

BINE-Fachbuch

Wärmepumpen

Heizen – Kühlen – Umweltenergie nutzen

Die Autoren:

Constanze Bongs

Danny Günther

Sebastian Helmling

Thomas Kramer

Marek Miara

Thore Oltersdorf

Jeannette Wapler

LESEPROBE

Herausgeber

 **FIZ Karlsruhe**

Leibniz-Institut für
Informationsinfrastruktur

Fraunhofer IRB  **Verlag**

 **BINE**
Informationsdienst

BINE Informationsdienst berichtet über Themen der Energieforschung: Neue Materialien, Systeme und Komponenten, innovative Konzepte und Methoden. BINE-Leser werden so über Erfahrungen und Lerneffekte beim Einsatz neuer Technologien in der Praxis informiert. Denn erstklassige Informationen sind die Grundlage für richtungweisende Entscheidungen, sei es bei der Planung energetisch optimierter Gebäude, der Effizienzsteigerung industrieller Prozesse oder bei der Integration erneuerbarer Energien in bestehende Systeme.

Weitere Informationen finden Sie unter: www.bine.info

Für weitere Fragen steht Ihnen zur Verfügung:

Uwe Milles (Redaktion)

BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe, Büro Bonn

Kaiserstraße 185–197, 53113 Bonn

Tel. +49 2 28 92379-0, E-Mail: bine@fiz-karlsruhe.de, www.bine.info

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-9046-4 | ISBN (E-Book): 978-3-8167-9047-1

Layout: Dietmar Zimmermann | Umschlaggestaltung: Martin Kjer | Herstellung: Tim Oliver Pohl

Satz: Mediendesign Späth GmbH, Birenbach | Druck: DZA Druckerei zu Altenburg GmbH, Altenburg

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Titelbild: © Viessmann Werke GmbH & Co. KG

Umschlagrückseite (v. l.): Bosch Thermotechnik GmbH, Buderus Deutschland. Abgebildete Personen:

Ulf Stuckenberg und Buderus-Außendienstmitarbeiter Dirk Sydekum / Bundesverband Wärmepumpen / Schandog HK-Technik GmbH

© by FIZ Karlsruhe

Verlag und Vertrieb:

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 970-2500

Telefax +49 7 11 970-2508

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Hinweis zu den Abbildungen: Soweit nachfolgend keine anderen Quellen genannt werden, stammen die Abbildungen von den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
1 Wärmepumpen – ein effizienter Weg zur Behaglichkeit	11
2 Thermodynamisches Heizen mit Wärmepumpen	13
2.1 Geschichte	13
2.2 Übersicht zur Marktsituation in verschiedenen Ländern und Zukunftsszenarien	14
2.2.1 Allgemeine Trends	15
2.2.2 Charakteristik der Marktsituation in ausgewählten Ländern	16
2.3 Funktion der Wärmepumpe	17
2.3.1 Der ideale Wärmepumpenprozess im $\log(p)$ -h-Diagramm	19
2.3.2 Der ideale Wärmepumpenprozess im T-s-Diagramm	20
2.3.3 Unterschied zwischen realem und idealem Wärmepumpenprozess	22
2.3.4 Charakteristik der Wärmepumpe	23
2.4 Effizienzkennzahlen	24
2.5 Wärmepumpensysteme	27
2.5.1 Verdichter, Expansionsventile und periphere Komponenten	27
2.5.2 Leistungsregelung	35
2.5.3 Möglichkeiten unterschiedlicher Fluidkreise (1-, 2-, 3-Kreis-Systeme)	37
2.6 Thermisch angetriebene Wärmepumpen	39
2.7 Großwärmepumpen	42
2.8 Von Passivhausanwendung bis Altbausanierung – Lösungen für spezifische Anforderungen	45
2.8.1 Neubau	45
2.8.2 Altbau – Sanierung	46
2.9 Kältemittelauswahl	48
2.9.1 Die Entwicklung der Kältemittel – ein chronologischer Rückblick	48
2.9.2 Einteilung von Kältemitteln in Normen, Richtlinien und Vorschriften	50
2.9.3 Bezeichnung von Kältemitteln und chemische Einteilung	51
2.9.4 Zusammenfassung	55
3 Wärmepumpenheizungen	56
3.1 Begriffe und Benennungen	56
3.2 Wärmequellen	57
3.2.1 Anforderungen und Auswahl	57
3.2.2 Wärmequelle Erdreich	59
3.2.3 Wärmequelle Grundwasser	72
3.2.4 Wärmequelle Außenluft	74

3.2.5	Details zum Luftkühler/Verdampfer	77
3.2.6	Anwendungsgebiete von Außenluft-Wärmepumpen	77
3.2.7	Wärmequelle Abluft	77
3.3	Schallproblematik und Lösungsvorschläge	78
3.4	Kombination der Wärmepumpen mit thermischen Solaranlagen	80
3.4.1	»Konventionelles« System	80
3.4.2	Solarwärme als Wärmequelle der Wärmepumpe	81
3.4.3	Solarwärme als Wärmequelle der Wärmepumpe – Anlagenbeispiele	81
3.4.4	Systembewertung	83
3.5	Wärmenutzungsanlage	83
3.5.1	Raumheizung	84
3.5.2	Trinkwassererwärmung	88
3.6	Raumkühlung	90
3.7	Dimensionierung und Betriebsarten von Wärmepumpen	91
3.7.1	Dimensionierung der Wärmepumpe	91
3.7.2	Betriebsarten	93
3.7.3	Dimensionierung, Betriebsart und Anteil an Heizarbeit	98
3.7.4	Auslegungsbeispiele für monovalenten, bivalenten und monoenergetischen Betrieb	99
4	Bewertung der Wärmepumpen	101
4.1	Wirtschaftliche Bewertung	101
4.1.1	Berechnung der Wärmegestehungskosten	101
4.1.2	Annuitätenmethode	102
4.1.3	Kapitalgebundene Kosten	102
4.1.4	Verbrauchsgebundene Kosten	103
4.1.5	Betriebsgebundene Kosten	104
4.1.6	Sonstige Kosten	105
4.1.7	Kostenvergleich verschiedener Heizungssysteme	105
4.2	Energetische Bewertung	109
4.2.1	Energieflussbilder und Primärenergieeinsparung	109
4.2.2	Effizienz und Effektivität (warum die Arbeitszahlen nicht die ganze Wahrheit sagen)	112
4.3	Schadstoffemissionen und Treibhauseffekt	115
4.3.1	Schadstoffemissionen	115
4.3.2	Treibhausgas-Emissionen	116
4.3.3	Einflüsse der Kältemittel	119
5	Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Monitoringprojekten	122
5.1	Einführung – Bedeutung von Monitoringprojekten	122

