisch aktiven Kollektorfläche benötigt.

Neben der Angabe, ob die Anlage auch die Heizung unterstützen soll müssen Kollektortyp, -fläche, -ausrichtung und -neigung definiert werden.

Solarthermie

Modus

Kollektortyp

Fläche *) m²

Ausrichtung des Kollektors °

Neigung des Kollektors **) °

Bruttofläche

(bitte Flächenbezug wählen)

*) WP_{SOURCE} überprüft nicht, ob die Dachfläche des eingegebenen Gebäudes ausreichend groß ist.

**) 0° horizontal, 90° vertikal

Abbildung 70 Eingabe einer Solarthermieanlage in WP_{SOURCE} 2.0

14.3.2.4 Zweiter Wärmeerzeuger (Bivalenter Betrieb)

Sofern die Temperatur am Speicheraustritt niedriger als die Solltemperatur ist, hebt der zweite Wärmeerzeuger die Temperatur bis auf die Solltemperatur an. Liegt die Speicheraustrittstemperatur beispielsweise bei 50 °C, die Solltemperatur hingegen bei 55 °C, heizt der zweite Wärmeerzeuger mit einer Leistung von

$$\dot{q}_{biv} = \dot{m} c_p \Delta T$$

nach. Dabei ist \dot{m} der Massenstrom, c_p die spezifische Wärmekapazität des beheizten Wassers und ΔT die nachzuheizende Temperaturdifferenz, im Beispiel 5 °C. Verfügt der zweite Wärmeerzeuger nicht über die entsprechende Leistung, die sich aus der Auslegung über die Bivalenztemperatur oder den Leistungsanteil im Auslegungspunkt ergibt, wird die Solltemperatur nicht erreicht und es kommt zu Fehlenergien. Diese werden im darauf folgenden Zeitschritt gedeckt. Können Fehlenergien nicht gedeckt werden, summieren sich diese auf und verschieben sich in nachfolgende Zeitschritte. Die Unterscheidung der verschiedenen Wärmeerzeuger, also beispielsweise Fernwärme oder Gaskessel, hat keine Einfluss auf die Modellierung des zweiten Wärmeerzeugers. Sie dient lediglich der Berechnung der Endenergie sowie der Emissionen und Kosten.

Der Nutzer gibt in WP_{SOURCE} 2.0 lediglich die Art des zweiten Wärmeerzeugers, den Nutzungsgrad und für die Dimensionierung entweder den Bivalenzpunkt oder den Leistungsanteil bei Normaußentemperatur an.

bivalenter Wärmeerzeuger *) Gaskessel

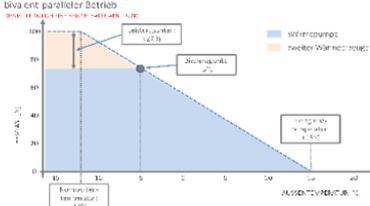
*) immer in bivalent-paralleler Betriebsweise (siehe Grafik rechts)

Nutzungsgrad 92 %

System mit Brennwerttechnik

Auslegung nach Leistungsanteil

Anteil bei Normaußentemperatur 40 %



(zum Vergrößern anklicken)

Abbildung 71 Eingabe des zweiten Wärmeerzeugers im bivalent-parallelen Betrieb

Regelung und Betrieb des zweiten Wärmeerzeugers

Ist die benötigte Leistung zur Trinkwarmwasserbereitung höher als die maximale Heizlast des Gebäudes, kann es sein, dass der zweite Erzeuger nicht genutzt wird. Die Wärmepumpe wird zur Deckung des Trinkwarmwasserbedarfs ausgelegt. Auch bei niedrigen Außentemperaturen (über den Bivalenzpunkt hinaus) steht somit immer genügend Leistung zur Deckung des Heizwärmebedarfs durch die Wärmepumpe an.

14.3.2.5 Kaminofen

Vor allem um Gebäude im ländlichen Raum besser abbilden zu können, kann als weitere Möglichkeit zur Wärmeerzeugung ein Kaminofen angegeben werden. Ein Kaminofen beheizt das Gebäude ohne eine hydraulische Einbindung in das Heizungssystem, unabhängig davon ob dieses aus einer monovalent betriebenen Wärmepumpe oder einer bivalenten Wärmeerzeugung besteht. Der Kaminofen wird als konvektive Wärmequelle modelliert, die direkt die Wärmeanforderung an das Heizsystem mindert. Um das Nutzerverhalten zumindest in Teilen zu berücksichtigen, steht die Eingabe der Verteilung der Wärmebereitstellung über den Tag (24 Stunden) zur Verfügung. Durch die Angabe der Verteilung der Wärmeerzeugung durch den Kaminofen wird das Lastprofil für das Heizungssystem entsprechend reduziert.

Gibt der Nutzer beispielsweise an, 5.000 kWh des jährlichen Wärmebedarfs von 15.000 kWh (also 33,3 %) über den Kaminofen zu decken, wird der Wärmebedarf der Heizlastberechnung zunächst für die einzelnen Zeitintervalle (jeweils 6 Stunden) aufaddiert und anschließend entsprechend der Nutzerangaben reduziert.

Beispiel

0 bis 6 Uhr:	3.500 kWh	– 10% von 5.000 kWh	ergibt	3.000 kWh (Reduzierung um ca. 14 %)
6 bis 12 Uhr:	2.500 kWh	– 30% von 5.000 kWh	ergibt	1.000 kWh (Reduzierung um 60 %)
12 bis 18 Uhr:	4.000 kWh	– 10% von 5.000 kWh	ergibt	3.500 kWh (Reduzierung um ca. 12,5 %)
18 bis 24 Uhr:	5.000 kWh	– 50% von 5.000 kWh	ergibt	2.500 kWh (Reduzierung um 50 %)

Wärmebedarf 15.000 kWh/a
(gesamt)

10.000 kWh/a
(Reduzierung: 33,3 %)

Zum Beispiel, siehe auch Abbildung 72.

Der von einer Wärmepumpe oder einem bivalenten Heizsystem zu deckende Bedarf eines jeden Zeitintervalls (max. 15 Minuten) wird in den angegebenen Zeitfenstern (jeweils 6 Stunden) um die für das entsprechende Zeitfenster errechnete Reduzierung vermindert.

zusätzlicher Kaminofen vorhanden

genutzte Wärmemenge *) 5.000 kWh

Verteilung der Nutzung über den Tag	Zeitraum	Anteil (%)
	0 bis 6 Uhr	10
	6 bis 12 Uhr	30
	12 bis 18 Uhr	10
	18 bis 24 Uhr	50
	GESAMT:	100

*) im Glossar finden Sie Erläuterungen, wie Sie die genutzte Wärmemenge, bspw. aus den Festmetern verbrannten Holzes, ermitteln können.

Abbildung 72 Eingabe eines Kaminofens als zusätzlicher Wärmeerzeuger

14.3.2.6 Zirkulationspumpen

Die Leistungsaufnahme der Zirkulationspumpen des Heizungssystems, der Raumwärmeverteilung sowie der Trinkwarmwasserversorgung sowie aller Wärmequellen wird unabhängig vom jeweiligen Betriebspunkt vereinfacht über die Gleichung

$$P_{pump} = \frac{g H_A \dot{m}}{\eta_{motor} \eta_{pump}}$$

implementiert. Wobei g die Erdbeschleunigung, H_A die Förderhöhe, \dot{m} der Massenstrom und η_{motor} der Wirkungsgrade des Pumpenmotors bzw. η_{pump} der Wirkungsgrade der Pumpe ist. Ebenso wie die Wirkungsgrade wird die Förderhöhe H_A als konstant angenommen.

14.3.2.7 Photovoltaik-Anlage

In WP_{SOURCE} 2.0 wird der Ertrag einer PV-Anlage aus der Nennleistung des gesamten PV-Generators (alle Module) unter Standard-Testbedingungen ermittelt. Ist dem Nutzer dieser Wert nicht bekannt, kann zur Ermittlung der Generatornennleistung die Nennleistung eines einzelnen PV-Moduls mit der Anzahl der Module multipliziert werden. Die Standard-Testbedingungen für PV-Module sind: eine Einstrahlung von 1.000 W/m², ein Einstrahlwinkel von 48° (entspricht einer Luftmasse AM von 1,5) und eine Modultemperatur von 25 °C. Die Nennleistung der PV-Anlage (in kWp) wird abhängig von der aktuellen Strahlungsleistung am Anlagenstandort entsprechend der jeweiligen Installationsbedingungen skaliert. Der Temperatureinfluss auf den Wirkungsgrad der Module wird vernachlässigt. Die aktuelle Leistung der PV-Anlage(n) ergibt sich zu

$$P_{PV} = \frac{\dot{q}_s \left[\frac{W}{m^2} \right]}{1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]} \cdot kWp \cdot \eta_{WR}$$

Neben der Nennleistung der installierten PV-Anlage werden als Eingabeparameter der Wechselrichter-Wirkungsgrad sowie die Ausrichtung und Neigung der Module abgefragt. Darüber hinaus kann eine zweite PV-Anlage (PV-Generator) konfiguriert werden, zum Beispiel, wenn das Gebäude ein Satteldach hat.

Photovoltaik

Modus

Bei einer PV-Anlage mit Eigenstromnutzung kann kein Wärmestromtarif gewählt werden.

Gesamtleistung der Module	24,0	kWp
Wechselrichter-Wirkungsgrad	98	%
Ausrichtung der Module	0	°
Neigung der Module *)	15	°

*) 0° horizontal, 90° vertikal

Zweite PV-Anlage konfigurieren

Gesamtleistung der Module	4,0	kWp
Wechselrichter-Wirkungsgrad	98	%
Ausrichtung der Module	90	°
Neigung der Module *)	38	°

*) 0° horizontal, 90° vertikal

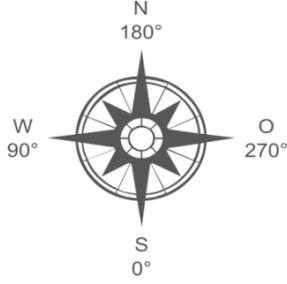


Abbildung 73 Eingabe von einer oder zwei PV-Anlagen in WP_{SOURCE} 2.0

Die in WP_{SOURCE} integrierten Korrelationen zur Abschätzung der PV-Eigennutzungs- und Deckungsanteile beruhen auf Berechnungen der PV-Stromproduktion, der Eingabe bzw. Definition des Haushaltsstroms und der Ermittlung des Stromverbrauchs durch eine Wärmepumpe. Bedarfsprofile liegen viertelstündlich vor, sodass sich der Eigennutzungsanteil des PV-Stroms durch Bilanzierung hinreichend genau abschätzen lässt.

14.3.2.8 Batterie

Eine Batterie wird als einfache elektrische Kapazität modelliert, wobei die Verluste beim Be- und Entladen entsprechend der Nutzerangaben zum Wirkungsgrad der Batterie berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist auch die Definition monatlicher Speicherverluste möglich.

Neben den Wirkungsgraden für die Be- und Entladung der Batterie kann der Nutzer sogenannte *C-Raten* für die maximale Be- und die Entladeleistung definieren. Im Batteriemodell von WP_{SOURCE} 2.0 werden die nutzerdefinierten *C-Raten* über den gesamten Betriebsbereich der Batterie konstant gehalten. Der Ladezustand der Batterie bleibt unberücksichtigt.

Der Übersichtlichkeit halber wird im Reiter „Energieversorgung“ lediglich der Wert für die Kapazität der Batterie abgefragt. Angaben zu Speicherverlusten, Wirkungsgraden und den C-Raten finden sich im Reiter „Einstellungen“.

Batterie

Auswahl

nutzbare Kapazität kWh

Batterie

C-Rate Beladung	1.0	h ⁻¹	Ladeleistung im Verhältnis zur Kapazität [kW/kWh]
C-Rate Entladung	1.0	h ⁻¹	Entladeleistung im Verhältnis zur Kapazität [kW/kWh]
Ladewirkungsgrad	85	%	
Entladewirkungsgrad	85	%	
Selbstentladerate	1	%	Monatliche Selbstentladung der Batterie

Mehr- oder Minderkosten (bei Minderkosten "-" vorstellen) € (netto)

Abbildung 74 Eingabe und Auswahl eines elektrischen Speichers in WP_{SOURCE} 2.0

14.3.2.9 Gleichzeitigkeit

Wird wie im Mehrfamilienhaus davon ausgegangen, dass mehr als ein Nutzer, z. B. mehrere Wohneinheiten, einen gemeinsamen Energieerzeuger bzw. Energiequelle (z. B. mit Trinkwarmwasser oder elektrischem Strom) beanspruchen, nimmt mit einer zunehmenden Zahl von Nutzern bzw. Wohneinheiten die Wahrscheinlichkeit einer gleichzeitigen Nutzung ab.

Die Berechnung eines Gleichzeitigkeitsfaktors ist in Roggenkamp, Rosebrock, Wilken: „LIKE-Q: Abschätzung der CO₂-Emissionen eines Neubauquartiers in der Rahmenplanung“ (BauSIM 2020) beschrieben und so in WP_{SOURCE} 2.0 aufgenommen worden.

14.4 Berechnungsablauf in WP_{SOURCE} 2.0

Abbildung 75 zeigt den vereinfachten Aufbau des Programms mit der Erweiterung der zusätzlichen Komponenten sowie die Struktur des Informationsflusses.

Die Eingabe und Anwendung beginnt mit der Dokumentation und Spezifikation der Ausgangssituation und der Rahmenbedingungen des jeweiligen Projektes, hierzu zählen die Eingabe allgemeiner Projektdaten u. a. bekannte Kennwerte wie etwa die Grundstücksfläche, den Gebäudetyp (Ein- oder Mehrfamilienhaus oder Bürogebäude) und dessen thermischen Standard sowie ggf. Energiebedarfswerte. Darüber hinaus trifft der Nutzer Annahmen bezüglich des auszulegenden Heiz- und/oder Kühlsystems.

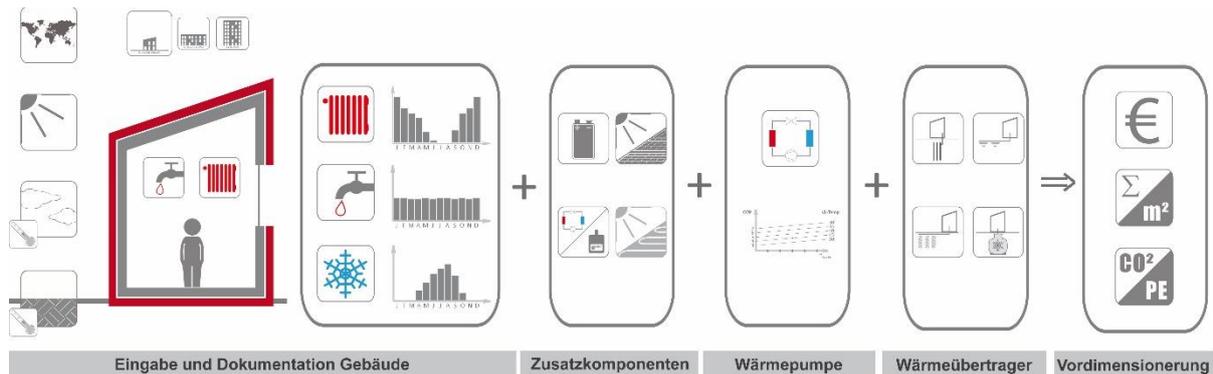


Abbildung 75 Dimensionierungsprozess und Berechnungsablauf in WP_{SOURCE} 2.0

Die Berechnung der Energieflüsse erfolgt dann auf Viertelstundenbasis und in zwei Schritten. Zunächst werden der aktuelle Trinkwarmwasser- und Heizwärmebedarf auf den Wärmespeicher beziehungsweise das Heizungssystem aufgeprägt sowie die jeweiligen Massenströme berechnet. Der Ertrag einer ggf. vorhandenen Solarthermieanlage wird in den Speicher geladen. Sinkt die Speichertemperatur unter die vorgegebene Solltemperatur, ergibt sich eine Wärmeanforderung und die Wärmepumpe, die gegebenenfalls von einem zweiten Wärmeerzeuger unterstützt wird, geht in Betrieb. Die aktuelle Effizienz der Wärmepumpe wird anhand der momentanen Quelltemperatur, die entweder durch die Außentemperatur, durch Nutzervorgaben oder durch im Vorfeld für bestimmte NT-Wärmequellen/Wärmeübertrager-Kombinationen durchgeführten TRNSYS-Simulationen berechnet wurde sowie der Temperaturen auf der Nutzenseite der Wärmepumpe (Vorlauftemperaturen) berechnet.

Im zweiten Schritt werden alle aktuellen elektrischen Lasten, also durch Haushalts- und/oder Nutzerstrom, Hilfsstrom und Strom für die Wärmepumpe verursachten Verbräuche, zusammengerechnet und mit der Stromerzeugung einer eventuell vorhandenen PV-Anlage verrechnet. Bleibt ein Überschuss, wird dieser in die optional vorhandene Batterie geladen. Bleibt ein Bedarf, wird die ggf. vorhandene Batterie entsprechend entladen. Abschließend ergibt sich ein Netzbezug oder eine Netzeinspeisung.

Wichtige Kennwerte, wie beispielsweise Deckungsanteile und Betriebszeiten, werden parallel berechnet und ergeben sich – auf der Basis von Viertelstundenwerten – im Vergleich zu einem einfachen Interpolationsverfahren mit deutlich höherer Genauigkeit.

Der Berechnungsablauf in WP_{SOURCE} 2.0 ist im Folgenden anhand des Maximalbeispiels ON/OFF-Luft-Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit Solarthermie- und PV-Anlage mit Batterie und einem bivalent eingebundenem zweiten Wärmeerzeuger kurz erläutert.

- Im Vorfeld der eigentlichen Berechnung der Versorgungsvarianten wird das jährliche Heizlastprofil einer idealen Heizung für das nutzerspezifizierte Gebäude am Objektstandort in einer Zeitschrittweite von 15 Minuten berechnet und für Zugriffe des Programms hinterlegt.
- Im Anschluss erfolgt die Berechnung der Versorgungsvarianten

- Iterative Bestimmung der Kollektoraustrittstemperatur bei momentaner Einstrahlung und Kollektoreintrittstemperatur. Die Kollektoreintrittstemperatur entspricht der unteren Speichertemperatur.
- Bei Trinkwarmwasserentnahme aus einem Kombispeicher: iterative Bestimmung der Austrittstemperatur des TWW-Wärmeübertragers bei einem Massenstrom entsprechend des Energiebedarfs, der sich aus dem TWW-Entnahmeprofil und den Verteilverlusten ergibt.
- Bestimmung der Vorlauftemperatur des Heizkreises des Gebäudes anhand einer außen-temperaturabhängigen Heizkurve.
- Entnahme von Heizungswasser aus der Speicherschicht, an die der Vorlauf des Heizkreises angeschlossen ist. Der jeweilige Massenstrom ergibt sich aus der momentanen Schichttemperatur und dem Wärmebedarf aus dem zuvor erstellten Heizlastprofil einer idealen Heizung.
- Wenn die Schichttemperatur in Höhe des Speicheraustritts für Trinkwarmwasser oder Raumheizung unter die spezifizierte Mindesttemperatur sinkt, wird die Wärmepumpe aktiviert. Die Eintrittstemperatur auf der Kondensatorseite (Nutzenseite) der Wärmepumpe ist die momentane Schichttemperatur an Anschlusspunkt der Trinkwarmwasserentnahme bzw. des Vorlaufs des Heizkreises. Die quellenseitige Temperatur, das heißt die Temperatur aus der Niedertemperaturwärmequelle zur Wärmepumpe, ergibt sich auf der Grundlage von mittels TRNSYS simulierten und in WP_{SOURCE} 2.0 hinterlegten Jahrestemperaturverläufen für die unterschiedlichen Niedertemperaturwärmequelle.
- Bestimmung der elektrischen Leistungsaufnahme und des COP der Wärmepumpe.
- Reicht die Leistung der Wärmepumpe nicht aus und ist die Außentemperatur niedriger als der Bivalenzpunkt, geht der zweite Wärmeerzeuger in Betrieb.
- Neuberechnung der Temperaturverteilung im Speicher unter Einbeziehung aller Entnahme- und Beladeenergieströme, jeweils definiert durch Temperaturen und Massenstrom.
- Stromseitige Bilanzierung aus Nutzer- und Anlagenstrom, Strombedarf der Wärmepumpe, Stromerzeugung der PV-Anlage und aktuellem Ladungszustand der Batterie.

Da die Quellentemperatur über die Leistungsaufnahme der Wärmepumpe Einfluss auf das gesamte System und nahezu alle Berechnung hat, wird dieses Vorgehen für jede Viertelstunde des Jahres und für alle vom Nutzer für eine Bewertung ausgewählten Niedertemperaturwärmequellen wiederholt. Im Fall des Bürogebäudes ergibt sich darüber hinaus noch ein Kältebedarf, der gedeckt werden muss. Der programminterne Ablauf ist grundsätzlich der gleiche wie bei der Deckung von Wärmebedarfen, ergänzt um die Modellierung eines Kälteversorgungssystems.

