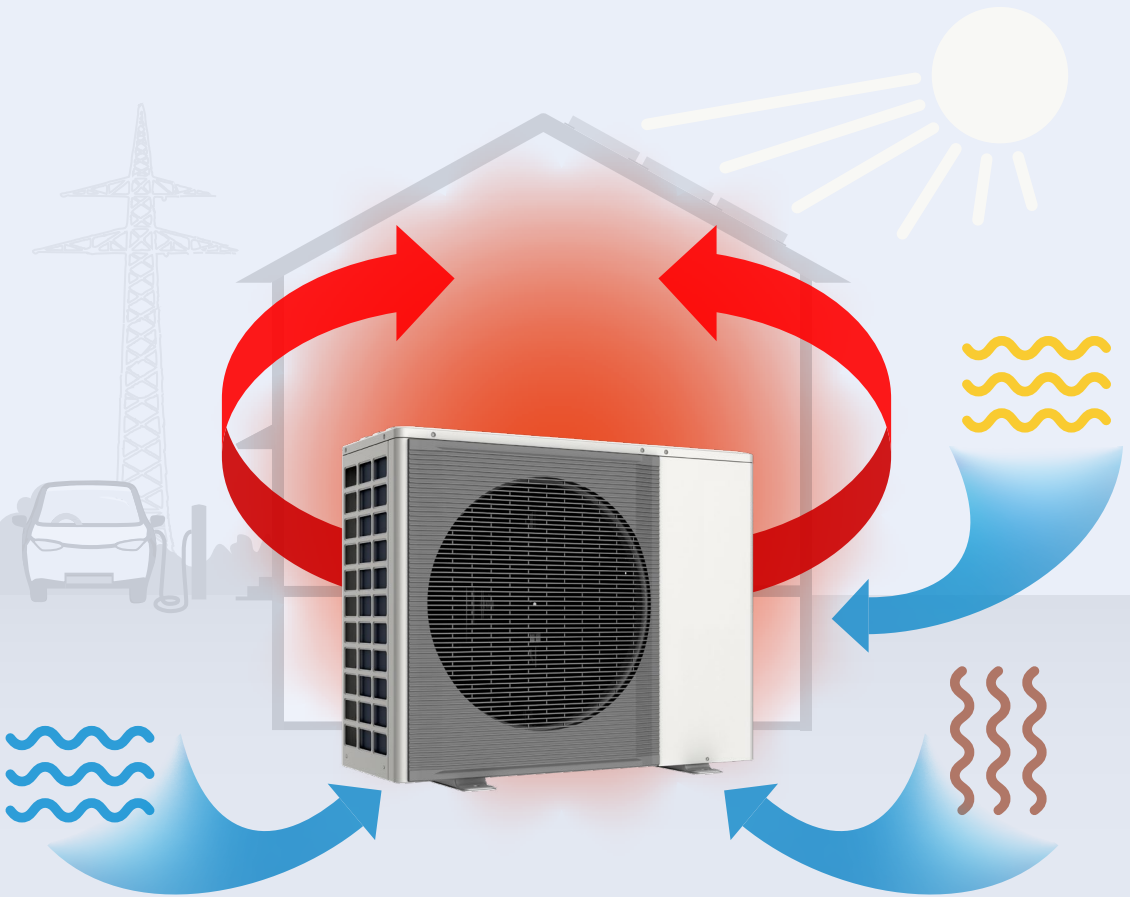


Markus Heigele, Lars Keller

# Leitfaden für Wärmepumpenanlagen

2. AUFLAGE



Lars Keller und Markus Heigele

# Leitfaden für Wärmepumpenanlagen

2. Auflage

---

# Vorwort

**von Dr. Martin Sabel**

Geschäftsführer Bundesverband Wärmepumpe  
(BWP) e.V.