5.2	Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus unterschiedlichen Monitoringprojekten . . .	122
5.3	Studien aus unterschiedlichen Ländern (Auszug)	123
5.3.1	Schweiz: Feldstudie FAWA	123
5.3.2	Großbritannien: »A field trial of heat pumps«	123
5.3.3	Europa: »SEPOMO-BUILD«	124
5.3.4	Deutschland: Monitoringprojekte des Fraunhofer ISE	125
5.4	Best Practice	129
6	Wärmepumpen im Smart Grid – Wärmepumpe und PV	132
6.1	Herausforderung Energiewende	132
6.2	Vision Smart Grid & Smart Market	133
6.3	Die Wärmepumpe im intelligenten Versorgungssystem	134
6.4	Wärmepumpen und Photovoltaik	136
7	Die Effizienz der eigenen Anlage testen	137
7.1	Wärmemengenzähler	138
7.2	Elektrozähler	138
7.3	Anwendungsbeispiele	139
7.4	Ermittlung der Arbeitszahl (AZ)	140
7.5	Weitere Hinweise	141
8	Forschungsausblick	142
8.1	Übersicht zur Forschungsförderung von Wärmepumpen in Deutschland	142
8.2	Laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben	143
8.3	Forschungsberichte	148
9	Liste der Normen und Richtlinien	151
10	Zitierte Literatur und Abbildungsverzeichnis	155
10.1	Zitierte Literatur	155
10.2	Abbildungsverzeichnis	159
10.3	BINE Informationsdienst	161
11	Weiterführende Literatur	162
12	Organisationen	164
13	Autoren	165

Vorwort

Heizungsanlagen mit Wärmepumpen werden seit mehr als 60 Jahren zur Beheizung von Wohngebäuden eingesetzt. Die Technik ist heute ausgereift. Fachmännisch verlegte Anlagen können sowohl wirtschaftlich wie ökologisch gegenüber anderen Heizsystemen gut bestehen. Im Laufe des Betriebs gleichen niedrigere laufende Kosten für Energie bei der Wärmepumpe die ursprünglich höheren Investitionskosten im Vergleich zu anderen Systemen aus. Mit dem wachsenden Anteil regenerativ erzeugten Stroms verbessert sich auch die Umweltbilanz der Wärmepumpentechnik fortlaufend.

Auf dem deutschen Heizungsmarkt haben sich elektrisch betriebene Wärmepumpen als feste Größe etabliert. Ihr Marktanteil lag in den letzten Jahren zwischen acht und zehn Prozent. Nahezu jeder dritte Neubau wird mittlerweile mit einer Wärmepumpe beheizt. Dominierten vor einigen Jahren noch die erdgekoppelten Systeme, so verschiebt sich dies aktuell in Richtung der Außenluftwärmepumpen.

Eine Wärmepumpe kann nur dann ihre ökonomischen und ökologischen Stärken ausspielen, wenn Wärmequelle, die eigentliche Wärmepumpe sowie die Wärmeverteilung und Warmwasserversorgung im Haus exakt aufeinander abgestimmt sind. Dieses Buch liefert hierfür die notwendigen Grundlagen. Vorgestellt werden neben den technischen Grundlagen auch die neusten Trends bei Komponenten, die Großwärmepumpen und die Möglichkeiten des Einsatzes in besonders energieeffizienten Gebäuden, wie zum Beispiel dem Passivhaus. Auch der kombinierte Einsatz von Wärmepumpen mit thermischer Solarenergie sowie ein eigener Abschnitt über Raumkühlung runden das Buch ab. Breiten Raum nehmen auch die Erfahrungen aus europäischen Monitoringprojekten und was man hieraus für die Installation von Anlagen lernen kann ein. Interessante neue Perspektiven für die Wärmepumpe eröffnen sich auch durch das sogenannte intelligente Stromnetz der Zukunft (smart grid). Auch in Zukunft wird es bei der Wärmepumpentechnik neue Fortschritte zu verzeichnen geben, die Energieforschung arbeitet bereits daran.

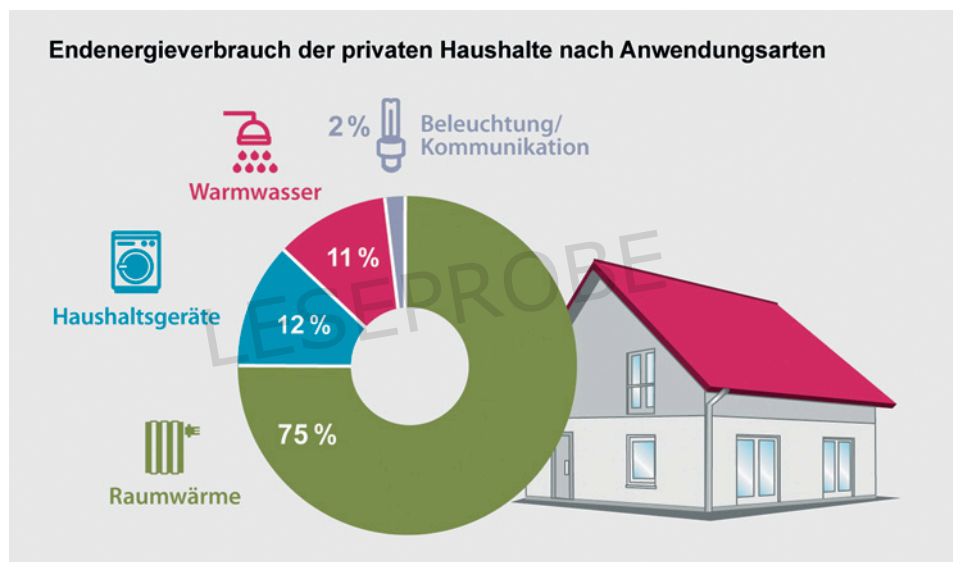
FIZ Karlsruhe GmbH
BINE Informationsdienst