14.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in WP_{SOURCE}

Beruhende auf die Umsetzung im Forschungsprojekt „future:heatpump - Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen“ (BMWK, FKZ 03ET1273A) sowie in WP_{SOURCE} 1.1 erfolgt der Kostenvergleich der unterschiedlichen Niedertemperaturwärmequellen und -übertrager sowie Wärmeerzeuger und weitere Komponenten (PV-Anlage, Solarthermie und Batterie) über eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Hierzu werden die Investitionskosten sowie die Jahresgesamtkosten in Anlehnung an VDI 2067 [18] ermittelt.

In den Investitionskosten sind die Kostenstellen

- Wärmepumpe und weitere Wärmeerzeuger (im bivalenten Betrieb),
- Niedertemperaturwärmequelle: Erdarbeiten und Bohrungen sowie Material für Wärmeübertrager, Verteilerschächte und Anbindung als auch Genehmigung und Planung,
- weitere Zusatzkomponenten wie PV-Anlage, Solarthermie und Batterie

berücksichtigt. Die Betrachtung bezieht sich nur auf die Wärme- und Stromerzeugung, die Verteilung oder das Gebäude selbst werden in WP_{SOURCE} nicht berücksichtigt.

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.

In WP_{SOURCE} können aber vorhandene und zu berücksichtigende Förderungen durch Minderkosten im Programm eingebunden und berücksichtigt werden.

WICHTIGER HINWEIS

Aufgrund der gegenwärtigen Entwicklung der Energie- und Rohstoffpreise, können auch die umfangreichen Recherchen und validierten Prognoseverfahren, wie sie bei der Erarbeitung der Kosten- und Preisangaben in WPSOURCE Anwendung fanden, die Entwicklung der Energie- und Rohstoffpreise sowie Preise und Kosten für nachgelagerte Produkte und Dienstleistungen, nur mit großer Unsicherheit abbilden.

Nutzer von WPSOURCE werden daher dazu angehalten, sämtliche Kosten- und Preisangaben auf Aktualität zu prüfen und wo nötig anzupassen.

14.5.1 Investitionskosten

Zur Ermittlung der Investitionskosten für die Wärmepumpen als auch der weiteren Wärmeerzeuger (Gaskessel, Pelletkessel, etc.) sowie der PV-Anlagen, Solarthermie und Batterien werden die Listenpreise und Angaben zu den im Jahr 2020 / 2021 auf dem Markt angebotenen marktführenden Herstellern herangezogen und ausgewertet. Im Rahmen der Auswertung werden die ermittelten Preise auf spezifische Preise heruntergebrochen und mit Hilfe einer Näherungsfunktion abgebildet. Die Funktionen für die Investitionskosten sind Ausgangspunkte für die Implementierung der Kosten in das Programm WP_{SOURCE}, siehe Beispiel Inverterwärmepumpen in Abbildung 76.

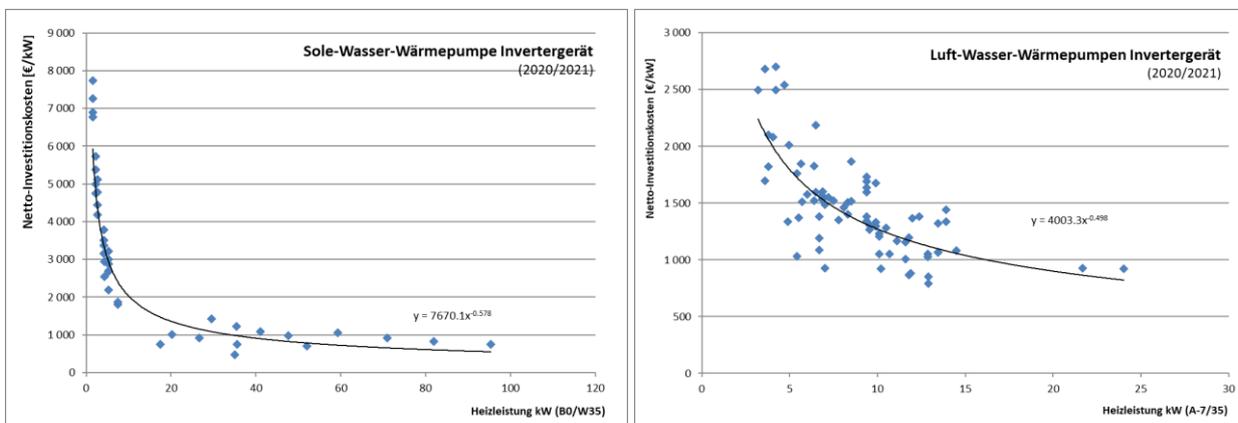


Abbildung 76 Beispiel für die spezifischen (Netto)investitionskosten für Invertergeräte von Sole-Wasser- und Luft-Wasser-Wärmepumpen (Stand 2020/2021)

Wie auch schon für die in WP_{SOURCE} vorhandenen Wärmeübertrager werden in Bezug auf die Investitionskosten für die neuen Wärmeübertrager und deren Installation ebenfalls Herstellerangaben herangezogen und ausgewertet. Für die Errichtung der Anlagen werden Angebote von ausführenden Firmen sowie abgerechnete Kosten durchgeführter Baumaßnahmen verglichen.

Die Investitionskosten für die Niedertemperaturwärmeübertrager werden in die Positionen

- Bohr- und Erdarbeiten,
- Material und
- Dienstleistungen

aufgeteilt.

Die ermittelten und vom Programm WP_{SOURCE} dokumentierten Investitionskosten beinhalten stets alle Niedertemperaturwärmeübertrager und die Kosten für deren Installation sowie deren Anbindung bis zum Hausanschluss.

Der Anwender und Nutzer von WP_{SOURCE} kann jederzeit die Investitionskosten auf seine Preise anpassen oder durch Mehr- und Minderkosten erhöhen bzw. reduzieren.

Grabenkollektor				spez. Kosten	netto	brutto	350.00 (Kreise) 550.00 (psch.) 1800.00 (psch.)
Pos.	Beschreibung	Spez. Kosten	netto				
Pos. 11	Bodenaushub und Verfüllung	350.00 (Kreise)	n.V.	n.V.			
Pos. 12	Anbindegräben	550.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 13	Baustelleneinrichtung	1800.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Position 1: Erdarbeiten (inkl. nutzerspezifischer Preissteigerung)				n.V.	n.V.		
Pos. 21	Grabenkollektor und Wärmegemedium	350.00 (Kreise)	n.V.	n.V.			
Pos. 22	Schacht	480.00 (Kreise)	n.V.	n.V.			
Pos. 23	Anbindung (Rohrleitungen)	95.00 (Kreise)	n.V.	n.V.			
Position 2: Material (inkl. nutzerspezifischer Preissteigerung)				n.V.	n.V.		
Pos. 311	Wärmerechtsantrag	480.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 312	Dokumentation	600.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 313	Auslegung	600.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 31	Genehmigung inkl. Dokumentation und Ausleg	1680 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 32	Versicherung	0.00 (lm)	n.V.	n.V.			
Position 3: Dienstleistungen (inkl. nutzerspezifischer Preissteigerung)				n.V.	n.V.		
GESAMTKOSTEN GRABENKOLLEKTOREN				n.V.	€	n.V.	

Erdwärmesonde (EWS)				spez. Kosten	netto	brutto	37.00 (lm) 320.00 (Stk.) 2.600.00 (psch.)
Pos.	Beschreibung	Spez. Kosten	netto				
Pos. 11	Bohrung und Verfüllung	37.00 (lm)	n.V.	n.V.			
Pos. 12	Anbindegräben	320.00 (Stk.)	n.V.	n.V.			
Pos. 13	Baustelleneinrichtung	2.600.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Position 1: Erdarbeiten (inkl. nutzerspezifischer Preissteigerung)				n.V.	n.V.		
Pos. 21	Erdwärmesonde und Wärmegemedium	15.00 (lm)	n.V.	n.V.			
Pos. 22	Schacht	500.00 (Stk.)	n.V.	n.V.			
Pos. 23	Anbindung (Rohrleitungen)	25.00 (Stk.)	n.V.	n.V.			
Position 2: Material (inkl. nutzerspezifischer Preissteigerung)				n.V.	n.V.		
Pos. 311	Wärmerechtsantrag	700.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 312	Dokumentation	0.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 313	Geothermal Response Test / Thermal Respons	3000.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 314	Auslegung	0 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 31	Genehmigung inkl. Dokumentation und Ausleg	3700 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 32	Versicherung	2.00 (lm)	n.V.	n.V.			
Position 3: Dienstleistungen (inkl. nutzerspezifischer Preissteigerung)				n.V.	n.V.		
GESAMTKOSTEN ERDWÄRMESONDEN				n.V.	€	n.V.	

Eisspeicher mit Solarabsorber				spez. Kosten	netto	brutto	40.00 (lm²) 550.00 (psch.) 2.700.00 (psch.)
Pos.	Beschreibung	Spez. Kosten	netto				
Pos. 11	Bodenaushub und Verfüllung	40.00 (lm²)	n.V.	n.V.			
Pos. 12	Anbindegräben	550.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 13	Baustelleneinrichtung	2.700.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Position 1: Erdarbeiten (inkl. nutzerspezifischer Preissteigerung)				n.V.	n.V.		
Pos. 21	Eisspeicher (inkl. Wärmeübertrager u. Wärmeta)	400.00 (lm²)	n.V.	n.V.			
Pos. 22	Anbindung Eisspeicher	70.00 (lm²)	n.V.	n.V.			
Pos. 23	Solarabsorber (inkl. Installation)	295.00 (lm²)	n.V.	n.V.			
Position 2: Material (inkl. nutzerspezifischer Preissteigerung)				n.V.	n.V.		
Pos. 311	Wärmerechtsantrag	0.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 312	Dokumentation	600.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 313	Auslegung	600.00 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 31	Genehmigung inkl. Dokumentation und Ausleg	1200 (psch.)	n.V.	n.V.			
Pos. 32	Versicherung	0.00 (lm²)	n.V.	n.V.			
Position 3: Dienstleistungen (inkl. nutzerspezifischer Preissteigerung)				n.V.	n.V.		
GESAMTKOSTEN EISSPEICHER MIT SOLARABSORBER				n.V.	€	n.V.	

Komponenten Energieversorgungssystem

Luft-Wasser-Wärmepumpe		€	10	25	50	100	150	200	
Heizleistung (kW)*									
On/Off-Gerät		1912	1555	1074	812	613	521	464	€/kW
On/Off-Gerät, reversibel		1620	1410	1039	910	754	675	624	€/kW
Inverter-Gerät		1640	1272	806	571	404	330	286	€/kW
Kosten für aktuelle Auswahl (inkl. MwSt.)		n.V.							*) bezogen auf A2/W/35

Sole-Wasser-Wärmepumpe		€	10	25	50	100	150	200	
Heizleistung (kW)*									
On/Off-Gerät		1704	1132	543	311	179	123	102	€/kW
On/Off-Gerät, reversibel		2243	1416	621	333	178	124	96	€/kW
Inverter-Gerät		2723	2027	1193	799	536	424	359	€/kW
Kosten für aktuelle Auswahl (inkl. MwSt.)		n.V.							*) bezogen auf B0/W/35

Wasser-Wasser-Wärmepumpe		€	10	25	50	100	150	200	
Heizleistung (kW)*									
On/Off-Gerät		1482	998	491	287	168	123	98	€/kW
On/Off-Gerät, reversibel		2243	1416	621	333	178	124	96	€/kW
Inverter-Gerät		2443	1908	1225	876	626	514	448	€/kW
Kosten für aktuelle Auswahl (inkl. MwSt.)		n.V.							*) bezogen auf V10/W/35

Solarthermieanlage		€	10	25	50	100	150	200	
Bruttofläche (m²)									
Flachkollektor		400	400	400	400	400	400	400	€/m²
VR-Kollektor		870	870	870	870	870	870	870	€/m²
CPC-VR-Kollektor		785	785	785	785	785	785	785	€/m²
Kosten für aktuelle Auswahl (inkl. MwSt.)		n.V.							

Photovoltaikanlage		€	10	25	50	100	150	200	
Nennleistung (kWp)									
Investitionskosten inkl. V		2000	1950	1850	1750	1500	1250	1000	€/kWp
Installationskosten inkl. Ir		2000	1950	1850	1750	1500	1250	1000	€/kWp
Kosten für aktuelle Auswahl (inkl. MwSt.)		n.V.							*Wechselrichter

Batterie		€	10	25	50	100	150	200	
Nutzkapazität (kWh)									
Investitionskosten (I.o.)		1119	996	807	689	588	536	501	€/kWh
I.o. inkl. Leistungselektr.		1390	1030	825	725	625	575	545	€/kWh
Kosten für aktuelle Auswahl (inkl. MwSt.)		n.V.							

Gaskessel		€	10	25	50	100	150	200	
Heizleistung (kW)									
Investitionskosten		434	337	215	153	108	89	77	€/kW
Anschlusskosten		2500							

Fernwärme		€	10	25	50	100	150	200	
Anschlussleistung (kW)									
Investitionskosten		700	545	350	245	175	145	125	€/kW

Abbildung 77 Hinterlegte Investitionskosten der einzelnen Komponenten (rechts) und Wärmeübertrager (links) in WP_{SOURCE} 2.0

14.5.2 Jahresgesamtkosten

Die Wirtschaftlichkeitsermittlung basiert auf einer dynamischen Berechnung nach der Annuitätenmethode. Die Berechnung der Jahresgesamtkosten erfolgt in Anlehnung an VDI 2067-1 [18]. Bei der Ermittlung der Kosten werden

- kapitalgebundenen Kosten (Annahme: Zinssatz 3 %; freie Eingabe in WP_{SOURCE}),
- bedarfs- und/oder verbrauchsgebundene Kosten (Energiekosten, Preissteigerung möglich als Eingabe oder eigene Eingabe) und
- betriebsgebundene Kosten (Instandsetzungs-, Wartungs- und Betriebskosten)

berücksichtigt.

Für die kapitalgebundenen Kosten werden die ermittelten Investitionen herangezogen. Im Zuge der Aktualisierung von WP_{SOURCE}, werden die Investitionskosten auf den Kostenstand 2021 angehoben. Dies erfolgt auf

Basis neuer Investitionskostenrecherchen zu den Erzeugern als auch über eine Kostenerhöhung um 18% gegenüber 2018 (WP_{SOURCE} 1.0). Die Preisanpassung gegenüber 2018 erfolgt gemäß Baupreisindex des Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH auf der Grundlage des Preisindex für den Neubau von "Wohngebäude insgesamt" (Statistisches Bundesamt Deutschland).

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 wurden gegenüber WP_{SOURCE} 1.0 aktualisiert und orientieren sich am Jahr 2022. 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_{SOURCE} 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 78. Der Nutzer kann die Ergebnisse vollumfänglich ausdrucken.

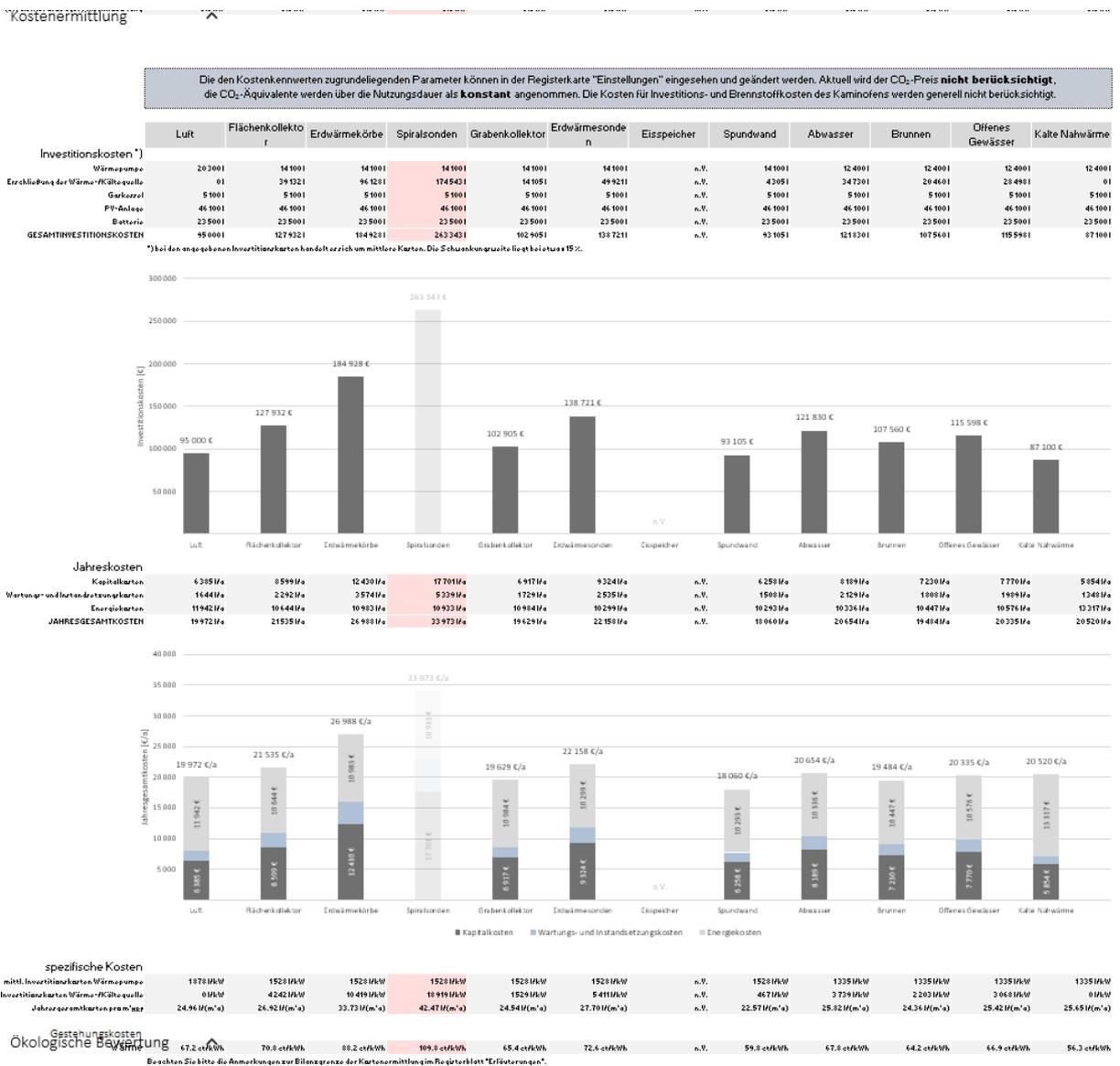


Abbildung 78 Beispiel der Ausgabe und Darstellung einer ökonomischen Bewertung im Programm WP_{SOURCE}

15 TRNSYS-Simulation

Wie schon im Vorläuferprojekt future:heatpump und bei der Entwicklung von WP_{SOURCE} 1, stellen numerische Simulationen mit TRNSYS auch im Projekt future:heatpump II und der Weiterentwicklung von WP_{SOURCE} zur Version WP_{SOURCE} 2.0 eine entscheidende Grundlage dar. In beiden Projekten wurde die Programmversion TRNSYS 17 und die gleiche Simulationsumgebung verwendet. Auch der Einsatzbereich und die Ziele der Simulationen sind in beiden Projekten im Wesentlichen identisch, wenn auch die nachfolgenden Punkte im Projekt future:heatpump II im Mittelpunkt standen.

- Ermittlung des thermischen Verhaltens von Niedertemperaturwärmequellen in Verbindung mit unterschiedlichen Niedertemperaturwärmeübertragern in Abhängigkeit des Heizsystems **und der Anlagengerieperie, wie z. B. Solarthermie und Photovoltaik** sowie in Bezug auf diverse Gebäudetypen und wärmedämmtechnische Gebäudestandards an beliebigen Standorten innerhalb Deutschlands (Klimaregionen, Erdreichparameter).
- Grundlagenerstellung für WP_{SOURCE} 2.0
- Sonderuntersuchungen zu diversen physikalischen Effekten
- Validierung von Berechnungen und Ergebnissen von WP_{SOURCE} 2.0

Das grundlegende Vorgehen bei der Durchführung der Simulationen sowie die Festlegung sämtlicher Randbedingungen und Rahmendaten unterscheidet sich nicht vom Vorgehen im Projekt future:heatpump. Details können dem Abschlussbericht zu future:heatpump entnommen werden [1].