Im Jahr 2022 betrug die Emissionen im Gebäudesektor bei 112 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, damit wurden die gesetzten Emissionsziele der Bundesregierung nicht erreicht. Bis 2045 soll Deutschland treibhausgasneutral werden. Deutschland hat nicht nur eigene Klimaschutzziele, sondern auch entsprechende EU-rechtliche Verpflichtungen. Die Transformation der Wärmeversorgung bleibt eine große Herausforderung, dabei ist die Wissenschaft sich einig: Alle Lösungen zur Erreichung der Klimaziele sind vorhanden. Was es braucht, ist eine konsequente und schnelle Skalierung dieser Lösungen.

Wärmepumpen sind die Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Klimaziele im Gebäudesektor. Sie stellen mit Abstand die effiziente Möglichkeit dar, um erneuerbaren Strom für die Wärmebereitstellung im Gebäudesektor zu nutzen, denn sie nutzen Strom, um erneuerbare Umweltwärme für Raumheizung und Warmwasserbereitung verfügbar zu machen.

Strom ist die neue Primärenergie, der durchschnittliche Anteil erneuerbarer Energien an der öffentlichen Nettostromerzeugung in Deutschland betrug Mitte November 2023 bereits 57 %. Der Anteil erneuerbarer Energien soll bis 2030 auf mindestens 80 % steigen. Für die Erreichung der Klimaziele im Gebäudesektor ist der massive Ausbau von Wärmepumpen als Ersatz fossiler Heizungen notwendig und er muss schnell passieren.

Gleichzeitig tragen Wärmepumpen zu mehr Energieunabhängigkeit bei, denn sie nutzen das begrenzte Potential von in Deutschland produziertem erneuerbaren Strom besonders effizient zur Bereitstellung von Wärme. Damit reduzieren sie die Importmengen fossiler Brennstoffe. Ein möglichst hoher Grad an Energieunabhängigkeit ist ein Ziel, welches mit Beginn des Krieges in der Ukraine auf tragische Weise in den Fokus des gesellschaftlichen Bewusstseins und politischer Entscheidungen gerückt ist.

Es verwundert also nicht, dass die Bundesregierung ambitionierte Ziele zum Hochlauf der Wärmepumpentechnologie definiert hat. Bis zum Jahr 2030 sollen

mindestens 6 Millionen Wärmepumpen installiert sein, damit wird die Wärmepumpe zum Standardheizsystem in Deutschland.

Die Wärmepumpentechnologie stand in den vergangenen Monaten entsprechend im Rampenlicht der öffentlichen und politischen Wahrnehmung. Die unsichere Erdgasversorgung in Europa und drastisch gestiegene Erdgaspreise haben im Jahr 2022 zu einer deutlichen Steigerung der Nachfrage nach Wärmepumpen geführt.

Die Branche hat die Herausforderung angenommen, ein Hochlauf auf 6 Millionen Wärmepumpen ist zwar ambitioniert, sowohl was die Produktion der Geräte als auch die Bereitstellung von qualifizierten Planern und Handwerkern für den fachgerechten Einbau angeht. Die sehr guten Absatzzahlen und Wachstumsraten im Jahr 2023 zeigen aber, dass die Branche in der Lage ist den erforderlichen Wärmepumpenhochlauf auf der Angebotsseite zu realisieren. Letztendlich ist die Politik gefragt, mit den richtigen Rahmenbedingungen auch für eine entsprechende Nachfrage zu sorgen, um den konsequenten Hochlauf und eine entsprechende Skalierung zu ermöglichen. Neben einem attraktiven und verlässlichen Förderregime ist insbesondere ein attraktives und faires Energiepreisgefüge notwendig, um die erforderliche Lenkungswirkung weg von fossilem Heizöl und Erdgas und hin zur Wärmepumpe zu erreichen.

Ein Faktor ist für den erfolgreichen Hochlauf der Wärmepumpe zur Standardheizung von besonderer Bedeutung: wir brauchen neben fairen Rahmenbedingungen und effizienten Geräten insbesondere eine genügende Anzahl an qualifizierten und erfahrenen Installateuren aus den verschiedenen relevanten Gewerken. Es gilt, das Wärmepumpen- und Klima-Handwerk zu einem attraktiven und nachgefragten Beruf für junge Menschen zu machen. Schulungen und Weiterbildungen spielen dabei eine wichtige Rolle zum Auf- und Ausbau der notwendigen Kapazitäten.