LESEPROBE

1 Wärmepumpen – ein effizienter Weg zur Behaglichkeit

Das Bedürfnis von Wärme ist ein Grundbedürfnis aller Menschen. So freuen wir uns besonders, wenn wir von anderen eine »menschliche Wärme« spüren. Im Gegensatz dazu fühlen wir uns in der Gesellschaft von »kalten Personen« oft schlecht. Ebenso empfindlich sind wir gegenüber Kälte, die unser Körper spürt. Das Empfinden von Kälte ist für Menschen äußerst unangenehm und wir merken sehr schnell, wenn wir unsere behagliche Komfortzone verlassen. In der westlichen Gesellschaft ist es mittlerweile selbstverständlich, dass wir ganzjährig in unseren Wohnungen, Büros, öffentlichen Gebäuden, Autos und allen anderen geschlossenen Räumen nicht frieren und eine angenehme Wärme spüren. Und zwar unabhängig von den Außentemperaturen. Kurz gesagt, wir empfinden die Temperatur der Luft, die uns umgibt, als angenehm, wenn diese in bestimmten Bereichen liegt. Dies hängt von Aktivitäten, die wir gerade ausüben, unserer Bekleidung, der Luftbewegung und der Luftfeuchte ab. Der Komfortbereich deckt sich in unserer Klimaregion oft nicht mit dem Bereich, in dem die Außentemperaturen liegen. Wir erwarten und verlangen, dass diese Diskrepanz mit technischen Geräten ausgeglichen wird.

Es stehen ausreichend technische Mittel zur Verfügung, um den Ausgleich sicherzustellen. Dies passiert allerdings nicht umsonst. Für die Bereitstellung von Wärme und Kälte werden ca. 40 % des deutschen Endenergieverbrauchs benötigt. Obwohl der Bedarf für die Heizung oftmals unterschätzt wird, entfallen tatsächlich über 85 % des Endenergieverbrauchs in den Haushalten auf die Bereiche Raumwärme und Warmwasser (Abb. 1). Angesichts des fortschreitenden Klimawandels sowie der Ressourcenknappheit ist es dringend notwendig, zuerst den erforderlichen Heizwärmebedarf zu reduzieren und anschließend die notwendige Wärme – und zunehmend auch Kälte – möglichst effizient und ökologisch bereitzustellen. Die Wärmepumpentechnologie ist in der Lage, diesen Anforderungen gerecht zu werden.



■ **Abb. 1:** Energieverbrauch nach Anwendungen im Haushalt

Wärmepumpen haben bereits eine sehr lange Geschichte hinter sich. Als kurz vor dem Beginn des Zweiten Weltkriegs eine Energiekrise in der Schweiz eintrat, kamen Wärmepumpen erstmalig breit zum Einsatz. In Zürich wurden unter anderem das Rathaus (bis dato), das Kongresshaus, ein Hallenbad sowie mehrere Amtshäuser mit einer Wärmepumpe beheizt (vgl. Kap. 2.1). Der Nachweis der Praxistauglichkeit war damit erbracht. In Deutschland sorgte bis zum Ende des letzten Jahrhunderts vor allem ein hoher Wärmepreis dafür, dass hier diese Technologie eine Begleiterscheinung von Energiekrisen blieb und sich nur schleppend weiterentwickeln konnte. Heute ist es eine ausgereifte Technik, die vielerorts eingesetzt und erprobt wurde. Von Einfamilienhäusern bis mehrstöckigen Bürogebäuden, von industriellen Anwendungen bis zur Kälte- und Wärmeversorgung ganzer Stadtteile, sogar zum Beheizen von Brücken und dem Freihalten von Eis und Schnee von Parkplätzen – überall dort arbeiten Wärmepumpen.

Das Besondere an der Wärmepumpentechnologie ist, dass sie zur Bereitstellung von Wärme (und Kälte) auch Umweltenergie nutzt. Dies kann Energie aus dem Erdreich, dem Grundwasser oder der Luft sein, ebenso aus Abwärme oder Abwasser. Die restliche Energie wird meistens in Form von elektrischer Energie zugeführt. Spezielle Wärmepumpen arbeiten mit Wärme aus der Verbrennung von Erdgas oder anderen höherwertigen Energieträgern. Je mehr Umweltenergie und weniger Elektroenergie bzw. fossile Brennstoffe eine Wärmepumpe benötigt, desto effizienter arbeitet sie. Dies bringt sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Vorteile mit sich.

LESEPROBE

2 Thermodynamisches Heizen mit Wärmepumpen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Geschichte sowie den Grundlagen und der Funktionsweise der Wärmepumpen. Beschrieben werden die wichtigsten Komponenten sowie neue Trends aus der Entwicklung. Beispielhaft sind leistungsgeregelte Verdichter oder neuartige Expansionsventile zu erwähnen. Anschließend geht es dann um die sogenannten »Großwärmepumpen« sowie die zunehmend wichtiger werdenden thermisch angetriebenen Wärmepumpen. Neu ist auch das Thema »Von Passivhaus bis Altbausanierung – richtige Lösungen für spezifische Anforderungen«. Den Abschluss bildet das Thema Kältemittel.

2.1 Geschichte

Der französische Physiker Sadi Carnot hat im Jahr 1824 mit dem Kreisprozess den Nachweis der bestmöglichen thermodynamischen Maschine für die Erzeugung mechanischer Arbeit erbracht und mit dem Begriff der Irreversibilität den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik beschrieben. Die Umkehrung des Carnotschen Kreisprozesses zu einem Linksprozess führte 1834 durch das Patent von Jakob Perkins zur Entwicklung der modernen Kaldampfmaschine. Das Arbeitsprinzip der Wärmepumpe, mithilfe eines thermodynamischen Kreisprozesses Wärme auf ein höheres Temperaturniveau zu »pumpen«, beschrieb im Jahre 1852 der englische Physiker William Thomson (Lord Kelvin) mit seinem mechanischen System zur Beheizung oder Kühlung von Gebäuden [1], [2]. Der Begriff »Wärmepumpe« wurde wahrscheinlich zum ersten Mal von G. Flügel im Jahre 1920 in Deutschland geprägt [3]. Die ersten Anwendungen des Wärmepumpenprinzips für die Gebäudeheizung erfolgten in den 20er und 30er Jahren des letzten Jahrhunderts [4].