15.1 Zusätzliche Niedertemperaturwärmequellen und –übertrager in WP_{SOURCE} 2.0

Grundsätzlich sollten die folgenden Niedertemperaturwärmequellen mit den jeweiligen Niedertemperaturwärmeübertragern zu den bereits in future:heatpump behandelten und in WP_{SOURCE} 1 implementierten NT-Quellen und Wärmeübertragern im Projekt future:heatpump_II ausgearbeitet und in WP_{SOURCE} 2.0 eingepflegt werden.

- Grabenkollektor
- Energiespundwand
- Eisspeicher mit Solar-Luft-Absorber
- direkte Gewässernutzung (offene Gewässer)
- Kalte Nahwärme

Die im Projekt bearbeiteten und zusätzlich in WP_{SOURCE} 2.0 implementierten Niedertemperaturwärmequellen und –übertrager sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

Tabelle 12 Zusätzliche Wärmeübertragersysteme in future:heatpump_II und WP_{SOURCE} 2.0

Wärmeübertragersystem	numerisches Rechenmodell
Grabenkollektor	Anwendung von Polysun statt TRNSYS
Energiespundwand	TRNSYS-Type in modifizierter Anwendung Voruntersuchung mit SHEMAT
Eisspeicher mit Solar-Luft-Absorber	beide Komponenten jeweils als TRNSYS-Type, verschiedene Autoren
Wärmeübertragersystem	Analytische Berechnung
direkte Gewässernutzung (offene Gewässer)	Analytische Berechnungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Geometrien und Betriebsweisen der Wärmeübertrager
Kalte Nahwärme	Berechnungen nach analytischen und empirischen Korrelationen

15.1.1 Grabenkollektor

Zur Modellierung von Grabenkollektoren wurde das in Polysun der Firma Vela Solaris hinterlegte Modell des Grabenkollektors von GeoCollect angewendet.

Das Modell in Polysun basiert auf validen Messwerten, die als Grundlagen zur Simulationen von GeoCollect-Anlagen basieren. Zudem wurden zum Abgleich der Auslegungsrechner GeoCollect herangezogen. Mit Polysun lässt sich das Verhalten der Gebäudetechnik über individuell wählbare Zeiträume simulieren.

15.1.2 Energiespundwand

Die Modellierung von Energiespundwänden beruht auf einem angepassten TRNSYS-Type. Die Einbaumöglichkeiten von Spundwänden sind vielfältig. Generell kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Spundwände entweder beidseitig an Erdreich oder ähnliche Medien oder mit einer Seite an Erdreich und mit der anderen Seite an Wasser reichen. Um die thermodynamischen Effekte dieser Einbauvarianten zu modellieren, wurden auf der Grundlage eines TRNSYS-Modells zur Simulation senkrecht in das Erdreich eingebauter Wärmeübertrager, zwei geometrisch identische aber in Bezug auf die Wärmeübergänge zwischen angrenzendem Medien und der Spundwand verschiedene numerische Modelle entwickelt.

Das eine modelliert das thermodynamische Verhalten einer beidseitig gegen Erdreich installierten Spundwand (allein geothermische Nutzung des Untergrundes), das andere eine einseitig an Erdreich und einseitig an Wasser grenzende Spundwand (geothermische und hydrothermalen Nutzung des umgebenden Erdreichs sowie des angrenzenden Wassers). Zur Validierung der Modelle wurde ein Lastgang entwickelt, der alle anzunehmenden Betriebszustände einer Spundwand umfasst und so das thermische Verhalten einer Spundwand über den gesamten Einsatzbereich identifizieren lässt. Dieser Lastgang wurde den entwickelten Modelle und einem validierten Spundwandmodell in der Simulationsumgebung SHEMAT (**S**imulator for **HE**at and **MA**ss **T**ransport) aufgeprägt. Auf der Grundlage des gemeinsamen Lastgangs wurden die TRNSYS-Modelle der Energiespundwand durch Austausch von Parametern und Simulationsergebnissen sowie anhand der Ergebnisse von SHEMAT Referenzsimulationen kalibriert⁹.

15.1.3 Eisspeicher mit Solar-Luft-Absorber

Bei der Modellierung der Kombination aus Eisspeicher und Solar-Luft-Absorber wurde der Solar-Luft-Absorber den meisten praktischen Anwendungsfällen entsprechend derart in die Hydraulik des Heiz- und optional Kühlsystems eingebunden, dass dieser als Niedertemperaturwärmequelle (Heizbetrieb) direkt zur Raumheizung dienen kann,

- direkt (ohne Zwischenschaltung des Eisspeichers) der Wärmepumpe als Niedertemperaturwärmequelle dienen kann oder
- den Eisspeicher regenerieren, d. h. Eis schmelzen und die flüssige Phase erwärmen kann.

Oder als Wärmesenke (Kühlbetrieb)

- für eine *Freie Kühlung* (zur Raumkühlung werden wärmeabführende Bauteile direkt vom Solar-Luft-Absorber gekühlt) genutzt werden kann,
- den Eisspeicher entwärmen, d. h. beispielsweise in den Sommermonaten zu Nachtzeiten das infolge Raumkühlung tagsüber erwärmte Speicherwasser zurückkühlen kann.

Für die Referenzsimulationen wurde ein nach Süden ausgerichteter und mit einem Neigungswinkel von 45° installierter typischer Solar-Luft-Absorber mittlerer Güte angesetzt.

⁹ Das in der Simulationsumgebung SHEMAT umgesetzte Spundwandmodell wurde unter Beteiligung des Instituts für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen und der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH, Lütticherstr. 32 in 52064 Aachen in einem Projekt zur Erdwärmenutzung aus erdberührenden flächigen Bauteilen entwickelt und validiert. Die zur Kalibrierung der TRNSYS-Modelle verwendeten SHEMAT-Simulationen wurden von der Geophysica Beratungsgesellschaft durchgeführt.

Der Praxis folgend beträgt der Füllgrad des Eisspeichers 85 % des Volumens des Eisspeicherbehälters. Das Verhältnis von Absorberfläche zum im Speicher befindlichen Wasservolumen beträgt konstant $1 \text{ m}^2 : 1 \text{ m}^3$. Bezogen auf das Gesamtvolumen des Eisspeicherbehälters ergeben sich damit $1,1765 \text{ m}^2$ Absorberfläche je Kubikmeter Eisspeichervolumen.

15.1.4 Direkte Gewässernutzung (offene Gewässer)

Eine direkte Nutzung von offenen Gewässern wurde dem Ansatz für Brunnen und Abwasser folgend (siehe Abschlussbericht zu future:heatpump [1]) mittels analytischer und empirischer Korrelationen in WP_{SOURCE} 2.0 implementiert.

15.1.5 Kaltes Nahwärmenetz

Die Nutzung sog. Kalter Nahwärmenetze gleicht prinzipiell der Nutzung offener Gewässer, der von Brunnen und der von Abwasser. Diesem Ansatz folgend wurde das Kalte Nahwärmenetz anhand von analytischen und empirischen Korrelationen in WP_{SOURCE} 2.0 implementiert (siehe auch Abschlussbericht zu future:heatpump [1]).

15.2 Validitätskriterien der Niedertemperaturwärmequellen und –wärmeübertrager

Um aus dem Zusammenwirken der Betriebszustände der jeweiligen Niedertemperaturwärmequelle, der thermischen Last durch die Gebäudebeheizung und der Trinkwassererwärmung sowie auch mit Blick auf ökologische und ökonomische Aspekte eine empfehlenswerte Dimensionierung für die einzelnen Wärmeübertragungssysteme ableiten zu können, wurden für die Niedertemperaturwärmequellen Kriterien für einen *bestimmungsgemäßen Betrieb* definiert. Diese Kriterien sind im Allgemeinen Nutzungsgrenzen der NT-Wärmequellen in Bezug auf Ein- oder Austrittstemperaturen in bzw. aus der Quelle. Werden diese Temperaturgrenzen nicht eingehalten, muss die NT-Quelle und damit der Niedertemperaturwärmeübertrager in den meisten Fällen vergrößert oder die Komponentenzahl erhöht werden. Ziel ist in jedem Fall – unter Einhaltung der bestimmungsgemäßen Betriebsbedingungen – mit möglichst wenig Wärmeübertragern und/oder geringstem Flächenaufwand bzw. kleinstmöglichem Eisspeichervolumen und Fläche an Solar-Luft-Absorber den geforderten Energiebedarf zu decken.

Um Dimensionierungsregeln und Korrelationen zwischen den einzelnen Wärmeübertragungssystemen in Kombination mit der Art und Beschaffenheit der Niedertemperaturwärmequellen und Heiztemperaturniveaus für diverse Gebäude(typen) sowie vorhandenen Wärmebedarfen zur Trinkwassererwärmung ableiten zu können, wurden für jede Wärmequelle/Wärmeübertrager-Kombination Validitätskriterien definiert. Die sich aus diesen Kriterien für die einzelnen Wärmequellen und -übertrager, Standorte, Gebäude sowie Anlagenkonfigurationen ergebende Dimension für die Wärmequelle und Dimensionierungen für die Wärmeübertrager sind wesentliche Grundlagen für das Programm WP_{SOURCE} 2.0.

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

Grabenkollektoren

Der Bemessung von Grabenkollektoren liegt das folgende Auslegungskriterium zugrunde:

- Kriterium: Die Eintrittstemperatur in den Grabenkollektor darf -5.0 °C nicht unterschreiten

Wird dieses Kriterium nicht eingehalten, erfolgt die Erhöhung der Anzahl der Absorbermodule des Grabenkollektors. Die Absorbermodule werden in Kreisen von jeweils 10 Modulen je Kreis angeordnet.

Energiespundwände

Zur Bemessung von Energiespundwänden gilt folgendes Auslegungskriterium:

- Kriterium: Die minimale Austrittstemperatur aus einer Spundwand oder der seriellen Verschaltung mehrerer Spundwandelemente darf -5.0 °C nicht unterschreiten.

Wird dieses Kriterium nicht eingehalten, erfolgt eine Erhöhung der Anzahl der Spundwandelemente.

Eisspeicher mit Solar-Luft-Absorber

Für die Kombination Eisspeicher mit Solar-Luft-Absorber wurden wesentlichen Auslegungskriterien für einen bestimmungsgemäßen Betrieb mittels Vorabsimulationen und einer Literaturrecherche bestimmt. Entgegen den zulässigen Betriebsbedingungen für erdgebundene NT-Wärmequellen und -übertrager, bei denen z. B. Eisbildung durch den Wärmeentzug verhindert werden muss, liegen der Bemessung einer Kombination aus Eisspeicher und Solar-Luft-Absorber andere Kriterien zugrunde. In den meisten Fällen wird die Kombination Eisspeicher und Solar-Luft-Absorber für den Heizbetrieb optimiert.

- Kriterium 1: Der maximale Vereisungsgrad des Speicherwassers beträgt 85 %.
- Kriterium 2: Die maximal erlaubte Speichertemperatur beträgt 30 °C . (Wichtige für den Kühlbetrieb)

Werden diese Kriterien nicht eingehalten, erfolgt eine Vergrößerung des Solar-Luft-Absorbers in Schritten von jeweils 5 m^2 . Das Volumen des Eisspeichers wird im gleichen Schritt entsprechend dem oben erläuterten Verhältnis der Absorberfläche zum Wasservolumen des Speichers (1 m^2 zu 1 m^3) angepasst.

Direkte Gewässernutzung (offenes Gewässer)

- Kriterium: Einhaltung der maximal zulässigen Abkühlung des Gewässers sowie im Kühlbetrieb Einhaltung der maximal zulässigen Erwärmung des Gewässers.
Hinweis: die maximal zulässige Abkühlung oder Erwärmung eines Gewässers infolge Wärmeentzug bzw. Wärmeeintrag durch eine Wärmepumpe ist bei der zuständigen Einrichtung/Behörde zu erfragen.

Kann die für einen bestimmungsgemäßen Betrieb der Wärmepumpe benötigte Energie dem offenen Gewässer im zugelassenen Temperaturbereich nicht entzogen werden oder im Fall des Kühlbetrieb im zugelassenen Temperaturbereich nicht zugeführt werden – das Gewässer würde zu stark erwärmt – kann das Konzept in der geplanten Form nicht verwirklicht werden.

Kalte Nahwärme

- Kriterium 1, Heizbetrieb: maximal zulässige Absenkung der Medientemperatur der Kalten Nahwärme
- Kriterium 2, Kühlbetrieb: maximal zulässige Erhöhung der Medientemperatur der Kalten Nahwärme

Hinweis: die maximal zulässige Absenkung der Medientemperatur der Kalten Nahwärme sowie die maximal zulässige Erhöhung der Medientemperatur können in den meisten Fällen beim Netzbetreiber erfragt werden.

Kann die für einen bestimmungsgemäßen Betrieb der Wärmepumpe benötigte Energie dem Medium der Kalten Nahwärme im zugelassenen Temperaturbereich nicht entzogen werden oder im Fall des Kühlbetrieb im zugelassenen Temperaturbereich nicht zugeführt werden, kann das Konzept in der geplanten Form nicht realisiert werden.

16 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem zunehmenden Einsatz von Wärmepumpen ist auch die Zahl der verschiedenen Niedertemperaturwärmeübertragungssysteme gestiegen, mit denen verschiedene Wärmequellen genutzt werden können und bei denen sich unterschiedliche Anwendungs- und Optimierungsmöglichkeiten bieten.

Bereits bei der Auswahl der Niedertemperaturwärmequelle stehen dagegen nicht immer hinreichende Informationen oder eindeutige Kriterien zur Verfügung. Hinzu kommen innovative Produkte wie etwa Eisspeicher, Grabenkollektor oder aktivierte Spundwände, die für viele Planer zunächst unbekannt sind und bezüglich deren Leistungsfähigkeit oder Kosten-Nutzen-Verhältnis nur wenig fundierte Kenntnisse vorliegen.

Dies zeigt sich auch in den grundsätzlich immer gleichen Fragen von Bauherren und Planern:

- Welche Grundlagen und Randbedingungen müssen beachtet werden?
- Gibt es signifikante Unterschiede zwischen den grundsätzlich geeigneten Wärmeübertragern und deren Effizienz beziehungsweise Kosten?
- Welche ist die richtige Wärmequelle für meine Wärmepumpe?
- Wo erhalte ich eine produktneutrale und übersichtliche Gegenüberstellung der in meinem Fall möglichen Wärmepumpensysteme und ihrer Komponenten?

Ein weiteres Entscheidungskriterium stellen die Kosten dar. Die Jahresgesamtkosten werden neben den Investitionskosten vor allem durch die Energiekosten bestimmt, die sich sowohl aus der Effizienz des Wärmepumpensystems, aber auch aus dem Zusammenspiel mit Photovoltaik-/ Solarthermieanlage oder weiteren Erzeugern und Speichern ergeben. Um dies realistisch abbilden zu können, wären für den Vergleich aller Möglichkeiten in einem konkreten Anwendungsfall eine Vielzahl an Berechnungen notwendig, deren Durchführung jedoch häufig in keinem Verhältnis zum eigentlichen Nutzen – also lediglich dem ersten Vergleich verschiedener Systeme – stünde.

Das Ziel des Vordimensionierungsprogramms WP_{SOURCE} ist infolgedessen die Leistungsfähigkeit und Unterschiede von Wärmepumpen in Kombination mit unterschiedlichen Wärmeübertragungssystemen und Niedertemperaturwärmequellen systematisch zu betrachten und energetisch wie wirtschaftlich bewerten zu können. Die Ergebnisse werden auf den konkreten Anwendungsfall übertragen, sodass zusammen mit hinterlegten Kostenkennwerten die geeignetsten Systeme identifiziert werden können. Durch eine strukturierte Eingabe und eine übersichtliche Auflistung der Ergebnisse wird Bauherren und Planern so eine Möglichkeit geboten, die derzeit immer wieder auftretenden Fragen fundiert zu beantworten.

Während in WP_{SOURCE} 1.0 die Effizienz des Wärmepumpensystems als solches betrachtet wurde, werden in der Erweiterung und Ergänzung (Version 2.0) auch die Wechselwirkung mit Photovoltaiksystemen sowie mit Batterie und/oder Solarthermieanlagen untersucht. Auch der Einfluss bereits vorhandener oder zusätzlich geplanter Wärmeerzeuger auf Ökologie und Ökonomie sowie die Nutzung der Wärmepumpe als Kälteerzeuger für Bürogebäude kann abgebildet werden. Als weiteren Punkt werden die Systemkomponenten durch die sich zunehmend durchsetzenden Inverter-Wärmepumpen sowie Eisspeicher, Grabenkollektoren und Spundwände erweitert. In future:heatpump_II werden im Wesentlichen Themen und Schwerpunkte behandelt, die zum einen die Anwendung und den Ausbau von Wärmepumpenanlagen unterstützen und zum anderen der erweiterten Nutzung des Programms WP_{SOURCE} dienlich sind.

Das Projekt ist so aufgebaut, dass zu Beginn eine Recherche und Vorarbeit zum Betrachtungsschwerpunkt erfolgt. Dem schließt sich eine Konfiguration bzw. Modellerstellung für die Simulation bzw. Analyse an. Die Ergebnisse der Betrachtungsschwerpunkte werden als Erweiterung / Ergänzung in das Vordimensionierungsprogramm eingepflegt. Die Betrachtung von Siedlungen und Quartiere als auch die Erweiterung auf weitere Klimazonen finden Anwendung. Projektübergreifend wird ein Low-Level Monitoring umgesetzt, das die in der Theorie erarbeiteten Ergebnisse mit umgesetzten Konzepten gegenüberstellen soll.

16.1 Ergebnisse und Auswertungen der Themenschwerpunkte

16.1.1 Wärmepumpentechnologie

Im Rahmen der Forschungsarbeit und der Technologierecherche wurden neben elektrischen Kompressionswärmepumpen auch auf dem Markt verfügbare gasbetriebene Wärmepumpen und unterschiedliche Bauarten von Sorptionswärmepumpen (thermisch verdichtenden Absorptions- und Adsorptionswärmepumpen) betrachtet. Die Anwendung in der Praxis fokussiert sich jedoch primär auf elektrische Wärmepumpen. Gasbetriebene Wärmepumpen haben am Markt derzeit keine große Bedeutung, können aber eine sinnvolle Lösung, z. B. für Bestandsgebäude mit vorhandenem Gasanschluss, darstellen.

Gasbetriebene Wärmepumpen verbinden hocheffiziente Gasbrennwerttechnik mit der Nutzung von Umweltwärme. Die Sorptionstechnik wird weiterhin vorrangig bei der Kälteerzeugung angewendet. Aus diesem Grund ist sie in der Praxis meist in Kältemaschinen anzutreffen. Da im Bereich Sorptionstechnik vergleichsweise hohe Temperaturen als Antriebsenergie benötigt werden, sind Niedertemperaturwärmequellen, die üblicherweise von Wärmepumpen genutzt werden, für diese Technologie kaum geeignet.

Ein Vergleich der genannten Wärmepumpentechnologien zeigt, dass sich die Betriebsweisen und der Aufbau der einzelnen Geräte zum Teil nur geringfügig voneinander unterscheiden. Alle Technologien können zur Raumheizung und zur Trinkwassererwärmung sowie, im reversiblen Betrieb, auch zur Kühlung eingesetzt werden. Der grundlegende Unterschied zwischen elektrischen Wärmepumpen und Gasmotorwärmepumpen ist die Antriebsart des Verdichters. Der thermodynamische Kreisprozess ist bei beiden Bauarten identisch, Unterschiede bestehen in der Art der Verdichtung des Arbeitsmittels. Zudem wird, im Vergleich zum elektrischen Antrieb, die durch den Betrieb des Gasmotors entstehende Wärme ebenfalls zum Heizen –also als Nutzwärme– verwendet. Neben der mechanischen Verdichtung gibt es die sogenannte „thermische Verdichtung“. Im Ab- als auch Adsorptionsprozess finden unter Abgabe von Wärme statt, die zum Heizen genutzt werden kann.

Hinsichtlich der Nutzbarkeit unterschiedlicher Niedertemperaturwärmequellen durch die beschriebenen Wärmepumpentechnologien zeigt sich, dass prinzipiell, analog zu den elektrischen Wärmepumpen, alle Wärmequellen –also z. B. Luft, Sole und Wasser– auch für gasbetriebene Wärmepumpen zur Anwendung kommen können.

Bei der Dimensionierung und Planung eines Wärmeübertragersystems tritt ein Vorteil der gasbetriebenen Wärmepumpen oft deutlich hervor: Bei dieser Technologie kann die Verbrennungswärme zusätzlich genutzt werden. Damit wird die Niedertemperaturwärmequelle weniger belastet, d. h. ihr wird weniger Energie entzogen. Aus diesem Grund kann ein Wärmeübertragersystem zur Nutzung von Umweltwärme in Verbindung mit einer gasbetriebenen Wärmepumpe im Vergleich zu einer Kopplung mit einer elektrischen Wärmepumpe im Allgemeinen kleiner dimensioniert werden.