Der vorliegende Leitfaden, für Wärmepumpenanlagen, der nun in der 2. Auflage erscheint, trägt seinen Teil dazu bei, das notwendige Wissen über effiziente Wärmepumpenanlagen zu verbreiten. Die Autoren verfügen über jahrelange Praxiserfahrung im Bereich der Planung von Wärmepumpenanlagen. Neben allgemeinen Grundlagen der Wärmepumpentechnik behandeln sie die praxisnahe Planung von Anlagen und Wärmequellen. Ein eigenes Kapitel ist dem effizienten Betrieb von Wärmepumpen gewidmet. Ein praxisnaher und umfassender Leitfaden für Fachplaner, Installateure und alle, die ihr Wissen über die Zukunftstechnologie Wärmepumpe erweitern möchten.

Berlin, November 2023

Dr. Martin Sabel

---

# Vorwort

## Die Wärmepumpe auf dem Prüfstand – Zur aktuellen und künftigen Wärmeversorgung

Die Bundesregierung will den Umstieg auf Erneuerbare Energien beim Heizen einleiten und damit den Klimaschutz und die Energieunabhängigkeit in Deutschland voranbringen. Durch das neue Gebäudeenergiegesetz (GEG) kommt nun politischer Druck auf die Gebäudebesitzer zu. Ab 2024 muss beim Einbau neuer Heizungen konsequent auf Erneuerbare Energie gesetzt werden. Das heißt konkret, dass ab dem 01.01.2024 möglichst jede neu eingebaute Heizung mit mindestens 65 Prozent mit Erneuerbaren Energien betrieben werden muss.

Das Gesetz soll zum einen einen konkreten Beitrag zur Einsparung fossiler Energie (v.a. Erdgas und Öl) und zum Klimaschutz leisten. Zum anderen soll das Gesetz die Resilienz (Widerstandsfähigkeit) unserer Wärmeversorgung stärken.

Um die Klimaerwärmung auf 2 Kelvin (K) zu begrenzen, müssen drei Strategien verfolgt werden:

- ▶ Energieeinsparung (Verbraucher)
- ▶ Regenerative Energieerzeugung
- ▶ Hocheffizienter Energieverbrauch.

Der Wärmepumpentechnologie kommt dabei eine Schlüsselrolle zu. Doch weshalb ist dem so?

Effiziente und betriebssichere Wärmepumpenanlagen stellen bezüglich Planung, Ausführung und Betrieb hohe Anforderungen an alle Beteiligten. Ein Vergleich mit allen anderen aktuellen Möglichkeiten der Wärmeerzeugung zeigt jedoch, dass sich der Aufwand lohnt.

Welche Alternativen stehen unter Wahrung von Klimaschutzzielen zur Wahl? Wägen wir einen Blick auf die Wirkungsgrade zur Wärmeerzeugung in Bezug auf den eingesetzten erneuerbaren Strom. **Bild I-1** zeigt dabei drei wesentliche Möglichkeiten zur Wärmeerzeugung aus erneuerbarem Strom auf:

- ▶ Durch Wärmepumpentechnologie
- ▶ Durch Power-to-Gas-Anwendung
- ▶ Durch Kraft-Wärme-Kopplung.

Alle drei Technologien haben als Primärenergie erneuerbar erzeugten Strom.

Mithilfe von Elektrolyse kann daraus grüner Wasserstoff (H<sub>2</sub>) erzeugt und in einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (KWK) als Kraftstoff eingesetzt werden. Die KWK-Anlage erzeugt wiederum Wärme mit einem Wirkungsgrad von ca. 45 %

und Strom mit einem Wirkungsgrad von ca. 40 %. Durch die Umwandlungsverluste erreicht dieses System Gesamtwirkungsgrade von 46 bis 71 % – sowohl thermisch als auch elektrisch.