Im Gegensatz zur Kälteanlage, bei der es bisher keine konkurrierenden Verfahren für die kontinuierliche Kühlung gibt, steht die Wärmepumpe mit allen üblichen irreversiblen direkten Heizverfahren, also Gas-, Öl-, Holz-, Kohle- und elektrischer Heizung im Wettbewerb. Wesentliche Impulse zum Einsatz der Wärmepumpe für die Gebäudeheizung ergaben sich daher aus

Art/Jahr	Heizleistung kW	Arbeitszahl	Vorlauftemperatur	Wärmequelle	Zusatzheizung	Verwendung
Rathaus 1938	Ges. 175 WP 81	2	Wasser 60 °C	Flusswasser	elektr. 65 kW auf Speicher	Gebäudeheizung
Kongresshaus 1939	58 Kühlen: 31	2,5	Luft 30–40 °C	Luft	keine	Klimatisierung
Hallenbad 1941	1 500	3,5–8	Wasser 23 u. 45 °C	Flusswasser Abwasser Trafoabwärme	elektr. 2 000 kW auf Speicher	Gebäudeheizung Wassererwärmung
Fernheizwerk ETH 1942	7 000	3	Wasser 70 °C	Flusswasser	Heizwerk	Gebäudeheizung
Amtshäuser 1943	1 750	4	Wasser 50 °C	Flusswasser	vorhandene Heizanlage	Gebäudeheizung

■ **Abb. 2:** Auswahl von Wärmepumpen in Zürich während des Zweiten Weltkriegs

der ersten Energiekrise in der Schweiz während des Zweiten Weltkriegs. Weil Kohlelieferungen ausblieben, bauten Schweizer Ingenieure vorbildliche Wärmepumpen. In der Abb. 2 werden Beispiele für solche Installationen in der Stadt Zürich vorgestellt.

Nach dem Krieg erlosch erst einmal in der Schweiz das Interesse, da auf dem Markt wieder ausreichend Kohle und Öl beschafft werden konnten.

In den 1950er Jahren gab es in den USA den ersten Wärmepumpenboom. Mit dem Wunsch nach mehr Wohn- und Bürokomfort waren dort Luft/Luft-Wärmepumpen für den Kühlbetrieb im Sommer und den Heizbetrieb im Winter sehr beliebt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass in den USA der Wärmepumpenmarkt stets mit dem Klimagerätemarkt verbunden war. Wenn die Notwendigkeit zur Klimatisierung von Gebäuden im Sommer gegeben ist, wird der Schritt zur Wärmepumpe im Winter erleichtert.

In Deutschland wurden in den 1950er Jahren bereits interessante Entwicklungen von Kleinwärmepumpen für die Warmwasserbereitung vorgestellt, die aber erst in den 1970er Jahren einen wirtschaftlichen Durchbruch erzielten [5].

Vor 1970 arbeiteten in der Bundesrepublik Deutschland nur kleinere Anlagen in Landwirtschaftsbetrieben zur Milchkühlung und gleichzeitiger Wassererwärmung sowie größere Anlagen zur Erwärmung von Freibädern und zur Wärmerückgewinnung in Großbauten und in der Industrie. Die Wärmepumpe wurde als alternative Heizungstechnologie erst Mitte der 1970er Jahre gefördert und entwickelt. Die Unsicherheit der künftigen Preise für Heizöl war wesentlicher Antrieb für diese Technik. Nach dem zweiten Ölpreisschock 1979/80, der massive Preissteigerungen für fossile Energieträger brachte, stellte sich eine starke Marktbelebung für die Wärmepumpe in Deutschland und Europa ein. Die Auswirkungen waren sehr rasches Wachstum, sehr viele Anbieter und große Erwartungen bezüglich der Marktchancen. Die Wärmepumpe als bivalentes oder monovalentes Heizsystem und die Warmwasserwärmepumpe waren zu dieser Zeit die Lösung für die Probleme der Versorgungsunsicherheit und Preisentwicklung bei Heizöl.

Mit dem drastischen Rückgang der Ölpreise von 1982 bis Ende der 1980er Jahre sank der Bedarf nach Heizungswärmepumpen dramatisch [6]. Seit Mitte der 1990er Jahre stieg jedoch mit dem Ölpreis auch die Nachfrage für Heizungswärmepumpen wieder kontinuierlich an. Aktuell wird vielerorts von einem Wärmepumpenboom gesprochen. In Deutschland haben sich die Wärmepumpen als feste Größe auf dem Heizungsmarkt etabliert.

2.2 Übersicht zur Marktsituation in verschiedenen Ländern und Zukunftsszenarien

In den letzten Jahren wurden in Europa jährlich ca. 750 000 Wärmepumpenanlagen verkauft. Die Bedeutung und Popularität der Wärmepumpen ist allerdings in den verschiedenen Ländern sehr unterschiedlich. Es gibt viele Aspekte, die über die Marktstellung dieser Technologie entscheiden. Zu den Wichtigsten gehören der Strompreis sowie der Preis anderer Energieträger, die energetische Infrastruktur des Landes (z. B. gut ausgebaute Erdgasnetze), der Wohlstand sowie das ökologische Bewusstsein der Bevölkerung als auch die geografische Lage und die damit verbundenen klimatischen Bedingungen. Dazu kommen politisch-unterstützende Maßnahmen wie Förderung, gut funktionierende Industrieverbände und Beratungsstellen sowie begleitende Forschung und Entwicklung. Sogar kulturelle Aspekte können eine Rolle spielen.

In Europa lassen sich die Länder mit ähnlicher Marktsituation der Wärmepumpen in drei Gruppen einordnen. Beispiele von einzelnen Ländern werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels beschrieben.

