

---

# 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>