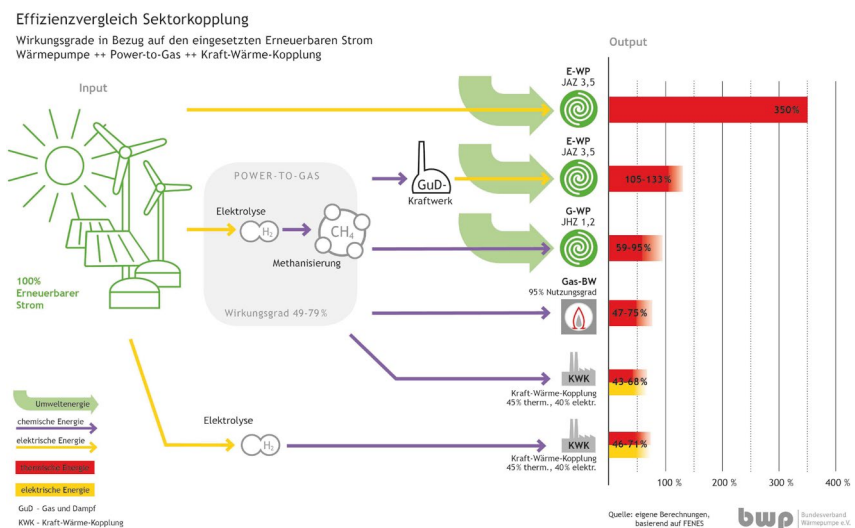
Durch Power-to-Gas-Verfahren kann man aus dem regenerativen Strom durch Methanisierung auch  $\text{CH}_4$  (Methan, großer Bestandteil von Erdgas) aus dem Wasserstoff herstellen und dieses  $\text{CH}_4$  dann als Brennstoff in eine KWK-Anlage schicken. Dieses System erreicht ebenfalls niedrige Gesamtwirkungsgrade von 43 bis 68 % – sowohl thermisch als auch elektrisch.

Alternativ zur KWK-Anwendung kann man  $\text{CH}_4$  auch direkt in einem Gas-Brennwertkessel thermisch verwerten und erreicht auf diesem Wege einen thermischen Gesamtwirkungsgrad von 47 bis 75 %.

Eine weitere Möglichkeit ist es, dieses  $\text{CH}_4$  als Brennstoff für eine Absorptionswärmepumpe einzusetzen. Unter der Annahme einer Jahresarbeitszahl von 1,2 ergibt sich bei dieser Variante ein thermischer Gesamtwirkungsgrad von 59 bis 95 %.

Bei der vierten Variante wird das  $\text{CH}_4$  in ein Gas- und Dampfkraftwerk zur Stromerzeugung geleitet. Diesen Strom wiederum nimmt man als Brennstoff für eine Elektrowärmepumpe. Bei einer Jahresarbeitszahl von 3,5 erreicht man auf diesem Weg auf einen Gesamtwirkungsgrad von ca. 105 bis 133 %.

Die mit großem Abstand cleverste Idee ist es, den regenerativen Strom direkt mit Hilfe einer Elektrowärmepumpe in Wärmeenergie umzuwandeln. Hierbei kommt man auf einen Gesamtwirkungsgrad von 350 % bei einer angenommenen Jahresarbeitszahl von 3,5.



**Bild I-1:** Nutzung von regenerativ erzeugter elektrischer Energie zur Wärmeerzeugung im Vergleich (Quelle: Bundesverband Wärmepumpe e.V.)

Da nach aktuellem Kenntnisstand eine Steigerung der regenerativen Energieerzeugung im Wesentlichen nur mit den Technologien Windkraft und Photovoltaik (PV) möglich ist, ergibt sich daraus im Bereich der Wärmeerzeugung die Aufgabe, die regenerativ erzeugte elektrische Energie möglichst in Wärme umzuwandeln.

Der Einbau einer elektrischen Wärmepumpe bietet sich für viele Ein- und Zweifamilienhäuser, aber auch für Mehrfamilienhäuser, Gewerbe und Industrie an, sowohl im Neubau als auch im Bestand. Die Wärmepumpe nutzt zum großen Teil die kostenlose und erneuerbare Umweltwärme und erfüllt daher die Erneuerbaren-Vorgabe. Eine Dämmung des Gebäudes oder eine Flächenheizung sind hierbei von Vorteil, aber keine zwingende Voraussetzung.