Aufgrund der Marktsituation und der bisher umgesetzten Konzepte mit unterschiedlichen Wärmepumpentechnologien wurde und wird bei der Erweiterung von WP_{SOURCE} auf die elektrisch betriebenen Wärmepumpen fokussiert. Neben den ON-OFF-Geräten werden als Ergänzung Geräte mit sog. Invertertechnologie in das Programm aufgenommen.

16.1.2 Bivalenter Betrieb

Ein bivalenter Betrieb könnte eine Möglichkeit zur Auflösung des Modernisierungstaus im Bestand darstellen. Sie erleichtern dem Anlagenbetreiber die Entscheidungsfindung für künftigen Energieträger zur Beheizung des Gebäudes. Bivalente Systeme können oft kostengünstig durch die Erweiterung bestehender Heizungsanlagen errichtet werden. Auch im Neubau, insbesondere bei hohen Heizlasten und unterschiedlichen Temperaturanforderungen, sind bivalente Wärmepumpensysteme wirtschaftlich interessant.

Der bivalente Betrieb eines Wärmepumpensystems kann notwendig sein, wenn

- die Wärmepumpe die geforderte Temperatur und / oder Heizleistung für Raumheizung / Trinkwarmwasser nicht ganzjährig oder nur sehr ineffizient zur Verfügung stellen kann.
- der Platzbedarf für die Niedertemperaturwärmequelle nicht ausreicht und somit die minimal zulässige Wärmequellentemperatur unterschritten werden würde.

- bei der Überbrückung im Zuge einer energetischen Sanierung und dem Austausch der Erzeuger die Heizlast nicht vollständig über die Wärmepumpe gedeckt werden kann.
- eine erhöhte Versorgungssicherheit gefordert wird.

Der in WP_{SOURCE} integrierte bivalente Betrieb beruht auf einem bivalent parallelen Betrieb der Wärmepumpe, mit einem weiteren Wärmeerzeuger, z. B. einem Heizstab, einem Gasbrennwertgerät, Fernwärme oder einem Festbrennstoffkessel sowie der Deckung des Wärmebedarfs durch den 2. Wärmeerzeuger von nicht mehr als 50 %. Die Wärmepumpe soll weiterhin den Hauptwärmeerzeuger darstellen.

16.1.3 Photovoltaik

Im Rahmen des Forschungsprojektes wird die Nutzung von elektrischer Energie aus einer zu der jeweiligen Liegenschaft gehörenden PV-Anlage in WP_{SOURCE} eingebunden. Die in diesem Zusammenhang zu diskutierende Eigenstromnutzung bedeutet eine teilweise Deckung des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe durch die Photovoltaikanlage und damit eine reduzierte Verwendung von PV-Strom im Haushalt (z. B. für Licht, Haushaltsgeräte und IT). Neben der Eigenstromnutzung wird die verbleibende Einspeisung in das öffentliche Netz quantifiziert und der Einfluss einer Einbindung von elektrischen Energiespeichern abgeschätzt.

Bei der Integration von Photovoltaik in Energieversorgungskonzepte von Wohngebäuden mit Wärmepumpen können bei einem Verhältnis von PV-Ertrag zu Jahresgesamtstrombedarf (Wärmepumpe und Haushalt) von 1 MWh zu 1 MWh bereits über 30 % des produzierten Stroms selber genutzt sowie 30 % des Gesamtstrombedarfs gedeckt werden. Bei gleichem Verhältnis zwischen PV-Ertrag und Jahresgesamtstrombedarf und zusätzlicher Integration eines Stromspeichers mit einer nutzbaren Speicherkapazität von 1 kWh pro MWh Strombedarf kann der Eigennutzungsanteil auf etwa 60 % verdoppelt und der PV-Deckungsanteil auf etwa 50 % erhöht werden.

Die ausgewählten und betrachteten Systemvarianten im Projekt zur Eigenstromsteigerung beruhen auf einer thermischen sowie elektrischen Speicherung der eigenproduzierten Stromerträge, entsprechende Regelstrategien können untereinander kombiniert werden. Die Simulationsergebnisse an einem Beispielgebäude zeigen, dass durch den Einsatz der verschiedenen Komponenten (Batterie, Pufferspeicher, etc.) der PV-Eigennutzungsanteil von 27 % (Basis ohne Regelung) auf über 55 % und der PV-Deckungsanteil von 34 % (Basis ohne Regelung) auf über 60 % gesteigert werden kann. Des Weiteren kann der Stromanteil aus Netzbezug bei Einbindung und Umsetzung der Varianten um bis zu 40 % gesenkt werden. Durch die Maßnahmen steigt der Strombedarf jedoch um bis zu 4,5 % an, beruhend auf der erhöhten Laufzeit der Wärmepumpe sowie der höheren Vorlauftemperatur.

Trotz deutlicher Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs durch thermische und elektrische Speicher, ist eine Vergrößerung der Komponenten zur Erreichung eines höheren Eigenverbrauchs bei den aktuellen Marktbedingungen kaum rentabel. Thermische Speicher sind derzeit wirtschaftlicher als elektrische Batterien. Als Schlussfolgerung ist die Nutzung vorhandener Speicherpotentiale von Warmwasser- und Heizungspufferspeichern sowie der Gebäudemasse durch intelligente Regelungsstrategien derzeit am wirtschaftlichsten.

Die in WP_{SOURCE} zu integrierenden Korrelationen zur Abschätzung der PV-Eigennutzungs- und Deckungsanteile bei Konzepten mit PV-Anlagen (mit und ohne elektrischem Energiespeicher) beruhen auf Berechnungen der PV-Stromproduktion, der Eingabe bzw. Definition des Haushaltsstroms und der Ermittlung des Stromverbrauchs durch eine Wärmepumpe. Bedarfsprofile liegen viertelstündlich vor, sodass sich der Eigennutzungsanteil des PV-Stroms durch Bilanzierung hinreichend genau abschätzen lässt.

16.1.4 Regeneration

Die betrachteten Systemkonfigurationen zur Regeneration erdgekoppelter Systeme beruhen darauf, dass eine Solaranlage in den Primärkreis (Niedertemperaturwärmekreis) einer Wärmepumpe bzw. parallel hierzu eingebunden ist. Da das durch eine Wärmepumpe abgesenkte Temperaturniveau des Primärkreises deutlich

unterhalb üblicher Anwendungen von Solarthermie liegt (z. B. Trinkwassererwärmung, Raumheizung, Schwimmbaderwärmung), kann zur Verfügung stehende solare Energie im Vergleich zu den meisten anderen Anwendungen wesentlich länger und effektiver genutzt werden.

Eine Regeneration bzw. Kopplung geothermischer Wärmeübertrager (Flächenkollektor und Erdwärmesonden) mit thermischer Solarenergie kann zu einer Reduzierung der Kollektorfläche bzw. Erdwärmesondenlänge führen. Zudem kann eine Anhebung der Temperaturen im Erdreich erzielt und somit die Jahresarbeitszahl erhöht werden. Eine Kopplung mit thermischer Solarenergie hat einen signifikant positiven Einfluss auf unterdimensionierte Systeme. Über eine Regeneration können ausgeglichener Energie- und Temperaturbilanzen sowie teilweise eine Kompensation der saisonalen Verschiebungen zwischen Wärmeangebot aus der Umwelt und Wärmebedarf erzielt werden. In anderen Fällen steht der Effizienzgewinn in keinem wirtschaftlichen Verhältnis zum erforderlichen Aufwand für die Nutzung thermischer Solarenergie zur Regeneration geothermischer Wärmeübertrager.

16.1.5 Solarthermie

Neben der Regeneration erdgekoppelter Systeme wird auch eine direkte Nutzung von thermischer Solarenergie zur ausschließlichen Unterstützung der Trinkwassererwärmung als auch zur Erwärmung des Trinkwassers sowie der Unterstützung der Raumheizung (Kombianlagen) betrachtet und in WP_{SOURCE} implementiert.

Zur Validierung der implementierten Methodik in WP_{SOURCE} sowie zur Ableitung von Dimensionierungsregeln wurden Recherchen und Vorstudien sowohl für Anlagen zur Trinkwarmwasserbereitung als auch zur zusätzlichen Heizungsunterstützung mit den Schwerpunkten Einfluss der nutzbaren Kollektorfläche (Apertur) und des Speichervolumens des Trinkwasserspeichers / Kombispeichers, günstiges Verhältnis der Speichervolumen zu den nutzbaren Kollektorflächen sowie Einfluss meteorologischer Bedingungen als auch die erzielbaren Deckungsanteile an der benötigten Energie zur Trinkwassererwärmung / und Raumheizung durchgeführt:

In WP_{SOURCE} lässt sich der nutzbare Energieertrag durch die Solarthermieanlage berechnen sowie der Anteil am Wärmebedarf für Trinkwarmwasser und / oder Raumwärme ermitteln, so dass die Wärmepumpe einen geringeren Beitrag zu leisten hat.

Festzustellen ist, dass in modernen Gebäuden das Trinkwarmwasser immer mehr den größten Wärmebedarf mit dem höchsten und damit für eine Wärmepumpe auf einem ungünstigen Temperaturniveau darstellt. Bei solarer Unterstützung der Trinkwassererwärmung können abhängig vom Standort max. 70 % bis 80 % des Wärmebedarfs für Trinkwarmwasser durch eine thermische Solaranlage bereitgestellt werden.

Mit einer solaren Unterstützung der Trinkwassererwärmung und Raumheizung kann für „übliche“ Einfamilienhäuser bis zu 50 % des Gesamtwärmebedarfs bereitgestellt werden. Dies entspricht bis zu 80 % des Wärmebedarfs zur Trinkwarmwasserbereitung.

16.1.6 Kühlung

Für die Kühlung von Bürogebäuden mittels einer reversiblen Wärmepumpe sollen in WP_{SOURCE} neben der Luft, die Erdwärmesonde, der Eisspeicher mit Solar-Luftabsorber und Brunnen sowie offenes Gewässer und kalte Nahwärmenetze als Niedertemperaturwärmeübertrager zur Verfügung stehen.

Im Rahmen der Implementierung und Umsetzung der Kühlung im Vordimensionierungsprogramm WP_{SOURCE} wurden Recherchen und erste Vorstudien durchgeführt. Eine ggf. vorhandene Serverkühlung wird bei der durch eine Wärmepumpe zu deckenden Kühllast nicht berücksichtigt. Es wurde festgestellt, dass im Kühlfall nicht, analog zum Heizfall, auf konkrete Kühlbedarfe zurückgegriffen werden kann, sondern Kühlbedarfsbereiche definiert werden müssen. Hintergrund u.a. ist die gegenwärtige Architektur mit den unterschiedlichen Glasanteile in den Fassaden und der daraus resultierenden Beeinflussung der Kühllasten.

Diese vier gewählten Kühlbedarfsbereiche werden für die Ermittlung von Kühllastprofilen und zur Dimensionierung der Wärmeübertragungssysteme herangezogen. Die Kühllastprofile werden für die unterschiedlichen Kühlbedarfsbereiche und Standorte (Referenzklimata) durch Simulationen in TRNSYS ermittelt. Die beiden

Kältebereitstellungsmodi a) freie Kühlung und b) aktive Kühlung werden durch Kühllastprofile mit entsprechenden Temperaturniveaus berücksichtigt.

16.1.7 Nahwärmeversorgung – Siedlungen und Quartiere

Eine Nahwärmeversorgung bietet die Möglichkeit zur nachhaltigen und wirtschaftlichen Wärmeversorgung mit einer hohen Flexibilität und Erweiterbarkeit.

Im Sinn einer zukunftsorientierten Energieversorgung sollten die Implementierungsmöglichkeiten unterschiedlicher Wärmepumpen und Umweltwärmequellen in Nahwärmenetzen untersucht werden und wo möglich auch bei Quartierslösungen Anwendung finden. Wärmepumpen können die benötigte Wärme im Vergleich zu fossilen Wärmeerzeugern mit geringeren Primärenergieanteilen bereitstellen und verfügen, richtig dimensioniert, über hohe Effizienz und CO₂-Einsparungspotentiale. In Verbindung mit Wärmespeichern und angepassten Nahwärmenetzen bieten sie Möglichkeiten einer räumlichen und zeitlichen Abstimmung von Wärmeerzeugung und -nachfrage. Auf diese Weise können wirtschaftlich und technisch optimierte Wärmeversorgungssysteme realisiert werden.

Aus den im Projekt erarbeiteten Grundlagen und betrachteten Beispielnetzen lassen sich unterschiedliche Szenarien für eine zukunftsorientierte Nahwärmeversorgung von Quartieren auf der Basis von Wärmepumpen ableiten. Die Konzepte unterscheiden sich in den Netztemperaturen, Betriebsweisen und nutzbaren Niedertemperaturwärmequellen sowie in den Anwendungsfeldern. Dabei werden die erarbeiteten Nahwärmenetze in drei Kategorien unterteilt - Konventionelles Nahwärmenetz mit zentraler Wärmepumpe, kaltes Nahwärmenetz und Mischnetz.

Das *konventionelle Nahwärmenetz* findet in Gebiete mit Gebäuden die hohe Vorlauftemperaturen voraussetzen (bislang gebäudeinterne und brennstoffbasierte Wärmeerzeugung) sowie in Bestandsquartiere mit konventionellen Heizungssystemen, die in der Regel hohe Wärmebedarfsdichten aufweisen, Anwendung. Die Gebiete sind größtenteils Wohn- und Mischgebiete mit Mehrfamilienhäusern und Gewerbeimmobilien. Aufgrund der niedrigeren Wärmebedarfsdichte sind Versorgungsgebiete mit reiner Einfamilienhausbebauung (insbesondere Neubauten) jedoch weniger geeignet.

In Verbindung mit einer Umweltwärmequelle stellt eine zentrale Wärmepumpe, meist in Kombination mit einem weiteren Wärmeerzeuger, Vorlauftemperaturen zwischen 60 °C und 85 °C zur Verfügung. Das Temperaturniveau des Nahwärmenetzes reicht in der Regel für die Raumheizung und die Trinkwassererwärmung aus. Je nach Wärmeentzug liegt die Rücklauftemperatur zwischen 50 °C und 35 °C.

Wärmequellen für diesen Versorgungstyp können z. B. Erdwärmesonden, Grundwasser sowie solarthermisch gespeiste Langzeitwärmespeicher darstellen. Bietet das Versorgungsgebiet die notwendige Infrastruktur, kann zusätzlich Abwasser als Wärmequelle nutzbar gemacht werden.

Der Vorteil beim *kalten Nahwärmenetz mit dezentralen Wärmepumpen* besteht nicht unbedingt im Wärmepreis, sondern in der Einbindung der Netze in zu versorgende Gebiete, die sich z. B. durch niedrige Wärmebezugsdichten, unsichere Bedarfsstrukturen und mögliche Erweiterungen auszeichnen. Neubaugebiete mit Wohnbebauung eignen sich besonders für kalte Nahwärmenetze. Kalte Nahwärmenetze sind insbesondere vor dem Hintergrund interessant, dass Wärmeverbräuche von Häuser im Zuge von Gebäudesanierungen sinken und infolge dessen die Wärmebedarfsdichten abnehmen. Um einen wirtschaftlichen Betrieb der Verteilnetze zu gewährleisten, kann in Neubaugebieten ein Anschlusszwang an eine kalte Nahwärme sinnvoll sein.

Mit Sole als Wärmeträger stellen die Netze üblicherweise Temperaturen im Bereich von 5 °C bis etwa 20 °C bereit. Aufgrund der geringen Wärmeverluste und ggf. sogar Wärmegewinnen aus der Umgebung, lässt sich kalte Nahwärme auch bei geringen Wärmebedarfen effizient betreiben. Im eigentlichen Netz wird kein zusätzlicher Wärmeerzeuger integriert. Die Wärmepumpen sind in den Gebäuden verbaut und beziehen ihre Wärme aus dem Netz. Bei der Verwendung von Ökostrom für die Wärmepumpe(n) und natürlichen Wärmequellen für die kalte Nahwärme kann der Betrieb der Wärmeversorgung prinzipiell CO₂-neutral erfolgen.

In diesem Zusammenhang gängige Wärmequellen sind vor allem Erdwärmesonden und Agrothermiekollektoren sowie Langzeitwärmespeicher wie Eisspeicher oder Erdspeicher, die über Solarthermie gespeist werden.

Beim *Mischnetz* handelt es sich um die Umstellung eines bestehenden (konventionellen) Nahwärmenetzes auf ein Netz mit zentralen und dezentralen Wärmepumpen. Die Heizwärmebereitstellung und Trinkwassererwärmung erfolgt zusätzlich mithilfe dezentraler Wärmepumpen in den angeschlossenen Gebäuden. Während die dezentralen Wärmepumpen betrieben werden, wird die Heizzentrale mit dem zentralen Wärmeerzeuger abgeschaltet. Da vorhandene Nahwärmetrassen genutzt werden, sind für die Umstellung auf ein Mischnetz üblicherweise keine Arbeiten an den Nahwärmeleitungen notwendig. Mischnetze bieten den Vorteil, Wärme auf bedarfsorientierten Temperaturniveaus bereit zu stellen. In den Wintermonaten werden die Netze als konventionelle Nahwärmenetze mit zentraler Wärmeerzeugung und Netzvorlauftemperaturen im Bereich von etwa 70 °C bis 80 °C betrieben. Als Wärmeerzeuger dient z. B. ein BHKW zusammen mit einer zentralen Wärmepumpe. Werden keine hohen Vorlauftemperaturen mehr benötigt (Übergangszeiten und Sommermonate), erfolgt eine Reduzierung der Netzvorlauftemperatur auf etwa 20 °C bis 40 °C. In diesen Zeiten benötigte Wärme für Raumheizung und Trinkwassererwärmung wird dezentral, mittels Wärmepumpen in den Gebäuden bereitgestellt. Alle Wärmequellen, die auch für einen Wärmepumpenbetrieb in einem konventionellen Nahwärmenetz genutzt werden, können eingesetzt werden.

WP_{SOURCE} basiert auf Simulationen und Auslegungen von detaillierten Gebäudebeschreibungen für Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Bürogebäude. Die abgebildeten unterschiedlichen Baustandards mit unterschiedlichen Wärme- und Kältebedarfen können die vielseitigen Siedlungen und Quartiere und deren Baumassen mit der gebotenen Genauigkeit nicht als „Regelkonzepte“ oder „Referenzgebäude“ darstellen.

Fazit: WP_{SOURCE} ist ein Vordimensionierungsprogramm für Einzelgebäude. Die Anwendung auf Siedlungen und Quartiere ist in der vorliegenden Version nicht möglich.

16.1.8 Standorte

Im Rahmen des Forschungsprojektes soll untersucht werden, inwieweit eine Übertragbarkeit von WP_{SOURCE} auf europäische Standorte möglich und sinnvoll ist. Als Standorte in Europa wurden hierzu Stockholm, Zürich, Athen, Helsinki und Straßburg untersucht. Die Standorte werden u.a. hinsichtlich ihrer Wetterdaten, Erdreichparameter, Baustandards und -bestimmungen bewertet und mit den für Deutschland in WP_{SOURCE} implementierten Randbedingungen und Klimazonen verglichen.

Der Vergleich zeigt, dass das Zusammenwirken der klimatischen Bedingungen (Wetterdaten), länderspezifischer Baustandards und -bestimmungen sowie der Bautraditionen zu (zeitlichen) Heizlastverteilungen führt, die außerhalb des überprüften Gültigkeitsbereiches von WP_{SOURCE} liegen. Daraus ergibt sich auch, dass sich die Anlagentechnik (Peripherie der Wärmepumpe), die Wärmeverteilung im Gebäude sowie Nutzerbedürfnisse gegenüber den Annahmen in WP_{SOURCE} signifikant unterscheiden.

Das Fazit fällt daher dahingehend aus, dass WP_{SOURCE} nicht ohne Abwägung und Überprüfung der Randbedingungen auf andere (europäische) Standorte angewendet werden kann.

16.1.9 Monitoring

Anhand des Monitorings der bivalent betriebenen Wohn- und Nichtwohngebäude kann gezeigt werden, dass die Wärmepumpen in Verbindung mit ihren Niedertemperaturwärmequellen sowie das Gebäudeverhalten gut abgebildet werden kann. Die Kombination in der Wärmeerzeugung von Gasbrennwertkessel und Wärmepumpe erweist sich bei den betrachteten Gebäuden als zielführend. Dabei übernehmen die Wärmepumpen den größten Teil der Wärmebereitstellung und der Gaskessel läuft als Spitzenlastherzeuger.

Die untersuchte Anlagen weisen größtenteils die in der Planung definierten Verbrauchswerte auf. Ein höherer Verbrauch (Abweichungen von der Planung) oder Fehlbetriebe konnten sehr gut durch den 2. Wärmeerzeuger gedeckt bzw. abgefangen werden.