- Die erste Gruppe bilden Länder mit sehr ausgeprägtem Wärmepumpenmarkt, wie die skandinavischen Länder (insbesondere Schweden) und die Schweiz. In beiden Ländern liegt der Anteil von Wärmepumpeninstallationen in neuen Wohngebäuden bei über 80 %.
- Zu der zweiten Gruppe gehören Länder mit (meistens) stabilem aber – im Vergleich mit anderen Wärmeversorgungsanlagen – nicht dominantem Wärmepumpenmarkt. In Ländern wie Frankreich oder Deutschland beträgt der Anteil von Wärmepumpeninstallationen in neuen Wohngebäuden ca. 25 %. In Deutschland variiert der Anteil stark nach Bundesländern. Obwohl Frankreich mit knapp 120 000 verkauften Einheiten im Jahr 2011 den zweiten Platz in Europa belegt hat, entwickelt sich der französische Wärmepumpenmarkt aufgrund unstabiler Förderpolitik äußerst turbulent.
- In der dritten Gruppe von Ländern spielen die Wärmepumpen auf dem Heizungsmarkt zurzeit eine sehr kleine Rolle und liegen bei neuen Wohngebäuden meistens deutlich unter 5 %. Bei einigen Ländern aus dieser Gruppe ist allerdings eine sehr schnelle Entwicklung zu beobachten. Beispielhaft zu nennen sind Belgien, Großbritannien und Polen.

2.2.1 Allgemeine Trends

Ungeachtet der lokalen Unterschiede gibt es auf dem europäischen Wärmepumpenmarkt mehrere gemeinsame technologische Trends und Themen, die in Zukunft noch mehr an Bedeutung gewinnen werden.

- Seit einigen Jahren wächst der Anteil von Anlagen mit der Wärmequelle Außenluft (nachfolgend: Luft-Wärmepumpe) gegenüber denen mit Erdreich. Die kostengünstigere Erschließung der Wärmequelle ist dabei meistens entscheidend. Ein weiterer Grund für die steigende Popularität der Luft-Wärmepumpen ist die steigende Effizienz dieser Geräte. Unter anderem wird dies begünstigt durch den Trend zu leistungsgeregelten Verdichtern (vgl. Kap. 2.5.2). Diese Technologie ermöglicht eine höhere Effizienz im Teillastbetrieb sowie die bessere Anpassung der Anlagenleistung an den – je nach Außentemperatur – fluktuierenden Heizbedarf des Gebäudes. Noch ein Grund für den steigenden Erfolg der Luft-Wärmepumpen ist der Zuwachs der Wärmepumpenanlagen bei der Sanierung von Wohngebäuden. Dabei ist die Erschließung der Wärmequelle Erdreich häufig nicht möglich bzw. sehr umständlich.
- Neben der Luft als Wärmequelle wächst die Bedeutung von reversiblen Wärmepumpen, die sowohl Heizen als auch Kühlen können. Diese Entwicklung hat zwei Gründe: Erstens wächst in Ländern, in denen Wärmepumpen bislang für reine Heizzwecke genutzt wurden, auch in privaten Haushalten das Bedürfnis der Kältenutzung. Hohe Außenlufttemperaturen, die auch in nördlichen Ländern im Sommer zunehmend auftreten, werden diesen Trend verstärken. Der zweite Grund ist die Veränderung und Globalisierung des Wärmepumpenmarktes. Asiatische Hersteller, die traditionell Klimaanlage verkauft haben, bieten auf dem europäischen Markt zunehmend reversible Geräte an, die auch für Heizzwecke gedacht sind. Die reinen Heizungsfirmen haben dagegen angefangen, auch die Kälteerzeugung zu berücksichtigen. Als Ergebnis dieses Trends ist auf dem Markt eine interessante Preisentwicklung sowie eine Vermischung und Bereicherung von technologischen Lösungen zu sehen.

- Ein weiteres Thema (ausführlicher: Kap. 6) ist die mögliche Rolle der Wärmepumpenanlagen im Stromnetz der Zukunft (Smart Grid). Dank der Fähigkeit, die elektrische Energie effizient in thermische Energie umzuwandeln und diese für eine bestimmte Zeit zu speichern, können Wärmepumpenanlagen mit einer intelligenten Steuerung stabilisierend hinsichtlich der fluktuierenden Stromerzeugung eingesetzt werden. Damit ist auch zum Teil die zunehmende Popularität der reinen Warmwasserwärmepumpen zu erklären. Solche Systeme können gekoppelt mit einer Photovoltaikanlage eine sehr gute und günstige Lösung für die Erwärmung des Brauchwassers darstellen und die vorteilhafte Nutzung eigenerzeugter elektrischer Energie optimieren.
- Drei weitere Trends sind mit dem Einsatz der Wärmepumpen in Bestandsgebäuden verbunden. Hierbei ist eine höhere Systemtemperatur erforderlich, um den notwendigen Heizenergiebedarf abzudecken. Für diesen Zweck wurden Hochtemperaturwärmepumpen entwickelt, die zunehmend auf dem Markt zu finden sind. Die Anlagen aus dieser Klasse sind in der Lage, Temperaturen von 65 °C und höher bereitzustellen. Für hohe Temperaturniveaus sind (auch) thermisch angetriebene Wärmepumpen gut geeignet (vgl. Kap. 2.6). Diese Technologie spielt auf den Märkten noch keine große Rolle, aber die steigenden Verkaufszahlen in den letzten Jahren deuten auf eine wachsende Relevanz der thermisch angetriebenen Wärmepumpen in der Zukunft hin. Der dritte Trend in dieser Gruppe sind die sogenannten Hybridsysteme, bei denen die meistens fossil betriebenen Kessel mit elektrisch betriebenen Wärmepumpen kombiniert werden. Besonders beim Austausch alter Heizkessel in Bestandsgebäuden kann diese Technologie in den nächsten Jahren an Relevanz gewinnen.

2.2.2 Charakteristik der Marktsituation in ausgewählten Ländern

Deutschland [7]

Die ersten großen Erfolge haben Wärmepumpen in Deutschland Anfang der 1980er Jahre gefeiert. Aufgrund unzureichender Effizienz und mangelnder Zuverlässigkeit damaliger Wärmepumpenanlagen, verbunden mit massiver Kostenabsenkung von fossilen Energieträgern, ist der Markt allerdings sehr schnell zusammengebrochen. Nach der Jahrtausendwende hat wiederum ein Aufwärtstrend eingesetzt. Seit dem Jahr 2006 wurden in Deutschland jährlich mehr als 50 000 Wärmepumpenanlagen verkauft. Der Anteil von Wärmepumpeninstallationen in neuen Wohngebäuden beträgt mittlerweile ca. 25 %. Bis 2010 überwogen bei den Verkaufszahlen die Erdreichanlagen, seither sind es die Luft/Wasser-Wärmepumpen. Gründe dafür sind günstigere Preise für die Wärmequellenerschließung sowie komplizierte und oft aufwendige Genehmigungsprozeduren für Erdwärmesonden. Die reversiblen Luft/Luft-Wärmepumpen spielen in Deutschland bislang eine untergeordnete Rolle. In der Zukunft ist mit einem Zuwachs von leistungsstärkeren (>50 kW) Wärmepumpenanlagen sowie Anlagen für Sanierungsfälle zu rechnen.