### Wir sagen Danke

unseren beiden Frauen und Kindern  
für ihre Geduld und ihr Verständnis, dass wir eine zweite Auflage publizieren dürfen, Prof. Dipl.-Ing. Werner Schenk von der Hochschule München für seine fachliche Unterstützung und sein stets offenes Ohr  
(<http://wpeffizienz.de>),



Frau Kirstin Sommer vom Verlag ITM InnoTech Medien GmbH  
für ihr Vertrauen in uns  
(<https://www.innotech-medien.de>,  
<https://www.recknagel-online.de>),



dem Bundesverband Wärmepumpe e.V.  
für die Verwendung zahlreicher Illustrationen und Informationen  
(<https://www.waermepumpe.de>),



dem BDH Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e.V.  
für die Bereitstellung von fachlichen Informationen und Illustrationen  
(<http://www.bdh-koeln.de>).



November 2023

Eure Hitzköpfe

Lars Keller

Markus Heigele

---

## Autoren



*Dipl.-Ing. (FH)*  
*Markus Heigele*

Nach meiner Lehre als Gas- und Wasserinstallateur habe ich Versorgungstechnik an der Fachhochschule in München studiert und danach eine Weiterbildung zum Gebäudeenergieberater absolviert. Im Anschluss daran war ich mehrere Jahre in einem TGA-Ingenieurbüro planerisch tätig mit Schwerpunkt auf Krankenhaustechnik und Pharmaindustrie. Ich war über zwölf Jahre als Vertriebs- und Projektierungsingenieur für renommierte deutsche Hersteller in der Heizungsbranche unterwegs und bin seit kurzem als Key-Account-Manager bei einem mittelständischen Anlagenbauer beschäftigt. Ich verstehe mich als Sparingspartner rund ums Thema Energie. Mir macht es Spaß, Dinge im Team umzusetzen und permanent Neues kennenzulernen.



*Dipl.-Ing. (FH)*  
*Lars Keller*

Nach meinem Fachabitur in Wirtschaft und Recht habe ich eine Lehre als Zentralheizungs- und Lüftungsbauer abgeschlossen. Nach einiger Praxiserfahrung auf dem Bau schlug ich den Weg zum Studium der Versorgungstechnik an der Fachhochschule in München ein. Das zweite Praxissemester sowie einen Gastaufenthalt an der Universität von Bologna verbrachte ich dabei in Italien. Das Studium in München habe ich mit der Diplomarbeit in Lüftungs- und Klimatechnik mit Note 1 abgeschlossen. Rund 20 Jahre lang sammelte ich beruflich im technischen Vertrieb und in der Projektierung von Kälte- und Klimaanlage, Großkältezentralen und mobilen Energielösungen bei einem der größten Hersteller der HVAC-Branche Erfahrung. Mit diesem tiefen, fachlichen Hintergrund als Basis publi-