Dennoch ist auch hier wieder festzustellen, dass eine Einregulierungsphase und ein Monitoring erforderlich waren, um den planungsgemäßer Betrieb und den richtigen Betriebswechsel zwischen Wärmepumpe und 2. Wärmeerzeuger zu erreichen. Fehler oder Probleme lagen u.a. in der fehlerhaften Regelung. Die erfassten Unterschiede bei den Jahresarbeitszahlen beruhen größtenteils auf der jeweiligen Betriebsführung sowie auf einen nicht planungsgemäßen Betrieb, teilweise schon vor der Monitoringphase. Hinsichtlich der ökologischen Bewertung ist eine Kopplung von Wärmepumpe und einem zweiten Wärmeerzeuger sinnvoll. Der Anteil der Wärmepumpe stellt die erneuerbare Energie im Versorgungskonzept dar und erhöht somit deutlich den Anteil der nutzbaren regenerativen Energie. Es ist klar ersichtlich, dass eine Reduktion der CO₂-Emissionen und des Primärenergieverbrauchs durch den Einsatz der Wärmepumpen stattfindet.

16.2 Ausblick – Erweiterungspunkte für WP_{SOURCE}

Innerhalb der Workshops aber auch im Zuge der Anwendung von WP_{SOURCE} wurden erneut Erweiterungswünsche und Anpassungen an das Vordimensionierungsprogramm von den Nutzern und Anwendern gestellt. Unter den Themen und Schwerpunkten fallen:

- Wetterdaten: Einbindung eigener / anderer Wetterdatensätze in das Programm, um noch genauer seine Randbedingungen fixieren zu können. Generell könnten auch andere Wetterdaten im vorgegebenen Format im Programm verwendet werden. Es ist jedoch derzeit der Fall, dass die Klimaregionen den eingegebenen Postleitzahlen zugeordnet werden, dies müsste gebrückt werden. Aber da sich die zugrundeliegenden Simulationen auf den Wetterdaten der Klimaregionen beziehen, würden die Simulationen nicht mehr gültig sein bzw. es zu Abweichungen kommen.
- Hochtemperaturwärmepumpe: Eingabe und Anwendung von Kennlinien und Eigenschaften der Hochtemperaturwärmepumpen.
- Weitere Gebäudetypen (z.B. Schule, Krankenhaus etc.)
- Vorlauftemperaturen mit bis zu 75°C berücksichtigen: Bisher nicht umsetzbar, da die Simulationen und Auslegungen nicht auf so hohe Vorlauftemperaturen umgesetzt wurden.
- Amortisationszeiten: Dies ist nicht umsetzbar, da es keine Referenz gibt, auf die sich die Amortisation beziehen kann.
- Technikdaten ändern, z.B. WP, Solarthermie, ...: Nicht für alle Komponenten machbar, da die Simulationen im Vorfeld darauf beruhen und somit die Ergebnisse verfälscht werden würden.

17 Öffentlichkeitsarbeit

Die Ergebnisse des Projekts wurden entsprechend dem Bearbeitungsfortschritt veröffentlicht, weitere Veröffentlichungen sind möglich. Eine Übersicht für die Jahre 2019 bis 2022 zeigen die weiteren Kapitel. Weitere Informationen können im Internet auf der Homepage des siz energieplus (<https://siz-energie-plus.de/projekte/future-heatpump-ii>) abgerufen werden.

17.1 Studentische Bearbeitungen

Tabelle 13 Studentische Bearbeitungen im Projekt

Studienarbeit	Nina Piesch (2021): „Solarthermie als Partner der Wärmepumpe im Wohngebäude“
----------------------	---

17.2 Veröffentlichungen und Vorträge

	Datum / Ausgabe	Wo	Titel	Autoren	Was
2019	Ausgabe 06-07/2019	KI Kälte, Luft, Klimatechnik Hühning GmbH, Heidelberg	WPSOURCE - Vorauswahl und überschlägige Dimensionierung unterschiedlicher Wärmequellen und -übertragungssysteme für Wärmepumpen	Franziska Bockelmann, Markus Peter, Mathias Schlosser	Artikel
	11 - 14 Juni 2019	European Geothermal Congress 2019 Den Haag, Niederlande	WPSOURCE – Comparison of heat sources for heat pumps	<u>Franziska Bockelmann</u> , Markus Peter, Mathias Schlosser	Vortrag und Paper
	1.+2. Juli 2019	C.A.R.M.E.N.-Symposium 2019 Straubing	Wärmequellen und -übertrager für Wärmepumpen – Konzepte erstellen mit WPSOURCE	Franziska Bockelmann	Vortrag
	Bd. 70 (2019), Nr. 11-12	HLH	Wärmequellen und -übertrager für Wärmepumpen – Konzeptfindung mit WPSOURCE	Franziska Bockelmann, Markus Peter, Mathias Schlosser	Artikel
	22. + 23.10.2019	European Heat Pump Summit, Nürnberg	Heat sources and heat exchangers for heat pumps – Creating concepts with WPSOURCE	<u>Franziska Bockelmann</u> , Markus Peter, Mathias Schlosser	Vortrag
	21.11.2019	Energieagentur Rheinland-Pfalz Energieberaterstag 2019 Mainz	WPSOURCE – Planungs- und Konzeptwerkzeug für Wärmequellen und -übertrager für Wärmepumpen	Franziska Bockelmann	Vortrag
	19. - 21.11.2019	Der Geothermie Kongress 2019, München	Integration von Wärmepumpen - Was können Wärmepumpen und ihre Wärmequellen bei der Energieversorgung von Gebäuden leisten?	<u>Franziska Bockelmann</u> , Markus Peter, Henning Roggenkamp, Mathias Schlosser	Poster und Paper
2020	Volume 12, Issue 24, 4691	Energies 2019	It Works—Long-Term Performance Measurement and Optimization of Six Ground Source Heat Pump Systems in Germany	<u>Franziska Bockelmann</u> , M. Norbert Fisch	Artikel
	verschoben auf April 2021	13th IEA Heat Pump Conference 2020 Jeju, Südkorea	Range of application of heat pumps - Implementation of heat pumps with different heat sources	<u>Franziska Bockelmann</u> , Markus Peter, Mathias Schlosser	Vortrag und Paper
	27.+28.08.2020	Workshop „Klimaneutraler Gebäudebestand durch Pauschalmitiete?“, Cottbus	Wärmepumpe & PV = sinnvolle Energieversorgung im Mehrfamilienhaus?	Franziska Bockelmann	Vortrag und Paper
	No. 96, Sep. 2020	Geothermische Energie	Es funktioniert! - Erfahrungen aus Langzeitmessungen an erdgekoppelten Wärmepumpen	Franziska Bockelmann, Markus Peter	Artikel
	19. - 21.11.2020	Der Geothermie Kongress 2020, online	Es funktioniert! - Langzeitmessungen an geothermischen Anlagen, Erfahrungen und Ergebnisse	Franziska Bockelmann	Vortrag und Paper
2021	5.+6.11.2021	EffizienzTagung Bauen+Modernisieren, online	WPSOURCE – Planungswerkzeug für Versorgungskonzepte mit Wärmepumpen	Franziska Bockelmann, Markus Peter, Henning Roggenkamp	Abstract eingereicht, abgelehnt
	17.-19.11.2021	DKV-Tagung 2021, Dresden	WPSOURCE –Versorgungskonzepte mit Wärmepumpen planen	Franziska Bockelmann, Markus Peter, Henning Roggenkamp	Abstract eingereicht, abgelehnt
	30.11. - 02.12.2021	Der Geothermie Kongress 2021, online	WPSOURCE –Versorgungskonzepte mit Wärmepumpen planen	<u>Franziska Bockelmann</u> , Markus Peter, Henning Roggenkamp	Vortrag und Paper
	IEA HPT Annex 52	Abschluss und Reports		Franziska Bockelmann	
2022	26.04.2022	Online Workshopreihe		<u>Franziska Bockelmann</u> , Markus Peter, Henning Roggenkamp	Vortrag
	05_2022	bbr	Zukunftsweisende Energieversorgung für Mehrfamilienhausgruppen am Beispiel des Projekts Goethepark in Wolfsburg	Franziska Bockelmann und Mathias Schlosser	Artikel
	Ausgabe 03/2022	VDI IQ-Journal, Braunschweig	Zukunftsweisende Energieversorgung mittels Wärmepumpe und Photovoltaik	Franziska Bockelmann	Artikel
	09+10.06.2022	3. Kongress Energiewendebauen, Wuppertal	EnOB: futureheatpump_II: Erweiterung und Ausbau des Vordimensionierungsprogramms WPSOURCE	<u>Franziska Bockelmann</u> , Markus Peter, Henning Roggenkamp	Vortrag
	17. - 21.11.2022	European Geothermal Congress (EGC) 2022, Berlin	Real-life comparison of different heat exchangers with low temperature heat sources used in heat pump applications	<u>Franziska Bockelmann</u> , Markus Peter, Mathias Schlosser, Henning Roggenkamp	Vortrag und Paper

17.3 Workshops

Zur Veröffentlichung und dem Praxisaustausch mit den Anwendern fanden drei Workshops zu WP_{SOURCE} statt.

18. Mai 2021 – Workshopreihe „Geothermie und Wärmepumpe“ (~ 60 Teilnehmer)

20. April 2021 - Anwenderworkshop: Erfahrungsaustausch zur Anwendung von WP_{SOURCE} und zum Test der beta-Version 2.0 des Programms (~ 20 angeschriebene Teilnehmer)

26. April 2022 – Workshopreihe „Niedertemperaturwärmequellen - Potentiale und effiziente Nutzung“ (~ 110 Teilnehmer)



Anmeldung
Bitte melden Sie sich bis zum **23. April 2021** über das Anmeldeformular an.
Link zum Anmeldeformular: <https://siz-energie-plus.de/anmeldung-workshop-geothermie>
Die Workshopreihe ist kostenfrei.
Die Zugangsdaten zu den Online-Workshops erhalten Sie wenige Tage vor den jeweiligen Terminen per E-Mail.
Bitte kontrollieren Sie auch Ihr Spam-Postfach.
Wir freuen uns auf Ihre Teilnahme!

Hintergrund
Wärmepumpentechnologie wird bei der zukünftigen Wärme- und Kälteversorgung eine wesentliche Rolle spielen. Um das Potenzial dieser Energieversorgungsvariante möglichst effizient auszuschöpfen zu können, kommt der Wahl der Niedertemperaturwärmequelle und der für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeigneten Wärmeübertragers eine entscheidende Bedeutung zu. Eine Verbesserung der Übersicht und auch der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Konzepte und Ansätze in Bezug auf energetische, ökologische und wirtschaftliche Aspekte in Verbindung mit baupraktischen Hinweisen kann für die mit der Projektierung und Planung befassten Personen eine erhebliche Arbeitserleichterung und Qualitätssicherung darstellen.
Ergebnisse spannender Forschungsprojekte des Instituts für Solarenergieforschung ISFH, des Instituts für Wärmetechnik und Thermodynamik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg und des Steinbeil-Innovationszentrums energieplus, stehen an den drei auch einzeln buchbaren Tagen zu einem Meinungsaustausch bereit.

Workshopreihe „Geothermie und Wärmepumpe“

4. / 11. / 18. Mai 2021
10:00 - 12:00 Uhr

siz energieplus

Kontakt
Franziska Bockelmann
siz-energieplus
E-Mail: franziska.bockelmann@stw.de
Telefon: 0531 - 79389317

Anmeldung
Bitte melden Sie sich bis zum **14. April 2022** über das Anmeldeformular an.
Link zum Anmeldeformular: <https://siz-energie-plus.de/anmeldung-workshop-nw>
Die Workshopreihe ist kostenfrei.
Die Zugangsdaten zu den einzelnen Online-Workshops erhalten Sie wenige Tage vor den jeweiligen Terminen per E-Mail.
Bitte kontrollieren Sie auch Ihr Spam-Postfach.
Wir freuen uns auf Ihre Teilnahme!

Hintergrund
Gegenstand der Workshopreihe sind die aktuellen Bearbeitungsstände und Ergebnisse unserer Forschungsprojekte sowie die Potentiale einer effizienten Wärme- und Kälteversorgung mittels Wärmepumpe, die wir Ihnen vorstellen und mit Ihnen diskutieren möchten.
Folgende Themen werden behandelt:
• Vorkolorung von Niedertemperaturwärmequellen und -wärmeübertragern für Wärmepumpen: Erarbeitung energetischer, ökologischer und wirtschaftlich relevanter Energiekonzepte mittels des Validierungsprogramms WP_{SOURCE}
• Grundwasser als geothermische Energiequelle: Potentiale der energetischen Nutzung, Umsetzungskonzepte und effizientes Anlagenesign
• Qualitätssicherung und -steigerung oberflächennaher geothermischer Systeme von der Planung und Auslegung über die Ausführung bis zur Inbetriebnahme
• Geothermisches Monitoring während des Betriebs und Betriebes von Erdwärmesonden sowie Verdrängungsmonitoring zur projektspezifischen Optimierung der Wärmepumpen

Workshopreihe „Niedertemperaturwärmequellen - Potentiale und effiziente Nutzung“

26. April sowie 03., 10. und 17. Mai 2022
jeweils 10:00 Uhr - 12:00 Uhr

siz energieplus

Kontakt
Franziska Bockelmann
siz-energieplus
E-Mail: franziska.bockelmann@siz-energieplus.de
Telefon: 0531 - 79389317

Abbildung 79 Einladungsflyer zu den Workshopreihen 2021 und 2022

In den Workshops wurden die Ergebnisse zum Projekt vorgestellt sowie die Anwendung und Nutzung von WP_{SOURCE} diskutiert.

Die Unterlagen zu den Workshops sind unter dem Projekt auf der SIZ energieplus Homepage zu finden.

18 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, Peter, Schlosser: „future:heatpump - Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen“ Abschlussbericht (BMWi, FKZ 03ET1273A), 01/2019
- [2] KLEY, C.: Untersuchungen zur Steigerung der Eigenstromnutzung in EnergiePLUS-Gebäuden, Dissertation am Institut für Gebäude- und Solartechnik, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Fisch, TU Braunschweig, (2018), Shaker Verlag ISBN 978-3-8440-6095-9
- [3] HÜSING, F und MERCKER, O. und HIRSCH, H und STEINWEG, J.: Solare Regeneration von Erdwärmekollektoren – Reduzierter Flächenbedarf bei hoher Effizienz, 27. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein (2017)
- [4] PÄRISCH, P. und BERTRAM, E. und TEPE, R.: Experimente und Modellvalidierung für die Erdsondenregeneration mit Solarwärme, Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, Neumarkt (2013)
- [5] TEPE, R., PÄRISCH, P., BERTRAM, E., MERCKER, O., ARNOLD, O. und ROCKENDORF, G.: Hocheffiziente Wärmepumpensysteme mit Geothermie- und Solarthermienutzung - Rückblick auf 3 Jahre Forschung und Entwicklung, 24. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, Neumarkt (2014)
- [6] „Leitfaden Wärmepumpe Kombination von Wärmepumpe und Photovoltaik“; EnergieAgentur.NRW GmbH, Wärmepumpen-Marktplatz NRW, 03/2016
- [7] Fisch, M.N., Schlosser, M., Reiser, S., et. al.: "future:solar - Systemanalyse zur solaren Energieversorgung, Abschlussbericht" (BMWi, FKZ 0325990A), Mai 2015
- [8] "Photovoltaik-Preismonitor Deutschland", Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar), EuPD Research: Ergebnisse 1. Quartal 2016; EX0091-059-2-3-01-1
- [9] www.photovoltaik.org/wissen/photovoltaik-wirkungsgrad, Stand 17.11.2022
- [10] Wirth, H.: "Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland", Fraunhofer ISE Fassung vom 30.10.2022, www.pv-fakten.de
- [11] Bockelmann, F., Fisch, M.N.: "Betriebsstrategien für EnergiePLUS-Gebäude am Beispiel der Bergalpe", Abschlussbericht (BBSR, ZukunftBau, SWD – 10.08.18.7-13.33), Oktober 2015
- [12] Schünemann, Felsmann: „Photovoltaik im Effizienzhaus Plus – Optimierung des Eigenverbrauchs“, TU Dresden – Institut für Energietechnik aus Tagungsband und Vortrag bei OTTI Energieeffizienzhaus Plus, 14.+15.07.15, Hamburg
- [13] Fritsche, Björn: „Kombination von Heizungswärmepumpen und Photovoltaikanlagen im Einfamilienhaus“, Bachelorarbeit, Fachhochschule Münster, 2014
- [14] Bockelmann, F., Fisch, M.N.: "Dezentrale, modulare Stromspeicher zur Eigenstromsteigerung in EffizienzhausPLUS Gebäuden", Abschlussbericht (BBSR, ZukunftBau, SWD – 10.08.18.7-16.34), Mai 2019

- [15] Vornorm DIV V 4701, Teil 10: „Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen – Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung“, August 2003
- [16] Meteonorm® 7, Global Meteorological Database for Engineers, Planners and Education, Version 7.1.10.25939, Meteotest, Bern (CH), 2015
- [17] Informationsblatt Nr. 57 des Bundesverbandes der Deutschen Heizungsindustrie (BDH)
- [18] VDI Richtlinie 2067, Blatt 1: „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen: Grundlagen und Kostenberechnung“, September 2012
- [19] Kley, Christian: „Untersuchungen zur Steigerung der Eigenstromnutzung in Energie-PLUS-Gebäuden“, Dissertation, Braunschweig, 2015

19 Abkürzungsverzeichnis und Legende

Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
AW	Abwasserwärmeübertrager
BKT	Betonkerntemperierung
COP	Coefficient of Performance (für Wärmepumpen) / Leistungszahl
EE	Endenergie
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
FW	Fernwärme
GW	Grundwasser / Brunnen
HZG	Raumheizung
JAZ	Jahresarbeitszahl
KM	mechanische Kühlung mittels umschaltbarer Wärmepumpe
KMZ	Kältemengenzähler
L	Luft
MFH	Mehrfamilienhaus
NGF	Nettogrundfläche
NT	Niedertemperatur
OG	Übertragungssysteme für Seen, offene Gewässer etc.
PE	Primärenergie
PS	Pufferspeicher
PV	Photovoltaik
Q _p	Primärenergiebedarf
RH	Reihenhaus
RL	Rücklauf
RLT	Raumlufttechnik
SPS	Spiralsonde
ST	Solarthermie
TWE	Trinkwassererwärmung
TWW	Trinkwarmwasser
UP	Umwälzpumpe
VL	Vorlauf
WE	Wohneinheit
WMZ	Wärmemengenzähler
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung

Piktogramme



Photovoltaikanlage



Solarthermieanlage



Umgebungsluft



Öffentliches Stromnetz



Wärmenetz (Nahwärme, kalte Nahwärme, Fernwärmenetz)



Versorgungsnetz



Wärmepumpe



Kaminofen



Gasbrennwertgerät



Erdwärmesonde



Energiepfahl



Gebäude



Elektrischer Energiespeicher



Thermischer Energiespeicher



Wärmetauscher



Trinkwarmwasser



Flächenheizung; Fußbodenheizung



Statische Heizung



Raumluftechnik (RLT)



Haushaltstrom

20 Anhang

20.1 Anlage 1 – Steckbriefe Wärmeübertrager



Grabenkollektor

Allgemeines

Ein Grabenkollektor gehört zu den oberflächennahen Erdreichwärmeübertragern. Grabenkollektoren werden als geschlossenes System ausgeführt und in Form von vollflächigen Absorbern vertikal in Gräben eingebaut. Die Module werden in Strängen verlegt. Vergleichsweise hohe Entzugsleistungen werden durch entsprechend große Oberflächen realisiert.

Technische Daten

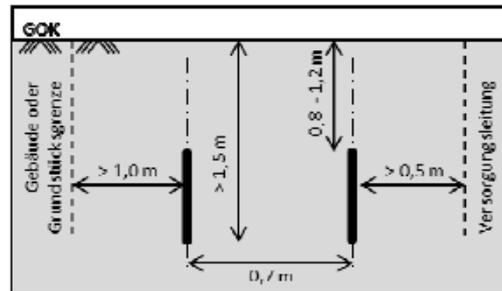
Material	Polypropylen (PP)		
Abmessung	Model 1 L/H	0,89 m / 0,35 m	10 Module = 1 Kreis
	Model 2 L/H	7,0 m / 1,2 m	
	Fläche _{Absorber}	0,31 m ² bzw. 17 m ²	
Temperaturniveau der Quelle (Erdreich ungestört)	5 - 15°C		

Kennwerte (abhängig von Randbedingungen und Bodenart)

Spez. Entzugsleistung	100 bis 2.000 W/Modul
Spez. Eintragsleistung	k.A.
Wärmeträgermedium	Wasser-Glykol-Gemisch

Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Die Absorber werden in Gräben (Breite ca. 0,7 m) bis zu einer Tiefe von 1,5 m mittig bzw. links und rechts der Grabenwand eingesetzt und fixiert. Der Achsabstand sollte min. 0,7 m betragen. Die Module werden eingeschlämmt und mit ca. 0,8 m bis 1,2 m Erde überdeckt. Zu angrenzenden Grundstücken oder Gebäuden ist ein Abstand von über 1,0 m einzuhalten. Der Abstand zu Versorgungsleitungen muss mehr als 0,5 m betragen.



Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

Materialkosten	1.400 €/Kreis	Zusätzliche Leistungen (u. a. bundeslandabhängig)
Installation/Einbau (Aushub und Anbindung)	500 €/Kreis	Auslegung, Genehmigung (Anzeige)
Planung / Genehmigung	ca. 1.700 €	

Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude
 Nachträglicher Einbau auch im Bestand möglich

Randbedingungen/Bemerkung

- in der Regel anzeigepflichtig aber genehmigungsfrei
- generell nicht überbaubar; Überbauung durch Parkplätze mit Versickerung möglich
- geringe Einbautiefe

Die Angaben beziehen sich auf marktübliche Standardprodukte.

Die Angaben und Auslegungsgrößen sind den Produktunterlagen, Herstellerinformationen und einschlägigen Normen und Richtlinien entnommen worden.



Eisspeicher + Solar-Luft-Absorber

Allgemeines

Es handelt sich um die Kombination aus einem in den meisten Fällen im Erdreich befindlichen Behälter (Zisterne) mit eingebautem Wärmeübertrager und einem Solar-Luft-Absorber. Der Solar-Luft-Absorber kann auf Dachflächen installiert oder z. B. als "Energiezaun" positioniert werden. Eisspeicher und Solar-Luft-Absorber dienen als Niedertemperaturwärmequelle für die Wärmepumpe. Das System kann zum Heizen und auch zum Kühlen verwendet werden. Liefert der Solar-Luft-Absorber nicht genügend Energie oder kann im Kühlbetrieb nicht genügend Wärme über ihn abgeführt werden, wird auf den Eisspeicher umgeschaltet. Neben sensibler Wärme wird mit einem Eisspeicher insbesondere die latente Wärme der Phasenübergänge flüssig/fest (Heizbetrieb) und fest/flüssig (Kühlbetrieb) genutzt. Der Eisspeicher wird durch den Solar-Luft-Absorber oder ggf. durch eine Gebäudekühlung regeneriert werden.

Technische Daten

Kennwerte (abhängig von den Randbedingungen)

Eisspeicher (Behälter)

Material	nicht wärmedämmter Betontank mit Wärmeübertrager, z. B. aus Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP); aktuell auch als ungedämmter Kunststoffbehälter			
Abmessung (je Behälter)	Höhe	bis 4,0 m	Spez. Entzugsleistung	4 - 10 kW
	$\varnothing_{\text{Speicher}}$	bis 2,7 m	Spez. Eintragsleistung	3,5 - 7 kW
	Volumen	ca. 10 m ³		
	auch als Sonderanfertigungen mit größeren Volumen und frei wählbaren Abmessungen			
Temperaturniveau der Quelle (Eisspeicher)	< 0 - 30 °C	Wärmeträgermedium	Wasser und Wasser-Glykol-Gemisch	

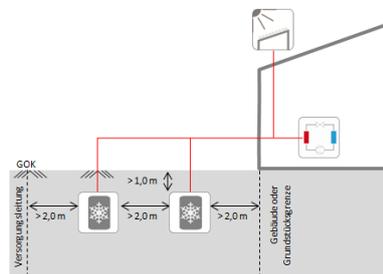
Solar-Luft Absorber (Modul)

Material	Polyethylen (PE), Polypropylen (PP)			Spez. Entzugsleistung	60 - 100 W/m ²
Abmessung	Länge	ca. 2 - 4 m	Spez. Eintragsleistung	k.A.	
	Breite	ca. 1 - 1,5 m			
Temperaturniveau der Quelle (sol. Einstrahlung und Außenluft)	ca. 5 - 40 °C	Wärmeträgermedium	Wasser-Glykol-Gemisch		

Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Ein Eisspeicher wird üblicherweise mit einer Erdüberdeckung von etwa 1 m im Erdreich vergraben (Standard Behälter). Zwischen dem/den Eisspeicher(n) und angrenzenden Gebäuden sowie wasserführenden Leitungen muss ein Mindestabstand von 2 m gewährleistet werden. Ist dieses nicht möglich, müssen betroffene Leitungen entsprechend wärmedämmt werden.

Ein Solar-Luft-Absorber wird üblicherweise auf Dach montiert. Eine Aufständerung ist in den meisten Fällen nicht möglich. Alternative Bauformen (z. B. Energiezaun) stehen zur Verfügung.



Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

Materialkosten	Eisspeicher ca. 470 €/m ³ ; Solar-Luft-Absorber ca. 300 €/m ²	
Installation / Einbau (Aushub und Anbindung)	ca. 110 €/m ³	Zusätzliche Leistungen (u.a. bundeslandabhängig) keine
Planung / Genehmigung	ca. 1.200 €	

Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude
 Nachträglicher Einbau auch im Bestand möglich

Randbedingungen/Bemerkung

- genehmigungsfrei; unkritisch für das Grundwasser
- individuell konfigurierbar
- neben Solar-Luft-Absorbern können auch andere Quellen zur Versorgung der Wärmepumpe mit Niedertemperaturwärme genutzt werden, z. B. Energiezäune, PVT-Kollektoren etc.

Die Angaben beziehen sich auf marktübliche Standardprodukte.

Die Angaben und Auslegungsgrößen sind den Produktunterlagen, Herstellerinformationen und einschlägigen Normen und Richtlinien entnommen worden.



thermisch aktivierte Spundwände (Wasser-Erdreich)

Allgemeines

Thermisch aktivierte Spundwände sind eine Kombination aus handelsüblichen Spundwandprofilen und einem zur Wärmeübertragung aufgeschweißten Rohrsystem. Spundwände z.B. im Hafen- und Wasserstraßenbau oder andere an Wasser grenzende Spundwände (Wasserschutzbauwerken) können zur oberflächennahen hydrothermalen Nutzung des angrenzenden Wassers und zeitgleich geothermischen Nutzung des auf der anderen Seite der Spundwand angrenzenden Erdreichs genutzt werden.

Technische Daten

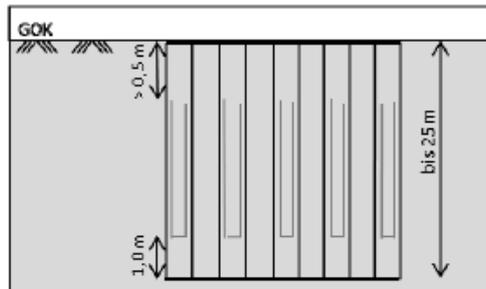
Material	Stahlsplundwand und -absorberrohre	
Abmessung	Länge _{Spundbohle}	max. 25 m
	Breite _{Spundbohle}	0.50 - 0.75 m
	Absorberrohre	30 x 20 mm
Temperaturniveau der Quelle (Wassertemperatur)	2 - 16 °C	

Kennwerte (abhängig von Randbedingungen und Bodenart)

Spez. Entzugsleistung	150 - 500 W/m
Spez. Eintragsleistung	k.A.
Wärmeträgermedium	Wasser-Glykol-Gemisch

Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Die einzelnen Spundbohlen werden mittels Rammen, Vibrieren oder Pressen ins Erdreich eingebracht. Die Oberkante der Spundbohlen sollte rund 0,5 m unterhalb der Geländeoberkante liegen. Die Absorberrohre werden erdseitig im Bergbereich der Bohle mit einem Abstand von mehr als 0,5 m zur Oberkante der Bohle und rund 1,0 m zur Unterkante der Bohle aufgeschweißt.



Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

Materialkosten	ca. 1.300 €/Stk	Zusätzliche Leistungen (u. a. bundeslandabhängig) Auslegung, Genehmigung (Anzeige)
Installation/Einbau (Einbau und Anbindung)	ca. 250 €/Stk	
Planung / Genehmigung	ca. 700 €	

Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude
 Nachträglicher Einbau auch im Bestand möglich

Randbedingungen/Bemerkung

- keine bergrechtliche Genehmigung erforderlich
- keine Bohrrisiken
- kurze Einbauzeit, da industrieerprobte Einbringung und modularer Aufbau
- vollständiger Rückbau im Bedarfsfall möglich
- wasserseitige Nachrüstung an vorhandenen Spundwänden
- Synergieeffekte durch Doppelnutzung geplanter Schutz- und Stahlbauwerke: Integration von Wärmeübertragern zur Energiegewinnung

Die Angaben beziehen sich auf marktübliche Standardprodukte.

Die Angaben und Auslegungsgrößen sind den Produktunterlagen, Herstellerinformationen und einschlägigen Normen und Richtlinien entnommen worden.



thermisch aktivierte Spundwände (beidseitig gegen Erdreich)

Allgemeines

Thermisch aktivierte Spundwände sind eine Kombination aus handelsüblichen Spundwandprofilen und einem zur Wärmeübertragung aufgeschweißten Rohrsystem. Beidseitig an Erdreich grenzende thermisch aktivierte Spundwände können zum Wärmeentzug und -eintrag aus /ans umgebende Erdreich genutzt werden. Sie können z.B. aus nicht zurückgebauter Baugrubensicherung oder durch eigens in das Erdreich eingebrachte Elemente bestehen.

Technische Daten

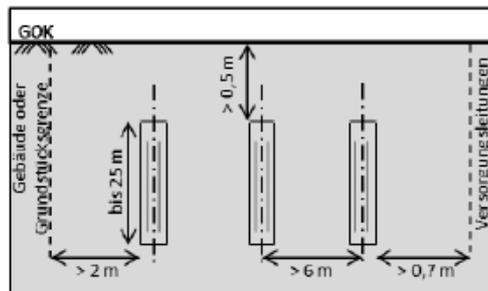
Material	Stahlspundwand und -absorberrohre	
Abmessung	Länge _{Spundbohle}	max. 25 m
	Breite _{Spundbohle}	0.50 - 0.75 m
	Absorberrohre	z. B. 25 x 3,0 mm
Temperaturniveau der Quelle (Erdreich ungestört)	5 - 15 °C	

Kennwerte (abhängig von Randbedingungen und Bodenart)

Spez. Entzugsleistung	150 - 500 W/m
Spez. Eintragsleistung	k.A.
Wärmeträgermedium	Wasser-Glykol-Gemisch

Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Die einzelnen Spundbohlen werden mittels Rammen, Vibrieren oder Pressen ins Erdreich eingebracht. Die Oberkante der Spundbohlen sollte rund 0,5 m unterhalb der Geländeoberkante liegen. Zu angrenzenden Grundstücken oder Gebäuden ist ein Abstand von über 2,0 m einzuhalten. Der Abstand zu Versorgungsleitungen muss mehr als 0,7 m betragen. Bei der Platzierung der Einzelspundbohlen ist ein Abstand der Bohlen zueinander von mindestens 2 - 6 m zu realisieren. Die Absorberrohre werden in einem Abstand von mehr als 0,5 m zur Oberkante der Bohle und rund 1,0 m zur Unterkante der Bohle aufgeschweißst.



Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

Materialkosten	ca. 2.250 €/Stk	Zusätzliche Leistungen (u. a. bundeslandabhängig) Auslegung, Genehmigung (Anzeige)
Installation/Einbau (Einbau und Anbindung)	ca. 500 €/Stk	
Planung / Genehmigung	ca. 700 €	

Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude
 Nachträglicher Einbau auch im Bestand möglich

Randbedingungen/Bemerkung

- keine bergrechtliche Genehmigung erforderlich
- keine Bohrrisiken
- kurze Einbauzeit, da industrieerprobte Einbringung und modularer Aufbau
- vollständiger Rückbau im Bedarfsfall möglich
- Synergieeffekte durch Doppelnutzung, z. B. zur Baugrubensicherung und Energiegewinnung

Die Angaben beziehen sich auf marktübliche Standardprodukte.

Die Angaben und Auslegungsgrößen sind den Produktunterlagen, Herstellerinformationen und einschlägigen Normen und Richtlinien entnommen worden.



direkte Gewässernutzung

Allgemeines

In der Regel wird bei einer direkten Gewässernutzung (Oberflächengewässer) das Wasser aus einem See, Fluss, Hafenbecken oder ähnlichem von der Wärmepumpe direkt als Niedertemperaturwärmequelle genutzt. Um das Gewässer vor dem Eintrag schädigender Substanzen als auch den Verdampfer der Wärmepumpe vor Verschmutzung zu schützen, wird mittels Wärmeübertrager eine Systemtrennung installiert. Die Systemtrennung trennt das Gewässer und den Primärkreislauf der Wärmepumpe.

Technische Daten

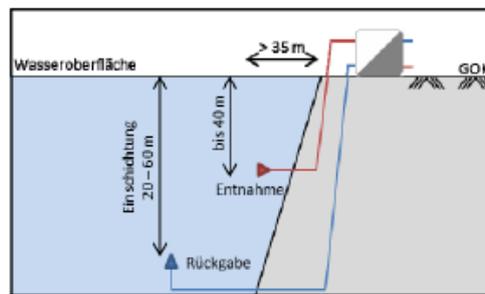
Material	Rohrssystem und Wärmeübertrager
Trockenwetterabfluss	über 500 l/s
Temperaturniveau der Quelle (Oberflächengewässer)	ca. 2 - 25 °C

Kennwerte (abhängig von Randbedingungen)

Spez. Entzugsleistung	auslegungsabhängig
Spez. Eintragsleistung	auslegungsabhängig
Wärmeträgermedium (Primärkreis Wärmepumpe)	Wasser oder Wasser-Glycol-Gemisch

Einbau und Umsetzung

Die Entnahme aus einem Gewässer sollte in einer Tiefe von max. 40 m erfolgen. Die Anbindeleitungen sind grabenlos einzubringen (gelenkte Bohrungen) und frostsicher zu verlegen. Die Rückspeisung des Wassers muss unterhalb der Sprungschicht des Gewässers, in einem Bereich zwischen 20 bis 60 m, erfolgen. Der Abstand zum Ufer muss mehr als 35 m betragen. Wassertemperaturen: Die Einleittemperatur muss unter 25 °C liegen. Die Änderung der Gewässertemperatur in Forellenregionen ist bei Fließgewässern auf ± 1.5 K zu begrenzen. In anderen Regionen gelten max. ± 3 K; bei Seen gibt es im Allgemeinen keine Vorgaben.



Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

Materialkosten	ca. 2.500 €	Zusätzliche Leistungen (u. a. bundeslandabhängig) Auslegung und Genehmigung Pumpversuch und Wasserprobe
Installation/Einbau (Ausbau und Anbindung)	ca. 17.000 €	
Planung / Genehmigung	ca. 4.000 €	

Einsatzgebiete

Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude

Randbedingungen/Bemerkung

- Genehmigungspflicht - jedoch in Deutschland keine konkreten rechtlichen Vorgaben. Beachtung des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) und der Gewässerschutzverordnung.
- Auch bei nicht fließenden Gewässern sollte eine maximale Temperaturänderung in Höhe von ± 6 K wegen möglicher Umweltauswirkungen nicht überschritten werden.
- Als kritisch wird der Wärmeeintrag (Kühlbetrieb) angesehen.
- Kurzschluss zwischen Entnahme und Rückgabe vermeiden.
- Fischschutz vorsehen am Entnahme und Rückgabestutzen.



Kaltes Nahwärmenetz

Allgemeines

Der wesentliche Unterschied zwischen konventionellen und kalten Nahwärmenetzen ist die geringere Temperatur des Wärmeträgermediums im "kalten" Netz. Im Gegensatz zu konventionellen Nahwärme- oder Fernwärmenetzen wird meist direkt die "Quellenwärme" über ein Leitungsnetz geführt und das Netz als Wärmereservoir für dezentrale Wärmepumpen genutzt. Mithilfe dezentraler Wärmepumpen in den angeschlossenen Gebäuden wird dem Netz Wärme entzogen und auf ein höheres Temperaturniveau zur Raum- und Trinkwassererwärmung gebracht. Die Vorlauftemperatur in einem kalten Nahwärmenetz wird üblicherweise unter 30 °C gehalten. Da die Netztemperatur der kalten Nahwärme vergleichsweise nah der Umgebungstemperatur liegt, fallen Wärmeverluste gegenüber konventionellen Nahwärme- oder Fernwärmenetzen deutlich geringer aus. Aus diesem Grund werden die Rohrleitungen für kalte Nahwärmenetze teilweise ohne oder nur mit geringer Wärmedämmung ausgestattet.

Technische Daten

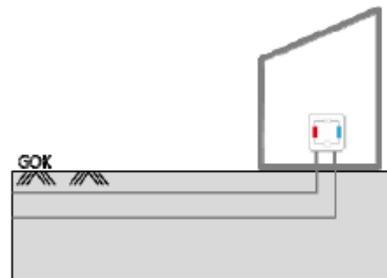
Material	PE Rohr
Abmessung	Leitungsnetz / Versorgungsnetz
Temperaturniveau der Quelle (Netztemperatur)	ca. 8 - max. 30°C

Kennwerte (abhängig von Randbedingungen)

Spez. Entzugsleistung	auslegungsabhängig
Spez. Eintragsleistung	auslegungsabhängig
Wärmeträgermedium	Wasser oder Wasser-Glykol-Gemisch

Einbau/Verlegung (Mindestabstände)

Der Wärmetransport zu den Gebäuden erfolgt über ein oftmals nicht wärmegeprägtes Verteilnetz. In der Regel werden die Hausanschlüsse zur Anbindung der Wärmepumpe(n) an die Hauptverteilungsleitung(en) durch Abzweigungen realisiert. Das durch die Wärmepumpen entwärmte Wärmeträgermedium wird über das Versorgungsnetz zurück zur Niedertemperaturwärmequelle geleitet.



Mittlere Investitionskosten (netto) (größenabhängig)

Materialkosten	-	Zusätzliche Leistungen (u. a. bundeslandabhängig)	
Installation/Einbau (Baukostenzuschuß / Anschlusskosten einmalig)	bis zu 20.0000 €		keine hinsichtlich des Anschlusses an das Netz
Planung / Genehmigung	-		

Einsatzgebiete

Versorgung von Quartieren mit Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie Nichtwohngebäuden
 Nachträglicher Einbau auch im Bestand grundsätzlich möglich

Randbedingungen/Bemerkung

- keine

Die Angaben beziehen sich auf marktübliche Standardprodukte.

Die Angaben und Auslegungsgrößen sind den Produktunterlagen, Herstellerinformationen und einschlägigen Normen und Richtlinien entnommen worden.

20.2 Anlage 2 – Steckbriefe Regeneration

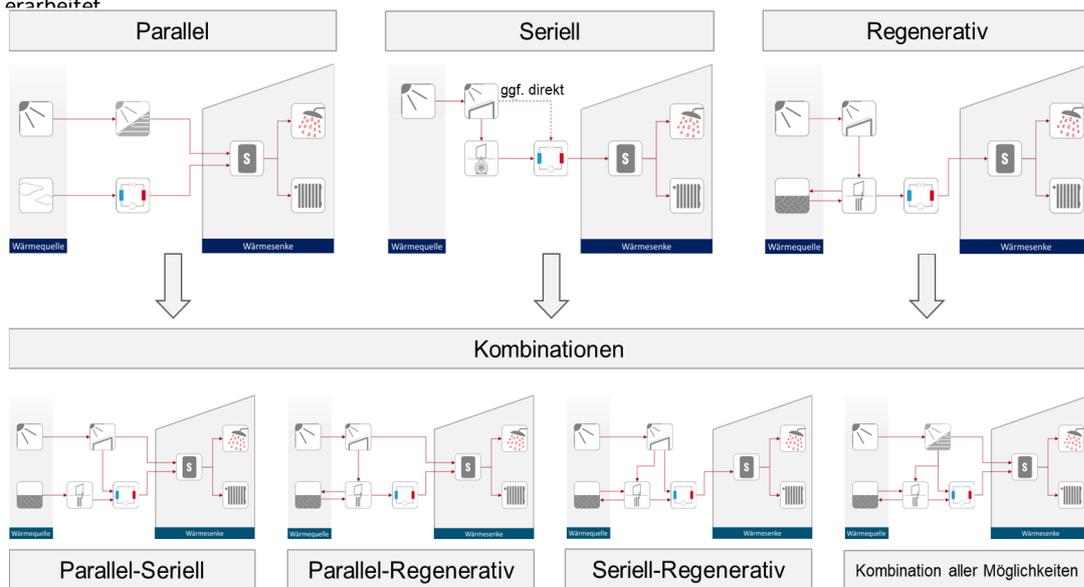
Solarenergie zur Unterstützung der Wärmeversorgung und Regeneration von Niedertemperaturwärmequellen

Für eine zukünftig CO₂-neutrale Energieversorgung, insbesondere im Bereich der Wärmebereitstellung für Gebäude, gelten Wärmepumpen als Schlüsseltechnologie. Wärmepumpen machen Niedertemperaturwärme aus der Umwelt nutzbar, indem sie diese, meist mittels elektrischer Energie, auf ein nutzbares Temperaturniveau anheben. Maßgebende Faktoren für die Effizienz eines Wärmepumpensystems sind die Temperaturniveaus der Wärmequelle (Umweltwärme) und der Wärmesenke (Nutzwärme).