Schweden

Schweden ist ein Land mit langer Tradition in der Nutzung von Wärmepumpen. Relativ niedrige Preise der Installationen, niedrige Strompreise (14 Cent/kWh), gute Akzeptanz der Technologie bei der Bevölkerung, schlecht ausgebaute Erdgasnetze sind Gründe für eine hohe Popularität der Wärmepumpen seit Jahren. Bei neu gebauten Einfamilienhäusern ist diese Technologie konkurrenzlos (ihr Anteil in neuen Einfamilienhäusern liegt bei 95 %). Bei Mehr-

familienhäusern ist die Nahwärme die dominierende Lösung, aber auch in diesem Bereich sind die Absatzzahlen von Wärmepumpen steigend. In Schweden hat sich, entgegen der allgemeinen Entwicklung in Europa, die Luft/Wasser-Wärmepumpe nicht durchgesetzt. Die Gründe für den großen Anteil der Erdreich basierten Anlagen (meistens mit Erdwärmesonden) sind die liberalen Genehmigungsverfahren, für das Bohren günstiger – meistens felsiger – Untergrund sowie relativ niedrige Bohrkosten für Erdwärmesonden. Bei der Altbausanierung und kleinen Geschäften sind die Luft/Luft-Wärmepumpen sehr populär. Kleine Split-Geräte ersetzen oder ergänzen oft eine direktelektrische Heizung.

Polen

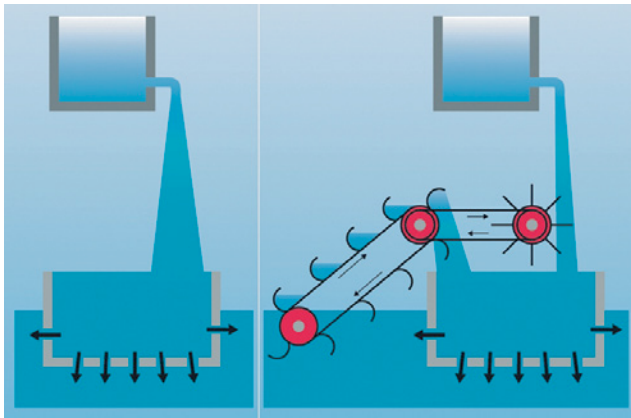
Der polnische Wärmepumpenmarkt ist sehr jung und dynamisch. Im Jahr 2011 wurden in Polen ca. 10 000 Wärmepumpen verkauft, fünf Jahre zuvor waren es noch um die 2 000. In den letzten Jahren ist ein starker Zuwachs bei reinen Brauchwasserwärmepumpen zu beobachten. Oft ersetzen diese Geräte eine direkt elektrische Erwärmung des Brauchwassers. Ähnlich wie in Schweden, dominieren bei den weiteren Wärmepumpentypen die erdgekoppelten Anlagen. Die polnische Energieversorgung basiert nach wie vor auf Stein- und Braunkohle, was zu sehr hohen CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung führt. Diese Tatsache, zusammen mit den relativ hohen Preisen für Wärmepumpenanlagen im Vergleich zu anderen Heiztechnologien, sowie fehlende staatliche Unterstützung, erschwert eine schnelle Entwicklung der Wärmepumpentechnologie in Polen.

Japan

In Japan werden mehr Wärmepumpen verkauft als in ganz Europa. Der japanische Wärmepumpenmarkt ist sehr gut entwickelt und fest etabliert. Es handelt sich dabei meistens um reversible Luft/Luft-Wärmepumpen sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen. Die Sole/Wasser-Wärmepumpen kommen in Japan nur selten vor. Die letzte Dekade hat dank konsequenter Förderung durch die Politik (z. B. das »Top Runner Program«) und Anstrengungen der Hersteller eine signifikante Steigerung der Effizienz gebracht. Seit 2003 werden auch immer mehr Wärmepumpen zur Erwärmung des Brauchwassers eingesetzt. Nach dem steilen Anstieg der Verkaufszahlen in den letzten Jahren wurden im Jahr 2011 mehr als 500 000 Warmwasser-Wärmepumpen verkauft. In Japan heißen Geräte dieser Kategorie »EcoCute« und nutzen das natürliche Kältemittel Kohlendioxid (CO₂).

2.3 Funktion der Wärmepumpe

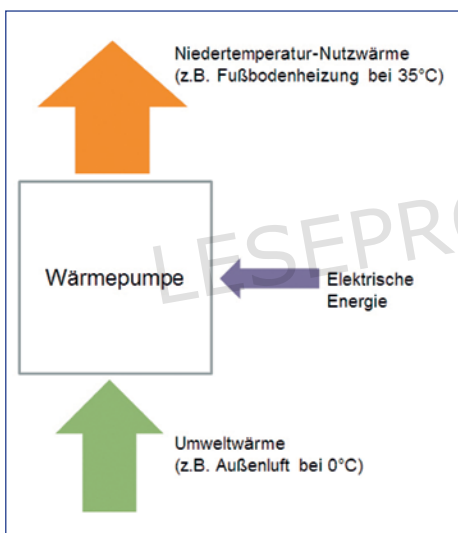
Das Haupteinsatzgebiet von Wärmepumpen und den übrigen Wasserheizsystemen, z. B. Gas- oder Ölkesseln, liegt in der Erzeugung von Heizwärme. Genauer betrachtet, in der Bereitstellung eines Wärmestromes auf einem bestimmten Temperaturniveau. Dieser Wärmestrom wird genutzt, um die Innenraumtemperatur eines Gebäudes aufrechtzuerhalten und/oder Trinkwarmwasser zur Verfügung zu stellen. Für diese Anwendungen wird Heizwärme auf niedrigem Temperaturniveau benötigt. Konventionelle Wärmeerzeuger verbrennen hierfür fossilen Brennstoff bei sehr hohen Temperaturen. Thermodynamisch betrachtet bedeutet die direkte Umwandlung der Verbrennungswärme von bis zu 800 °C in Niedertemperatur-Heizwärme bei ca. 30–80 °C eine starke Entwertung dieser Energie. Wärmepumpen hingegen nutzen höherwertige Energie, wie Strom, Erdgas oder Hochtemperaturwärme, um Wärme, die sie aus der Umgebung aufnehmen, auf ein höheres Temperaturniveau anzuheben. Ähnlich wie diese häufig verwendete bildhafte Beschreibung für den Wärmepumpenprozess zeigt die Abb. 3 ein