ziere ich seit 2004 Fachbücher in der Recknagel Edition. Durch die lange Präsenz in der Klima- und Kältebranche kann ich auf ein großes Netzwerk zugreifen und werde gerne als Gastautor in diversen Fachzeitschriften oder als Redner auf Fachsymposien gebucht. Mit der Hitzköpfe-Academy bin ich offizieller Schulungspartner für die VDI 4645, Sachkundiger für Wärmepumpensysteme nach der VDI 4645 und bei der BAFA als Bildungsträger für die Bundesförderung Aufbauprogramm Wärmepumpe (BAW) mit der Vorgangsnummer 50010017 gelistet.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort von Dr. Martin Sabel, Geschäftsführer Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V.</b> .....	5
<b>Vorwort der Autoren</b> .....	7
Die Wärmepumpe auf dem Prüfstand – Zur aktuellen und künftigen Wärmeversorgung	
<b>I. Grundlagen der Wärmepumpentechnik</b> .....	17
<b>1 Einleitung und Wärmepumpenmarkt</b> .....	18
<b>2 Physikalische Grundlagen</b> .....	23
2.1 Aggregatzustandsänderungen .....	24
2.2 Kältekreis .....	26
2.2.1 Das log-p-h-Diagramm .....	27
2.2.2 Verdampfungsprozess und Überhitzung (kalte Seite, Wärmequellenanlage WQA) im log-p-h-Diagramm .....	32
2.2.3 Verdichtungsprozess (Druckerhöhung) im log-p-h-Diagramm .....	33
2.2.4 Verflüssigungsprozess, Heißgasenthitzung und Unterkühlung (heiße Seite, Wärmenutzungsanlage WNA) im log-p-h-Diagramm ...	34
2.2.5 Entspannungsprozess (Druckreduzierung) im log-p-h-Diagramm .....	35
2.2.6 Zusammenfassung Kältekreislauf .....	36
2.2.7 Erhöhung von Betriebssicherheit und Effizienz im Kältekreislauf .....	37
<b>3 Kältetechnische Hauptkomponenten einer Wärmepumpe</b> .....	41
3.1 Verdichter .....	41
3.1.1 Rollkolbenverdichter .....	41
3.1.2 Scrollverdichter .....	42
3.1.3 Hubkolbenverdichter .....	45
3.1.3.1 Halbhermetische Hubkolbenverdichter .....	45
3.1.3.2 Offene Hubkolbenverdichter .....	47
3.1.4 Schraubenverdichter .....	47
3.1.4.1 Zweirotorschraubenverdichter .....	50
3.1.5 Turboverdichter .....	51
3.1.5.1 Ölfreie magnetgelagerte Turboverdichter .....	52
3.1.5.2 Turboverdichter mit Getriebe .....	53
3.2 Expansionsventil .....	54
3.3 Verdampfer und Verflüssiger (Wärmeübertrager) .....	57
3.4 Weitere kältetechnische Komponenten einer Wärmepumpe .....	61

3.4.1	Kältemittelrohrleitungen (Saug-, Druck-, Flüssigkeitsleitung) .....	61
3.4.2	Kältemittelschauglas .....	61
3.4.3	Magnetventil .....	62
3.4.4	Filtertrockner .....	63
3.4.5	Vierwege-Umschaltventil .....	66
3.4.6	Kugelabsperrentil .....	67
3.4.7	Rückschlagventil .....	67
3.4.8	Druckschalter und Thermostat .....	68
3.5	Elektrische Komponenten (Frequenzumrichter, Softstartgerät, Mikroprozessor, EC-Motor, Heizschwert) .....	70
3.5.1	Schütz für Direktstart .....	70
3.5.2	Softstartgerät (Sanftanlaufgerät) .....	70
3.5.3	Frequenzumrichter (FU) .....	72
3.5.4	EC-Regelung .....	73
3.5.5	Elektrischer Zusatzheizer/Heizstab .....	74
<b>4</b>	<b>Kältemittel</b> .....	75
4.1	Gewünschte Eigenschaften von Kältemitteln .....	75
4.2	Klassifizierung von Kältemitteln und Begriffsdefinitionen .....	75
4.3	Eingesetzte Kältemittel bei Wärmepumpenanwendungen .....	81
4.4	Aufstellung von Wärmepumpen mit Bezug auf Brennbarkeit und Toxizität .....	84
<b>5</b>	<b>Effizienzkennzahlen bei Wärmepumpensystemen</b> .....	88
5.1	Bilanzgrenzen gemäß VDI 4650 Blatt 1 .....	88
5.2	Leistungszahl COP .....	89
5.3	Berechnete (SCOP) und gemessene (SPF) Jahresarbeitszahl .....	92
5.4	Jahreszeitbedingte Raumheizungsenergieeffizienz $\eta_S$ (ETAs) .....	99
5.5	TER-Wert bei 4-Leiter-Systemen .....	101
<b>II.</b>	<b>Randbedingungen</b> .....	105
<b>1</b>	<b>Vernetzung</b> .....	106
1.1	„Brennstoff“ Strom .....	106
1.2	Konnektivität und Fernanalyse .....	107
1.3	Wärmepumpe im Zusammenspiel mit Photovoltaik und Stromspeicher .....	108
1.4	Strom-Community und -Clouds .....	118
<b>2</b>	<b>Gesetzlicher Rahmen in Deutschland</b> .....	120
2.1	CO <sub>2</sub> -Steuer .....	120