Die Erweiterung eines Energieversorgungskonzeptes mit Wärmepumpe um eine Solarthermieanlage bietet Potenzial die Effizienz des Gesamtsystems zu steigern und die Randbedingungen am Standort (u. a. solare Einstrahlung und Installationsfläche) besser zu nutzen.

Neben der Einbindung von Solarthermie als eigenständigen Wärmeerzeuger, bestehen Möglichkeiten einer solarthermischen Einbindung in Verbindung mit einer Wärmepumpe, z. B. quellenseitig zur Anhebung des Temperaturniveaus der Niedertemperaturwärme oder zur Regeneration der Niedertemperaturquelle (z. B. des Erdreichs).

Im Rahmen des Forschungsprojektes future:heatpump und der Erweiterung des Programms WP_{SOURCE} wurden sieben Systemkonfigurationen zur Einbindung und Kopplung von Solarthermie, Wärmepumpe und Gebäude erarbeitet



Die dargestellten Konfigurationen beruhen auf einer Literaturrecherche zur Integration von Solarthermie in Energieversorgungskonzepten für Wohngebäude.

Die Systemkonfigurationen stellen unterschiedliche Kopplungsvarianten von Solarthermie, Wärmepumpe und Gebäude in Bezug auf eine direkte Nutzung von Solarthermie für die Trinkwarmwassererwärmung und ggf. Gebäudeheizung, als Wärmequelle für eine Wärmepumpe oder zur Regeneration des Erdreichs dar.

Die Bewertung der Konfigurationen erfolgte bezüglich des Einflusses, z. B. auf die

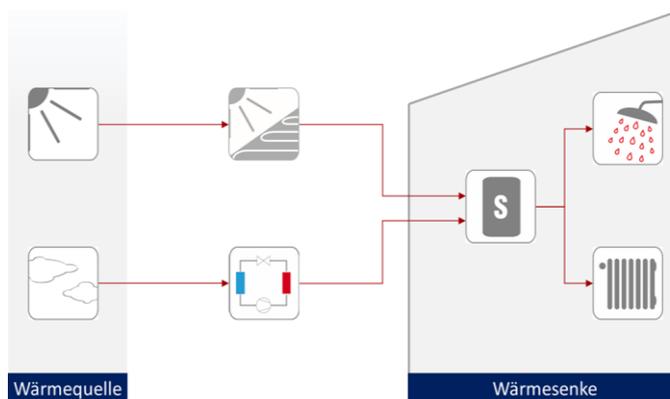
- Effizienz des Gesamtsystems und der Wärmepumpe,
- Reduzierung von Material und Aufwand sowie benötigter Fläche und/oder Tiefe bei der Erschließung des Erdreichs,
- Energiebilanzen

sowie den Einfluss auf den Anlagenbetrieb im Vergleich zu einem System ohne Solarthermie.

Parallele Systemkonfiguration

Systembeschreibung

Bei einer parallelen Verschaltung stellen sowohl die Wärmepumpe als auch die solarthermische Anlage Wärme zur Verfügung, die zur Trinkwassererwärmung und ggf. auch zur Unterstützung der Raumheizung verwendet werden kann. Üblicherweise übernimmt der Solarkollektor vorrangig die Wärmebereitstellung zur Trinkwassererwärmung. Wird über die Solarthermieanlage der Wärmebedarf nicht vollständig gedeckt, übernimmt die Wärmepumpe die Bereitstellung des verbleibenden Bedarfs. Die Wärmepumpe übernimmt vorrangig die Bereitstellung von Wärme zur Raumheizung.



Vorteile

- geringe Komplexität der hydraulischen Verschaltung und des Regelkonzepts, dadurch bedingt hohe Zuverlässigkeit und Robustheit des Systems
- bei angemessener Anlagendimensionierung ökologisch und ökonomisch sinnvoll und effizient
- spätere Anpassung der Wärmequellen, z. B. zur Effizienzsteigerung oder bei Änderung des Bedarfs, möglich

Nachteile

- keine aktive Regeneration einer NT-Quelle (z. B. des Erdreichs) möglich. Aber: Durch den infolge Solarthermie verringerten Wärmeentzug erfolgt eine geringere Belastung des Erdreichs
- das Potenzial von Solarwärme unterhalb des Niveaus zur Trinkwassererwärmung und/oder Raumheizung bleibt ungenutzt
- keine Reduktion der benötigten Flächen (Flächenabsorber) bzw. Tiefen (Erdwärmesonden) bei der Erschließung des Erdreichs

Ergebnisse im Vergleich zu System ohne Solarthermie

Performance Faktor Gesamtsystem und Wärmepumpe:

Steigerung des SPF_{SWP} mit zunehmender Kollektorfläche. Kann nur ein geringer Teil des Gesamtwärmebedarfs durch Solarthermie bereitgestellt werden, wird die Realisierung einer Solaranlage allein zur Trinkwassererwärmung empfohlen. Bei einem großen Anteil der Solarthermie am Gesamtwärmebedarf kann, z. B. mit einer sog. Kombianlage, ein höherer SPF_{SWP} erzielt werden.

Der SPF_{SWP} nimmt mit zunehmender Jahresdurchschnittstemperatur (gleich sinkendem Gesamtwärmebedarf) und größerem anteiligem TWW-Bedarf des Gebäudes zu, da die Solarthermie einen größeren Wärmebedarf decken kann.

Durch die Bereitstellung von Wärme aus einer Solarthermieanlage (insbesondere in den Sommermonaten), reduzieren sich die Betriebsstunden der Wärmepumpe.

Energieeinsparung:

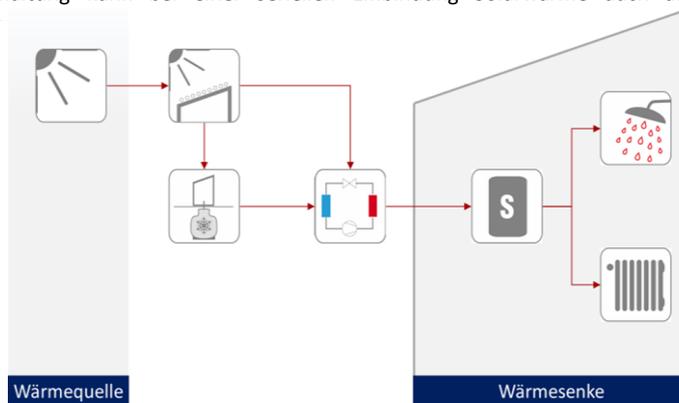
An Standorten mit hoher solarer Einstrahlung in Kombination mit einem geringen Wärmebedarf können hohe Einsparungen an elektrischer Energie erzielt werden. Die Energieeinsparung hängt dabei stark vom elektrischen Energiebedarf der Wärmepumpe des Referenzsystems ohne solarthermische Komponente ab.

Serielle Systemkonfiguration

Systembeschreibung

Bei einer seriellen Verschaltung (z. B. in Verbindung mit einem Eisspeicher) sind Solarkollektor (meist Solar-Luft-Absorber) und Wärmepumpe hintereinander, also "in Reihe" geschaltet. Der Solar-Luft-Absorber oder Solarkollektor dient dabei direkt als Niedertemperaturwärmequelle für die Wärmepumpe oder zur Regeneration der NT-Wärmequelle (im vorliegenden Beispiel des Eisspeichers).

Durch die Wärmepumpe wird die Effizienz des Kollektors/Absorbers gesteigert, da auch niedrige Vorlauftemperaturen, die ohne Wärmepumpe nicht genutzt werden könnten, nutzbar gemacht werden. Idealerweise kann über den Solarkollektor/-absorber eine höhere Wärmequellentemperatur für die Wärmepumpe bereitgestellt werden, als z. B. durch Umgebungsluft oder das Erdreich. Im Gegensatz zur parallelen Verschaltung kann bei einer seriellen Einbindung Solarwärme auch auf einem niedrigeren



Vorteile

- Nutzung von Solarwärme auch unterhalb des Heiztemperaturniveaus
- Regeneration einer Niedertemperaturwärmequelle
- Steigerung des SPF_{SWP} in Abhängigkeit der Größe der Kollektor-/Absorberfläche und des Volumens eines ggf. installierten Eisspeichers
- Steigerung der Leistungszahl der Wärmepumpe

Nachteile

- keine signifikante Erhöhung der Effizienz des Gesamtsystems im Vergleich zur parallelen Verschaltung oder Verschaltung zur Regeneration einer NT-Wärmequelle
- keine Vorteile bei bereits ausreichend dimensionierten Anlagen

Ergebnisse im Vergleich zu System ohne Solarthermie

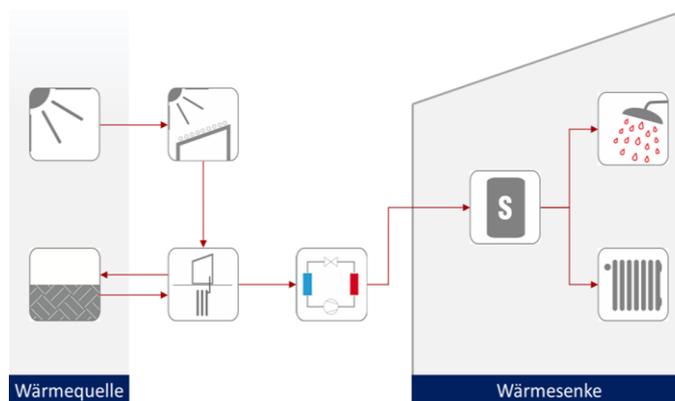
Performance Faktor Gesamtsystem:

Bei großen Kollektor-/Absorberflächen in Kombination mit großen Eisspeichervolumen sind grundsätzlich SPF_{SWP} über 4 realisierbar. Insbesondere durch die direkte Nutzung von Solarwärme kommt es zu einer Reduktion der Betriebszeit der Wärmepumpe und zu einer signifikanten Steigerung des SPF_{SWP} .

Systemkonfiguration zur Regeneration

Systembeschreibung

Bei einer Verschaltung zur Regeneration der NT-Wärmequelle wird Solarwärme zur Verbesserung der Niedertemperaturwärmequelle bzw. des Temperaturniveaus im Erdreich eingesetzt. Die Einbindung von Solarwärme erfolgt z. B. über einen Erdreichwärmeübertrager, der die Solarwärme an das Erdreich abführt. Durch Regeneration kann erreicht werden, dass das Erdreich in keinen "Erschöpfungszustand" oder kritischen Frostzustand gerät. Um eine Schädigung des Erdreichs zu vermeiden, müssen maximal zulässige Eintrittstemperaturen berücksichtigt werden.



Vorteile

- Regeneration der NT-Quelle
- ganzjährig effizienter Betrieb der Wärmepumpe
- Reduktion der Sondenanzahl bzw. der Flächenkollektorfläche durch Regeneration
- Steigerung der Effizienz unterdimensionierter Anlagen
- das Erreichen einer ausgeglichenen Temperaturbilanz des Erdreichs ermöglicht einen Regelbetrieb auch bei unterdimensionierten Anlagen
- Vermeidung von kritischen Frostzuständen
- wärmequellenseitige saisonale Wärmespeicherung

Nachteile

- Um eine ausgeglichene Wärmebilanz des Erdreichs zu gewährleisten, sind z. B. abhängig von der Sondenanzahl und -länge eine genaue Abstimmung und Dimensionierung der wesentlichen Systemkomponenten, vor allem aber eine angepasste Kollektor- oder Absorberflächen erforderlich.
- verglichen mit einem Sondenfeld hat die Systemkonfiguration zur Regeneration bei Einzelsonden nur einen geringen Einfluss auf die Effizienz

Ergebnisse im Vergleich zu System ohne Solarthermie

Regeneration Erdwärmesonde:

Zur Regeneration von Erdwärmesonden kann festgestellt werden, dass durch Regeneration sowohl für Sondenfelder als auch für einzelne Sonden langfristig ein konstantes Temperaturniveau des Erdreichs erreicht werden kann. Für Einzelsonden führt die Betriebsweise mit Regeneration nur zu einer geringen Erhöhung der Effizienz. Im Fall einer grenzwertig oder gar unterdimensionierten Anlage führt eine Verschaltung zur Regeneration der NT-Wärmequelle zu einer Effizienzsteigerung.

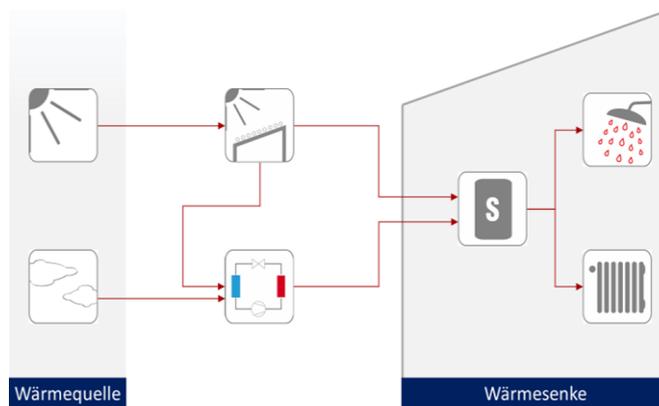
Regeneration Flächenkollektor:

Zur Regeneration von Flächenkollektoren kann zusammenfassend festgestellt werden, dass durch eine Verschaltung zur Regeneration kritische Frostzustände verhindert und sog. Erschöpfungszustände des Erdreichs vermieden werden können. Ein besonders kritischer Frostzustand liegt vor, wenn durch zu starken Wärmeentzug das Erdreich, z. B. in 1 m Tiefe, vollflächig gefriert und dadurch die Versickerung von Schmelz- oder Regenwasser verhindert wird. Mit steigender Solarkollektor-/absorberfläche kann zudem eine Steigerung des SPF_{SWP} erreicht werden. Dies gilt jedoch nur für grenzwertig und unterdimensionierte Anlagen.

Parallel-Serielle Systemkonfiguration

Systembeschreibung

In parallel-seriell verschalteten Systemen wird versucht, die Vorteile paralleler und serieller Verschaltungen zu vereinen. Solarwärme wird bevorzugt dafür genutzt, einen Pufferspeicher direkt zu heizen. Die Wärmepumpe wird vornehmlich über eine sekundäre Wärmequelle, wie z. B. die Umgebungsluft oder das Erdreich, versorgt. Sinkt die Temperatur des Solarkollektors oder Absorbers auf Temperaturen, mit denen der Pufferspeicher nicht direkt geheizt werden kann, wird die Solarwärme zur Quelle der Wärmepumpe und damit das System in einen seriellen Betrieb geschaltet.



Vorteile

- infolge sonst nicht nutzbare Solarwärme (Temperturniveau < Heiztemperatur), trägt Solarthermie zur Erhöhung der Wärmepumpen- und Kollektoreffizienz bei
- Die mögliche Effizienzsteigerung gegenüber einer rein parallelen Verschaltung ist abhängig von vielen Faktoren und sollte gegenüber dem baulichen Mehraufwand abgewogen werden.

Nachteile

- keine Möglichkeit zur Regeneration einer NT-Wärmequelle
- aufwendige Regelung des Systems

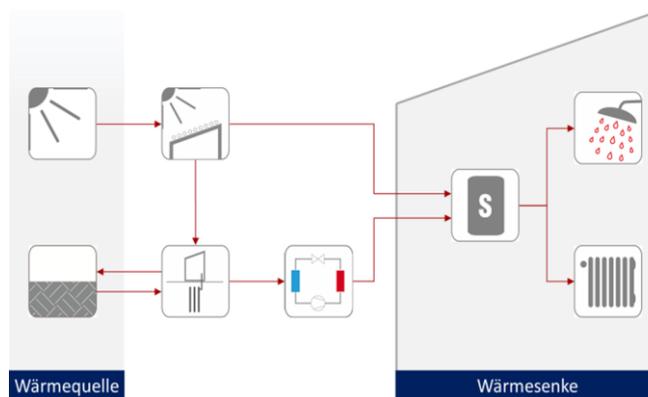
Ergebnisse im Vergleich zu System ohne Solarthermie

Die Umsetzung eine parallel-seriellen Verschaltung führt, im Vergleich zu einer rein parallelen Verschaltung, zu einer Effizienzsteigerung des Systems. Voraussetzung ist jedoch eine angepasste Regelung. In welcher Höhe die Effizienzsteigerung ausfällt, ist von vielen Faktoren abhängig und sollte auf Grundlage der individuellen Gegebenheiten geprüft werden. Nicht zuletzt sollte die Effizienzsteigerung im Verhältnis zum höheren anlagentechnischen Aufwand bewertet werden.

Parallel-Regenerative Systemkonfiguration

Systembeschreibung

Bei einer parallel-regenerativen Systemkonfiguration wird, wie bei einer parallel-seriellen Verschaltung, der Solarkollektor primär für die direkte Deckung des Wärmebedarfs genutzt. Eine erdgekoppelte Wärmepumpe dient zur Deckung des Restwärmebedarfs. Ist die vom solarthermischen System gelieferte Temperatur zu niedrig, um zur Deckung des Wärmebedarfs beizutragen oder ist kein Wärmebedarf vorhanden, wird das Solarsystem auf den regenerativen Betrieb geschaltet und dient zur Regeneration des Erdreichs.



Vorteile

- kritische Frostzustände des Erdreichs und Stagnation der Solaranlage können verhindert werden
- der Solarkollektor/-absorber kann unabhängig von der Sondenlänge vergleichsweise gute Ergebnisse zur Steigerung des SPF_{SWP} betragen.
- unterdimensionierte geothermische Systeme profitieren von der Regeneration des Erdreichs; ausreichend dimensionierte Anlagen können zudem von der direkten Nutzung von Solarwärme profitieren
- prinzipiell kann das gesamtes Temperaturspektrum der Solarwärme genutzt werden

Nachteile

- Regeneration des Erdreichs nimmt nur geringen Anteil ein, da Wärmeproduktion vorrangig in das Gebäude geführt wird. Verhältnis abhängig von Größe der Solaranlage.

Ergebnisse im Vergleich zu System ohne Solarthermie

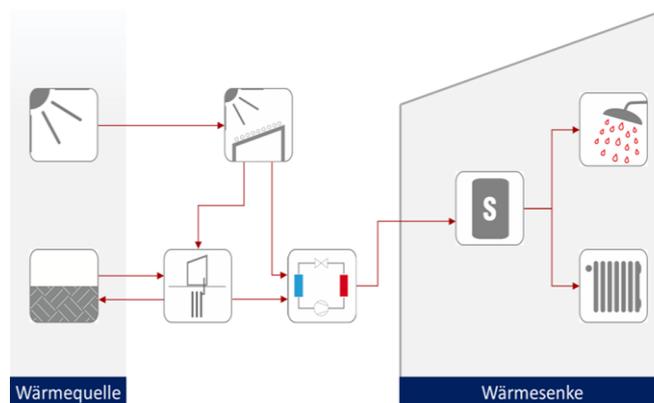
Eine parallel-regenerative Verschaltung mit Erdwärmesonden kann insbesondere bei unterdimensionierten Sonden eine sinnvolle Ergänzung zur parallelen Betriebsweise darstellen. Der effiziente Betrieb hängt dabei maßgeblich vom Regelkonzept der Anlage ab. Aufgrund der vielen variablen und systemspezifischen Parameter, wie beispielsweise der Entzugsleistung und Dimensionierungsgrößen der Sonde(n) sowie den klimatischen Bedingungen ist es sinnvoll, das Regelkonzept nicht auf Basis genereller Vorgaben aufzusetzen, sondern speziell auf den Anwendungsfall anzupassen.

Für eine parallel-regenerative Verschaltung mit Flächenkollektoren konnten keine vergleichenden Untersuchungsergebnisse gefunden werden. Auf Grundlage der Resultate einer rein regenerativen Systemkonfiguration lässt sich jedoch erwarten, dass die Kombination mit einer parallelen Betriebsweise zu einer Steigerung des SPF_{SWP} führt und zusätzlich das Auftreten kritischer Frostzustände - auch bei unterdimensionierten Anlagen - verhindert werden kann.

Seriell-Regenerative Systemkonfiguration

Systembeschreibung

Bei einer seriell-regenerativen Systemkonfiguration wird die Wärme eines Solarkollektors oder -absorbers zur Regeneration des Erdreichs und zur Anhebung der Quellentemperatur für eine Wärmepumpe genutzt. Eine Wärmepumpe benötigt Quellentemperaturen im Bereich von 0 °C bis 20 °C. Der Kollektor/Absorber wird alternativ als Wärmequelle für die Wärmepumpe sowie auch zur Regeneration des geothermischen Systems genutzt.