■ **Abb. 3:** Analogiemodell links: ohne »Wärmepumpe« rechts: mit »Wärmepumpe«

Analogiemodell, das die Funktionsweise einer Wärmepumpe mithilfe eines hydraulischen Modells veranschaulicht.

Ähnlich wie Wasser von allein nur bergab fließt, so »fließt« Wärme von selbst nur in Richtung geringerer Temperatur. Ein Gebäude, das im Winter Wärme an seine Umgebung abgibt und daher beheizt werden muss, wird hier mit einem undichten Behälter abgebildet, der ständig Wasser an seine Umgebung verliert und deshalb nachgefüllt werden muss. Das Wasser fließt aus einem höher gelegenen Reservoir nach, das die hochwertige Energie symbolisiert (linkes Bild). Nutzt man die Höhendifferenz zwischen dem oberen Reservoir und dem Wasserbehälter zum Antrieb eines Schöpfwerkes (rechtes Bild), kann Wasser aus der Umgebung in den unteren Behälter gefördert werden. Der Behälter wird jetzt also sowohl mit dem umgebenden Wasser als auch aus dem Reservoir nachgefüllt. In diesem, die Wärmepumpe beschreibenden Konzept, wird somit weniger Wasser aus dem oberen Reservoir, also weniger höherwertige Energie, benötigt als bei dem Analogiemodell des konventionellen Heizsystems. Diesem Analogiemodell lässt sich ableiten: Mithilfe hochwertiger Energie, z. B. Erdgas, Strom oder Hochtemperaturwärme, kann das Gebäude entweder direkt beheizt oder Umweltwärme auf ein



■ **Abb. 4:** Schematische Energieflüsse bei einer Kompressionswärmepumpe

Temperaturniveau angehoben (gepumpt) werden, das zur Beheizung eines Gebäudes oder zur Trinkwassererwärmung geeignet ist.

Die Abb. 4 zeigt schematisch die Energieflüsse bei einer Kompressionswärmepumpe. Umweltwärme kann beispielsweise der Außenluft, dem Erdreich oder dem Grundwasser entzogen werden (vgl. Kap. 3.2). Als hochwertige Energie zum Antrieb des Kompressors kommen u. a. elektrische Energie oder fossile Brennstoffe in Frage.

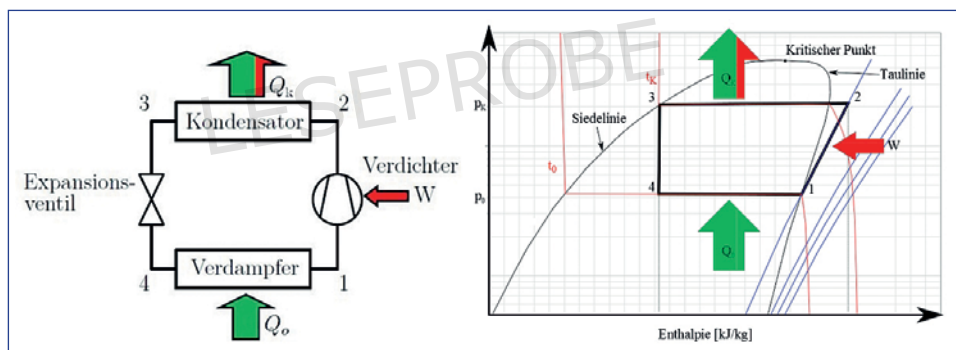
2.3.1 Der ideale Wärmepumpenprozess im $\log(p)$ -h-Diagramm

Die Funktionsweise einer Wärmepumpe entspricht thermodynamisch der des allseits für seine Zuverlässigkeit bekannten Kältschranks. Lediglich der Zweck ist ein anderer. Bei einem Kältschrank wird dem Kühlgut über den Verdampfer Wärme entzogen und über den Verflüssiger an der Rückseite des Geräts an die Umgebungsluft im Raum abgegeben. Um diesen Wärmetransport zu ermöglichen, wird ein Arbeitsmittel, welches auch Kältemittel genannt wird und eine bei niedrigen Temperaturen siedende Flüssigkeit ist, in einem Kreislauf geführt.

Bei der Wärmepumpe hingegen wird nicht dem Kühlgut, sondern der Umwelt (bspw. Wasser, Erdreich, Luft) Wärme entzogen und dem Heizsystem zugeführt. Der Nutzen liegt somit auf der warmen, nicht auf der kalten Seite.

Nach dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ist ein Wärmeübergang von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur von selbst nicht möglich. Das Prinzip der Wärmepumpe entspricht dennoch dem Zweiten Hauptsatz, da der Übergang von »kalt« nach »warm« nicht von selbst, sondern unter Zufuhr höherwertiger Energie erfolgt. Bei einer Kompressionswärmepumpe entspricht die zugeführte Energie der mechanischen Antriebsarbeit des Verdichters. Abb. 5 zeigt links den schematischen Aufbau einer Wärmepumpe und rechts für diesen Kreislauf den idealen Wärmepumpenprozess im $\log(p)$ -h-Diagramm. Dabei beschreibt h die spezifische Enthalpie bzw. den Wärmegehalt und p den Druck des Kältemittels im Kreisprozess. Der Druck p ist im Diagramm logarithmisch aufgetragen, um einen größeren Bereich darstellen zu können.