2.2	Gebäudeenergiegesetz – GEG .....	121
2.3	Ökodesign-Richtlinie ErP .....	126
2.4	Gütesiegel EHPA, keymark und SG Ready .....	129
2.5	Bundesförderung für effiziente Gebäude – BEG (Bundesrepublik Deutschland) .....	132
2.6	Schulungen und Fortbildungsmaßnahmen und mögliche Förderungen .....	136

### **III. Praxisnahe Anlagenplanung und Betrachtung von Wärmequellen** ..... 141

<b>1</b>	<b>Betriebsweisen von Wärmepumpen</b> .....	142
1.1	Monovalent .....	142
1.2	Monoenergetisch .....	142
1.3	Bivalent-parallel, bivalent-alternativ und bivalent-teilparallel .....	142
1.4	Reversibler Betrieb .....	145
1.5	Hybridanlage mit weiterem Wärmeerzeuger .....	145
<b>2</b>	<b>Luft-Wasser-Wärmepumpen</b> .....	150
2.1	Varianten der Luft-Wasser-Wärmepumpe (Monoblock-, Split-, Innen-, Außen-, On-off-, Inverter-, Warmwasserwärmepumpe) .....	150
2.2	Aufstellung .....	159
2.3	Schall .....	164
2.4	Aufstellhinweise für Wärmepumpen mit Kältemittel Propan (R290) .	170
<b>3</b>	<b>Luft-Luft-Wärmepumpe (Einsatz im Passivhaus)</b> .....	173
<b>4</b>	<b>Sole-Wasser-Wärmepumpen</b> .....	176
4.1	Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Erdwärmesonde .....	177
4.2	Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Erdwärmekollektor .....	181
4.3	Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Grabenkollektor, Spiralkollektor oder Erdwärmekörpern .....	184
4.4	Aufstellung .....	190
<b>5</b>	<b>Wasser-Wasser-Wärmepumpen</b> .....	191
5.1	Grundwassernutzung und Kühlwassernutzung .....	191
5.2	Aufstellung .....	196
5.3	Auslegung von Brunnenkreis und Zwischenkreis .....	196
<b>6</b>	<b>Elektrische Versorgung</b> .....	197

<b>IV.</b>	<b>Praxisnahe Auslegung der Sekundärseite – Möglichkeiten und Grenzen</b> .....	201
<b>1</b>	<b>Heizbetrieb und Grobauswahl des Wärmepumpentyps</b> .....	202
1.1	Dimensionierung einer Wärmepumpe .....	203
1.1.1	Ablaufmatrix Planung und Wärmepumpendimensionierung – aus der Praxis .....	203
1.1.2	Planung und Wärmepumpendimensionierung – nach VDI 4645 .....	207
1.2	Effizienz im Heizbetrieb .....	219
1.3	Heizwasserpufferspeicher und Hydraulik .....	224
<b>2</b>	<b>Kühlbetrieb</b> .....	229
2.1	Natürliche Kühlung (passive Kühlung) .....	231
2.2	Aktive Kühlung .....	233
<b>3</b>	<b>Trinkwassererwärmung</b> .....	235
3.1	Gesetzliche Rahmenbedingungen .....	235
3.2	Hinweise zur Hydraulik .....	235
3.3	Varianten zentral .....	237
3.4	Varianten dezentral .....	243
<b>4</b>	<b>Hydraulikvarianten</b> .....	248
4.1	Wärmepumpe mit Parallelpuffer .....	250
4.2	Wärmepumpe mit Reihenspuffer und Überströmventil .....	251
4.3	Elektroschema einer Wärmepumpe mit PV und Batterie .....	252
4.4	Wärmepumpe mit thermischer Solaranlage .....	254
4.5	Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit Wohnungsstationen .....	255
4.6	Hybridanlage: Wärmepumpe mit Öl- oder Gasbrennwertkessel .....	256
4.7	Wärmepumpe mit Parallelpuffer und natürlicher Kühlung .....	257
4.8	Wärmepumpe mit Parallelpuffer und aktiver Kühlung .....	258
4.9	Bivalente Wärmepumpe mit Festbrennstoffkessel und Parallelpuffer .....	259
<b>5</b>	<b>Ganzheitliches Wärmepumpensystem: die Speicherwärmepumpe</b> .....	260
<b>V.</b>	<b>Zukunftsfähige Wärmenetze in Neubau und Bestand</b> .....	267
<b>1</b>	<b>Einleitende Informationen</b> .....	268
<b>2</b>	<b>Definition Fernwärme – Nahwärme – kalte Nahwärme</b> .....	271
2.1	Fernwärme .....	271