Vorteile

- im Vergleich zu den anderen Systemkonfigurationen sehr gute Betriebsbedingungen für eine Wärmepumpe
- Systeme mit unterdimensionierten NT-Wärmequellen (z.B. Sonden) können gegenüber dem parallelen System durch die Regeneration einen höheren SPF_{SWP} erzielen

Nachteile

- oft ist keine vollständige Regeneration des Erdreichs möglich; eine langfristige Abkühlung des Erdreichs kann jedoch verlangsamt und/oder reduziert werden.
- bei ausreichend dimensionierten Anlagen wird durch die Regeneration des Erdreichs keine Effizienzsteigerung des Gesamtsystems erzielt.

Ergebnisse im Vergleich zu System ohne Solarthermie

Performance Faktor Gesamtsystem und Wärmepumpe:

Der SPF_{SWP} ist deutlich von der Sondenlänge abhängig. Durch eine Regeneration kann der SPF_{SWP} bei unterdimensionierten NT-Wärmequellen deutlich gesteigert werden. Bei ausreichender Dimensionierung erhöht eine Regeneration des Erdreichs die Effizienz des Gesamtsystems nicht oder nur marginal.

Durch die Einleitung der gesamten Solarwärme in das Erdreich oder alternativ in den Verdampfer der Wärmepumpe können im Vergleich zu den anderen hier beschriebenen Systemkonfigurationen die besten Betriebsbedingungen für die Wärmepumpe und folglich die höchsten SPF_{WP} erzielt werden.

Regeneration des Erdreichs:

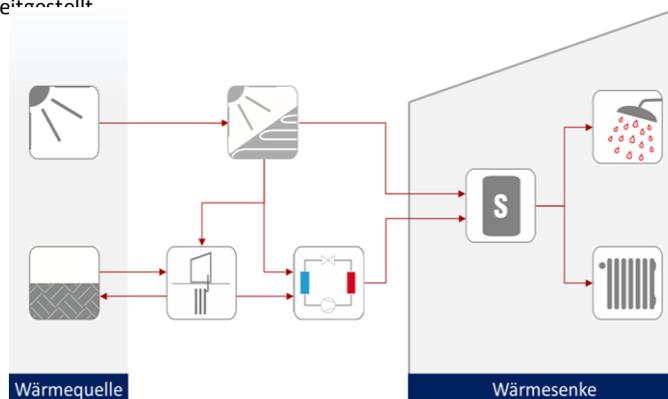
Eine vollständige Regeneration des Erdreichs wird durch diese Verschaltung nicht möglich sein, da Solarwärme vorrangig an das Gebäude abgegeben wird. Gleichwohl kann die Abkühlung des Erdreichs signifikant reduziert werden, weshalb diese Verschaltungsart auch für größere Erdwärmesondenfelder interessant sein kann.

Eine seriell-regenerative Verschaltung in Verbindung mit einem Flächenkollektor konnte in der Literatur nicht gefunden werden. Aufgrund der ganzjährig gesteigerten Verdampfer Temperatur bei Anlagen mit Erdwärmesonden lässt sich jedoch schließen, dass auch bei Anlagen mit Flächenkollektoren kritische Frostzustände vermieden werden können und eine Flächenreduktion des Kollektors möglich sein wird.

Parallel-Seriell-Regenerative Systemkonfiguration

Systembeschreibung

Bei einer parallel-seriell-regenerativen Verschaltung werden alle Betriebsmöglichkeiten miteinander gekoppelt. Solarwärme wird zur direkten Deckung des Wärmebedarfs, zur Anhebung der Temperatur für den Verdampfer und zur Regeneration des Erdreichs genutzt. Je nach Betriebsweise kann die Funktion des kombinierten Systems sehr unterschiedlich ausfallen. Auch kann, z. B. in Abhängigkeit von der Jahreszeit, zwischen den Betriebsmodi umgeschaltet werden. So kann z. B. in der Heizperiode (Nov. - Feb.) die gesamte Solarwärme zur Erhöhung der Temperatur im Verdampfer und/oder zur Regeneration des Erdreichs genutzt werden. Von März bis Oktober kann auf die parallele Konfiguration umgeschaltet werden und dann die Solarwärme zur direkten Erwärmung von Trinkwasser genutzt werden. In dieser Zeit wird Heizwärmebedarf allein durch die Wärmepumpe bereitgestellt.



Vorteile

- die Möglichkeit alle Betriebsweisen zu wählen eröffnet Wege zu höchsten Systemeffizienzen
- die Wärmepumpe ist in den Sommermonaten kaum in Betrieb
- individuell schaltbares System, mit dem alle Versorgungswünsche abgedeckt werden können
- ermöglicht Regeneration des Erdreichs

Nachteile

- hoher Regelungsaufwand und hydraulisch komplexes System

Ergebnisse im Vergleich zu System ohne Solarthermie

Performance Faktor Gesamtsystem und Wärmepumpe:

Durch die Regeneration der NT-Wärmequelle kann der SPF_{SWP} deutlich gesteigert werden. Der SPF_{SWP} weist eine deutliche Abhängigkeit von der Sondenlänge auf. Bei kurzen Sonden profitiert das System durch eine Regeneration des Erdreichs, bei längeren Sonden erhöht die Regeneration den SPF_{SWP} nicht oder nur marginal. In diesem Fall wird eine Effizienzsteigerung durch die Nutzung von Solarwärme in den Sommermonaten ermöglicht.

Die Wärmepumpe kann im seriell-regenerativen Betrieb einen signifikant höheren SPF_{WP} in den Sommermonaten erreicht. Dieser wirkt sich positiv auf die Jahresbilanz aus. In einem parallel-seriell-regenerativen System ist die Wärmepumpe in den Sommermonaten kaum in Betrieb, da der Solarkollektor in dieser Betriebsweise den Wärmebedarf direkt deckt.

Regeneration des Erdreichs:

Eine parallel-seriell-regenerative Verschaltung kann sowohl bei unter- als auch bei ausreichend dimensionierten Systemen gute Ergebnisse erzielen. Im Unterschied zu den anderen hier vorgestellten Verschaltungsarten ist keine weitere Steigerung der Effizienz möglich.

20.3 Anlage 3 – Steckbriefe Gebäude

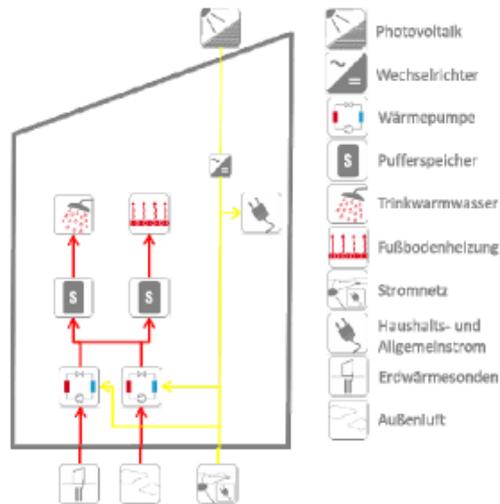


Mehrfamilienhaus Geb. 1

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten	
Baujahr	2016	Beheiztes Gebäudevolumen (V_E)	k.A. m^3
Bruttogeschossfläche (BGF)	k.A. m^2	Jahresheizenergiebedarf ($Q_{H+Q_{TWW}}$)	483 MWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	7.100 m^2	spez. Heizwärmebedarf (q_h+q_{TWW})	68 kWh/ m^2 a

Gebäude

2016 wurden vier zusammenhängende Wohngebäude mit 68 Wohneinheiten im Effizienzhaus-Standard KfW 55 errichtet. Zentrale Komponenten für die Wärmebereitstellung sind Wärmepumpen. Die erzeugte Wärme wird in Pufferspeichern zwischengespeichert und an die Fußbodenheizung bzw. an das Trinkwarmwassernetz abgegeben. Die Wärmebereitstellung erfolgt über Niedertemperaturwärmepumpen und über eine Hochtemperaturwärmepumpe für die Warmwasserbereitung. Dezentrale Abluftanlagen sorgen für einen stetigen Luftwechsel in den Wohnungen. Natürliche Lüftung über die Fenster ist in allen Objekten möglich. Zur Deckung des elektrischen Energiebedarfs der Anlagentechnik ist eine Photovoltaikanlage auf dem Dach installiert.



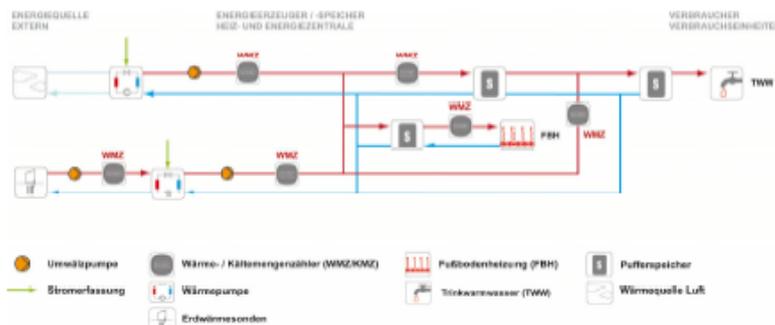
Wärmepumpe / Bivalenter Erzeuger

Hersteller	Dimplex	Elekt. Nennleistung	45 / 18 kW
Wärmeleistung	90 + 50 kW	COP (B0/W35)	4.3 / 5.0
Kühlleistung	- kW		
Luft-Wasser-WP	4 x 14 kW	Versorgung	TWW, Fußbodenheizung
Deckungsanteil	ca. 40 %		

Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Erdreich	Planung:	
Übertrager	Erdwärmesonden	Wärmeentzug	210 MWh/a
Anzahl	11	Wärmeeintrag	- kWh/a
Tiefe	135 - 200 m	spez. Entzugsleistung	49 W/m
Abstand	variiert	spez. Eintragsleistung	- W/m
Einbauort	neben dem Gebäude		

Messkonzept



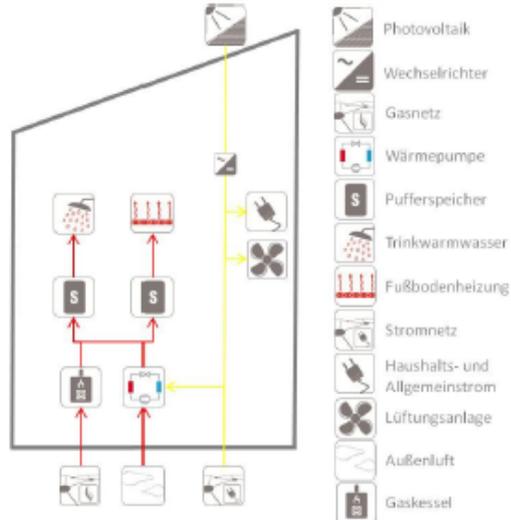


Mehrfamilienhaus Geb. 2

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



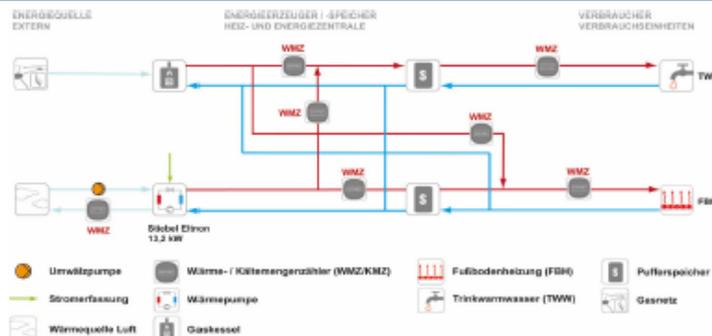
Wärmepumpe / Bivalenter Erzeuger

Hersteller	Stiebel-Eltron	Elekt. Nennleistung	4.21 kW
Wärmeleistung	13.2 kW	COP (A-7/W35)	3.14
Kühlleistung	- kW		
Gasbrennwertkessel	35.5 kW	Versorgung Gasbrennwertk.	TWW, Fußbodenheizung
Deckungsanteil	ca. 40 %		

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



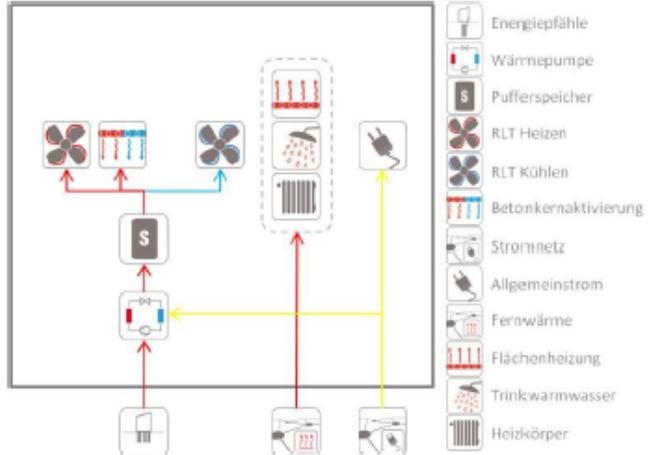


Bürogebäude Geb. 3

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



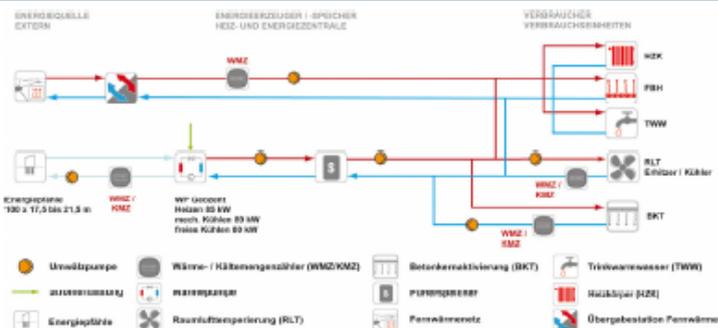
Wärmepumpe / Bivalenter Erzeuger

Hersteller	Zent-Frenger	Elekt. Nennleistung	36 kW
Wärmeleistung	85 kW	COP (B0/W35)	5.47
Kühlleistung (KM/FK)	89/80 kW		
Fernwärme	250 kW	Versorgung Fernwärme	TWW, stat.Heizung, Fußbodenheizung
Deckungsanteil	70 %		

Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Erdreich	Planung:	
Übertrager	Energiepfähle	Wärmeentzug	~ 75 MWh/a
Anzahl	101 Stk	Wärmeeintrag	~ 50 MWh/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



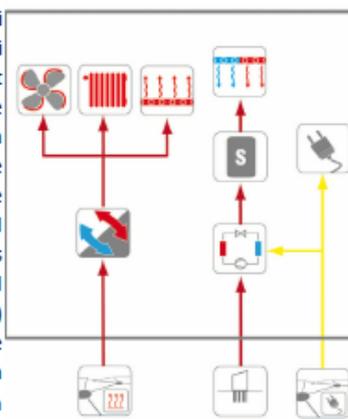


Borögebäude Geb. 4

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten	
Baujahr	2003	Beheiztes Gebäudevolumen (V_E)	119.000 m ³
Bruttogeschossfläche (BGF)	25.820 m ²	Jahresheizenergiebedarf (Q_H+Q_{TWW})	828 MWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	20.700 m ²	spez. Heizwärmebedarf (q_H+q_{TWW})	40 kWh/m ² a

Gebäude

Der Komplex besteht aus einem denkmalgeschützten Magazingebäude und zwei modernen Riegeln. Ein Atrium verbindet die drei Gebäudeteile miteinander. Im Winter versorgt eine erdgekoppelte Wärmepumpe die Betonkernaktivierung. Ergänzt wird das System durch einen Fernwärmeanschluss und eine Abluftwärmepumpe. An die Zusatzwärmeerzeuger sind Radiatoren und Plattenheizkörper, die Fußbodenheizung des Atriums sowie die Nacherhitzer der Zu- und Abluftanlagen (nur im Winter Betrieb) angebunden. Im Sommer kühlt die Betonkernaktivierung die Büroräume, die im freien Kühlbetrieb von den Energiepfählen versorgt wird.



- Fernwärmenetz
- Energiepfähle
- Wärmepumpe
- Pufferspeicher
- Fußbodenheizung
- Heizkörper
- Raumlufttemperierung
- Haushalts- und Allgemeinstrom
- Fernwärmeübergabestation
- Betonkerntemperierung

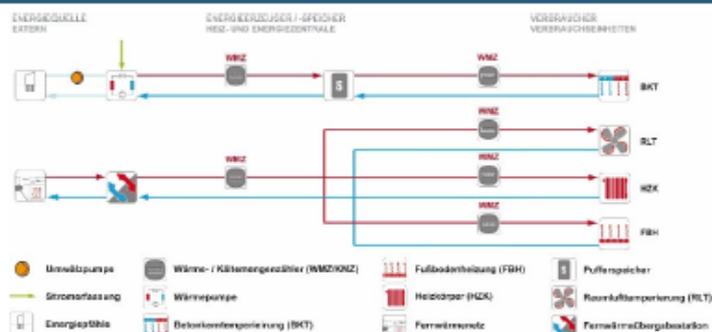
Wärmepumpe / Bivalenter Erzeuger

Hersteller	Viessmann SATAG	Elekt. Nennleistung	19 kW
Wärmeleistung	107 kW	COP (B0/W35)	5.6
Kühlleistung (FK)	150 kW		
Fernwärme	910 MWh/a	Versorgung Fernwärme	TWW, stat.Heizung, Fußbodenheizung
Deckungsanteil	85 %		

Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Erdreich	Planung:	
Übertrager	Energiepfähle	Wärmeentzug	85 MWh/a
Anzahl	196 Stk	Wärmeeintrag	85 MWh/a
Tiefe	8.5 m	spez. Entzugsleistung	k.A. W/m
Abstand	5.2 m	spez. Eintragsleistung	k.A. W/m
Einbauort	unterhalb des Gebäudes		

Messkonzept





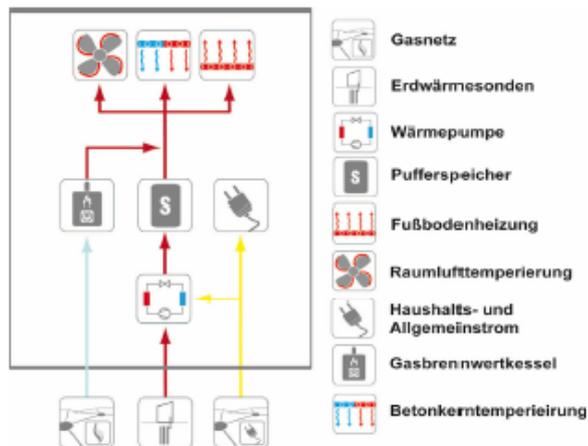
Bürogebäude Geb. 5

Allgemeine Angaben		Gebäudedaten	
Baujahr	2010	Beheiztes Gebäudevolumen (V_E)	m ³
Bruttogeschossfläche (BGF)	7.848 m ²	Jahresheizenergiebedarf (Q_H+Q_{TWW})	262 MWh/a
Nettogeschossfläche (NGF)	6.749 m ²	spez. Heizwärmebedarf (q_H+q_{TWW})	38,8 kWh/m ² a

Gebäude

Das umgebende Erdreich der Erdwärmesonden wird zur saisonalen Wärme- und Kältespeicherung genutzt und soll den Grundbedarf an Wärme und Kälte ohne den Einsatz aufwändiger Anlagentechnik decken. Für die Deckung von Spitzenlasten im Heizfall kann ein Gasbrennwertkessel zugeschaltet werden. Ganzjährig erfolgt die Kühlung der EDV über erdgekoppelte Splittergeräte. Die Betonkernaktivierung sowie RLT-Anlage und ggf. zusätzliche statische Heizkörper beheizen das Gebäude.

Im Kühlfall erfolgt die komplette Kühllastdeckung des Gebäudes über die erdgekoppelten reversiblen Wärmepumpen. Versorgt werden die Betonkernaktivierung, die Kühldecken in der Cafeteria und den Konferenzräumen sowie die RLT-Anlage.



Wärmepumpe / Bivalenter Erzeuger

Hersteller	Bluebox	Elekt. Nennleistung	kW
Wärmeleistung	79 kW	COP (B0/W35)	3.61
Kühlleistung (KM/FK)	113 kW		
Gasbrennwertkessel	200 kW	Versorgung Gasbrennwertk.	TWW, Radiatoren
Deckungsanteil	ca. 20 %		

Niedertemperaturwärmequelle und -übertrager

Quelle	Erdreich	Planung:	
Übertrager	Erdwärmesonden	Wärmeentzug	174 MWh/a
Anzahl	25 Stk	Wärmeeintrag	206 MWh/a
Tiefe	100 m	spez. Entzugsleistung	k.A. W/m
Abstand	5 - 6 m	spez. Eintragsleistung	k.A. W/m
Einbauort	neben dem Gebäude		

Messkonzept