- 4–1 isotherme Verdampfung (Temperatur bleibt konstant)
- 1–2 isentrope Verdichtung (Entropie bleibt konstant)
- 2–3 isotherme Kondensation (Temperatur bleibt konstant)
- 3–4 isenthalpe Entspannung (Enthalpie bleibt konstant)



■ **Abb. 5:** Schematischer Aufbau der WP / idealer WP-Prozess im $\log(p)$ -h-Diagramm

13 Autoren



Dr.-Ing. Constanze Bongs

Constanze Bongs schloss ihr Studium des Wirtschaftsingenieurwesens mit dem Schwerpunkt Energie- und Rohstoffwesen im Jahr 2007 an der Technischen Universität Berlin ab. Seit 2007 ist sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer ISE tätig. Der Schwerpunkt ihrer Tätigkeit liegt im Bereich der Sorptionstechnik. Im Rahmen ihrer Dissertation, eingereicht an der Technischen Universität Berlin, forschte sie über ein thermisch angetriebenes Verfahren zur sorptiven Luftentfeuchtung und Luftkühlung. Im Themenfeld thermisch angetriebener Sorptionswärmepumpen betreut sie ein EU-Projekt, das unter anderem die experimentelle Charakterisierung, die Ertragssimulation und das Monitoring von ersten Feldtestanlagen einer neuen Generation von Gas-Absorptionswärmepumpen umfasst.



Dipl.-Wirt.-Ing. Danny Günther

Im Jahr 2009 schloss Danny Günther das Studium zum Wirtschaftsingenieur (Fachrichtung Energietechnik) an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur in Leipzig ab. In seiner Abschlussarbeit befasste er sich mit statischen und dynamischen energetisch-ökologischen Kennwerten von elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen. In seiner anschließenden Tätigkeit am Fraunhofer ISE stehen die Analyse und Optimierung der Wärmepumpeneffizienz auf Basis von Feldmessdaten sowie der Einsatz von Wärmepumpen im zukünftigen Versorgungssystem im Mittelpunkt.



Dipl.-Ing. Sebastian Helmling

Sebastian Helmling studierte bis 2011 Technologiemanagement an der Universität Stuttgart mit dem Schwerpunkt Energiesysteme und rationelle Energieanwendung. Seit 2012 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer ISE. Neben seinen Tätigkeiten in internationalen Energieeffizienzprojekten im Gebäudesektor ist er in der Gruppe Wärmepumpen unter anderem für die Betreuung der Messtechnik und die Auswertung der Feldtestanlagen verantwortlich.



Dipl.-Ing. Thomas Kramer

Nach seiner Ausbildung im Bereich Elektro- und Heizungstechnik studierte Thomas Kramer Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Erneuerbare Energien an der Technischen Fachhochschule in Berlin. Seit 2008 ist er als Ingenieur beim Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg im Bereich Monitoring von Energieversorgungssystemen für Gebäude tätig. Zwei seiner Arbeitsschwerpunkte sind die Leitung eines Projektes zur Analyse von innovativen Energiekonzepten für schwimmende Plusenergiegebäude und die Mitarbeit bei den größten deutschen Monitoringprojekten mit elektrisch angetriebenen Wärmepumpen. Im Rahmen dieser und weiterer Projekte entwickelt er zusammen mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft Methoden zur Überwachung, Systemanalyse, Optimierung und Weiterentwicklung der eingesetzten Technologien.



Dipl.-Ing. Marek Miara

Marek Miara absolvierte von 1995 bis 2000 das Bauingenieurstudium an der Technischen Universität Wroclaw (Breslau). Danach schloss er das weiterbildende Studium Energie und Umwelt an der Universität Kassel ab. Seit 2003 ist er am Fraunhofer ISE tätig und leitet dort die Gruppe Wärmepumpen. Schwerpunkte seiner Tätigkeit liegen bei der Effizienzbestimmung und -bewertung der Wärmepumpenanlagen, dem rationalen Energieverbrauch sowie Gebäuden mit niedrigem Energieverbrauch. Seit 2005 ist er verantwortlich für eine Reihe von Monitoringprojekten der Wärmepumpenanlagen. Neben nationalen Projekten betreut er internationale EU-Projekte und Tätigkeiten in Rahmen des Heat Pump Programms von IEA. Marek Miara ist ein Mitglied bei zwei VDI Richtlinien-gremien und ein Mitbegründer des polnischen Wärmepumpenverbandes. Im Bereich von Wärmepumpen hat er bei zahlreichen nationalen und internationalen Tagungen sowie Konferenzen teilgenommen und aktiv mitgewirkt.



Dipl.-Ing. Thore Oltersdorf

Sein Studium mit Abschluss als Diplom-Ingenieur der Verfahrenstechnik absolvierte Thore Oltersdorf an der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Seit 2006 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer ISE tätig. Seit 2008 hat er zusammen mit Jeannette Wapler das Labor für Kompressionswärmepumpen und in Eigenverantwortung einen Teststand für neuartige Verdampfer mit mehreren Wärmequellen entwickelt. Seit 2011 ist er am ISE verantwortlich für die Komponentenentwicklung für Kompressionswärmepumpen. In diesem Zusammenhang betreute und betreut er mehrere Projekte der EU, des Bundes und der Industrie zur Verdampfer-, Reglerentwicklung, Entwicklung von Kühlkonzepten, neuen Prüfständen und dem Monitoring von Anlagen mit thermisch oder elektrisch angetriebenen Wärmepumpen. Er hat in seiner Zeit am ISE mehrere Patente und Veröffentlichungen für Verdampfer (Fluidverteiler), zur Optimierung von Kältekreisen und zur Absicherung bei Verwendung von Gefahrstoffen als Kältemittel eingereicht und veröffentlicht.



Dipl.-Ing. (FH) Jeannette Wapler

Jeannette Wapler schloss ihr Studium der Versorgungstechnik mit dem Schwerpunkt Heizungs-, Klima- und Energietechnik im Jahr 2002 an der Fachhochschule Erfurt ab. Seitdem ist sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg im Bereich energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik tätig. Ein Schwerpunkt ihrer Arbeit liegt in der Planung, Durchführung und Analyse von Monitoringprojekten im Themenfeld Wärmepumpen. Darüber hinaus ist sie mit der Entwicklung von Regelungskonzepten für Wärmepumpensysteme betraut.

Kontakt:

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Bereich Thermische Anlagen und Gebäudetechnik
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
marek.miara@ise.fraunhofer.de