2.2	Klassische Nahwärme .....	271
2.3	Kalte Nahwärme .....	272
<b>3</b>	<b>Aufbau kalter Nahwärmenetze .....</b>	<b>274</b>
<b>4</b>	<b>Vorteile der kalten Nahwärme .....</b>	<b>276</b>
<b>5</b>	<b>Planungsschritte eines kalten Nahwärmenetzes .....</b>	<b>277</b>
5.1	Energetische Analyse – Angebot vs. Bedarf .....	277
5.2	Verfügbarkeit geeigneter Wärmequellen .....	278
5.2.1	Geothermie .....	278
5.2.2	Solarthermische Systeme .....	279
5.2.3	Grundwasser .....	280
5.2.4	Umgebungsluft .....	280
5.2.5	Aquathermie .....	281
5.2.6	Eisspeicher .....	282
5.2.7	Weitere Energiequellen .....	284
<b>6</b>	<b>Hydraulische Auslegung und Druckverluste .....</b>	<b>285</b>
<b>7</b>	<b>Systemlösungen – Material für kalte Nahwärmenetze .....</b>	<b>286</b>
<b>8</b>	<b>Verlegung von Rohrleitungen für kalte Nahwärmenetze im Rohrgraben .....</b>	<b>291</b>
<b>9</b>	<b>Verbindungstechniken bei PE-Rohren für Anwendungen bei kalter Nahwärme .....</b>	<b>293</b>
9.1	Heizelementstumpfschweißen (HS) .....	293
9.2	Heizwendelschweißen .....	293
9.3	Elektroschweißübergangsmuffen und -formstücke .....	294
9.4	Vorgefertigte Einheiten im Schachteinbau .....	295
<b>10</b>	<b>Qualitätssicherung .....</b>	<b>296</b>
10.1	Rückverfolgbarkeit und Dokumentation .....	296
10.2	Zerstörungsfreie Prüfung .....	296
<b>VI.</b>	<b>Effizienz im Wärmepumpenbetrieb .....</b>	<b>297</b>
<b>1</b>	<b>Systembetrachtung .....</b>	<b>298</b>
1.1	Hydraulischer Abgleich .....	298
1.2	Regelungseinstellung .....	302
1.3	Heiz- und Kühlwasseraufbereitung .....	303

1.3.1	Heizwasseraufbereitung .....	303
1.3.1.1	Maßgebliche Komponenten .....	303
1.3.1.2	Maßnahmen zur Heizwasseraufbereitung .....	305
1.3.1.3	Messtechnik zur Analyse des Heizungswassers .....	309
1.3.1.4	Welche Fehler sollten unbedingt vermieden werden? .....	309
1.3.2	Geschlossene Kühlanlagen .....	310
1.3.2.1	Anforderungen an Kühlanlagen .....	310
1.3.2.2	Füll- und Umlaufwasser für die Aufbereitung .....	311
1.3.2.3	Kreislaufwasseraufbereitung im Bypassverfahren .....	311
1.4	Inbetriebnahme und Einweisung .....	312
1.5	Wartung und Optimierung .....	315
1.6	Qualitätssicherung .....	318
<b>2</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>320</b>
<b>VII.</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>323</b>
<b>1</b>	<b>Normenhinweise</b> .....	<b>324</b>
<b>2</b>	<b>Wichtige Begriffe im Zusammenhang mit Wärmepumpen</b> .....	<b>328</b>
<b>3</b>	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>340</b>
<b>4</b>	<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>344</b>