

Panos Konstantin
Margarete Konstantin

Praxisbuch der Fernwärme- und Fernkälteversorgung

Systeme, Netzaufbauvarianten,
Kraft-Wärme- und
Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung,
Kostenstrukturen und Preisbildung

2. Auflage

 Springer Vieweg

Praxisbuch der Fernwärme- und Fernkälteversorgung

Panos Konstantin · Margarete Konstantin

Praxisbuch der Fernwärme- und Fernkälteversorgung

Systeme, Netzaufbauvarianten,
Kraft-Wärme- und
Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung,
Kostenstrukturen und Preisbildung

2. Auflage

 Springer Vieweg

Panos Konstantin
Burgstetten, Deutschland

Margarete Konstantin
Burgstetten, Deutschland

ISBN 978-3-662-64342-6 ISBN 978-3-662-64343-3 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-64343-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2018, 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Daniel Froehlich

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Als *Fernwärme (district heating)* wird die zentrale Wärmeversorgung von Gebäuden verschiedener Eigentümer aus einem Heizkraftwerk oder Heizwerk über ein Fernwärmenetz bezeichnet. Kleinere Netze werden auch Nahwärmenetze genannt.

Der wesentliche Vorteil einer Fern- oder Nahwärmeversorgung ist, dass die Wärme in einer größeren Anlage zentral, meistens durch energieeffiziente Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, erzeugt wird, anstatt in vielen sonst notwendigen dezentralen Wärmeerzeugungsanlagen. Neben der effizienteren und somit günstigeren Wärmeerzeugung werden auch die Luftemissionen reduziert und die Immissionssituation beträchtlich verbessert.

Wegen der relativ hohen Investitionen der Fernwärmeverteilung ist eine kostengünstige Fernwärmeerzeugung durch Kraft-Wärme-Kopplung eine Voraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit der Fernwärme gegenüber dezentralen Systemen.

Der *Wärmeträger* in Fernwärmenetzen ist meistens Heißwasser, das in einem Zweileiternetz, bestehend aus einer Vor- und einer Rücklaufleitung, zu und von den Verbrauchern transportiert wird. Fernwärmenetze mit Dampf als Wärmeträger werden zur Versorgung von Industriegebieten, wo auch Prozesswärme benötigt wird, betrieben.

Dampf-Fernwärmenetze bestehen aus einer Dampf- und einer Kondensatleitung. Städtische Dampf-Fernwärmenetze waren vereinzelt noch in Betrieb, wurden aber auf Heißwasser umgestellt.

Bedingt durch den Klimawandel und die Zunahme von extremen Wärme- und Kälteperioden nimmt neben der Fernwärme auch die *Fernkälte (district Cooling)* an Bedeutung zu. Bereits heute existieren in mehreren deutschen und europäischen Städten Fernkältesysteme, weitere werden ausgebaut. Deswegen wird in der Neuauflage dieses Buches auch die Fernkälteversorgung aufgenommen und behandelt.

Ein wesentlicher Unterschied zur Fernwärmeversorgung ist die Größe des Versorgungsgebietes. Fernwärme wird flächendeckend zur Versorgung gesamter Stadtgebiete ausgebaut. Fernkälte konzentriert sich dagegen auf kleine Versorgungsgebiete mit hoher Konzentration an Klimatisierungsbedarf.

Hauptziel dieses Buches ist und bleibt die Zur-Verfügung-Stellung von praxisnahem technisch/wirtschaftlichen Wissen in prägnanter Form und in der notwendigen Breite und Tiefe für die Entwicklungsphase von Energieprojekten.

Die zahlreichen *Anwendungsbeispiele* und Fallstudien sind für das Verständnis der Inhalte des Buches unerlässlich, da einige davon in der Druckversion im Buch nicht leicht nachvollziehbar sind. Deshalb stehen alle An-

wendungsbeispiele und Fallstudien als Softkopie in MS-Excel® auf der *Internetseite des Autors* zur Verfügung:

www.Pk-Energie-Praxiswissen.com

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich hier um einen freiwilligen und kostenlosen Service des Autors und seiner Kollegen handelt.

Die Anwendungsbeispiele und Fallstudien dienen in erster Linie dazu, den Rechengang zu vermitteln. Deswegen werden die Energiepreise nicht aktualisiert. Sie werden beim Erscheinen des Buches ohnehin nicht mehr aktuell sein. Auswirkungen von Preisänderungen auf das Ergebnis und die damit zusammenhängenden Risiken werden jedoch diskutiert und hervorgehoben.

Tipfehler sind in der Fülle des bearbeiteten Spektrums nicht ganz zu vermeiden, ich bitte um Nachsicht. Es wird allerdings erwartet, dass Leser und Nutzer der Website durch Anregungen und Hinweise zur Optimierung der Inhalte beitragen werden. Sie können sich direkt an den Autor wenden:

Panos.Konstantin@t-online.de

Zum Schluss noch einige persönliche Anmerkungen zum Buch:

Ich schreibe dieses Buch aus dem Blickwinkel eines Consultants, da ich etwa 40 Jahre lang als Energy Consultant weltweit tätig war.

Die Fernwärmnetze in Westdeutschland, in Osteuropa und in der ehemaligen Sowjetunion wurden in den 60er und 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts aufgebaut und sind am Ende ihrer technischen Lebensdauer. Sie müssen in den kommenden Jahren komplett saniert bzw. erneuert werden. Da sehe ich riesige Geschäftsmöglichkeiten für europäische Ingenieurfirmen und Hersteller von Anlagenkomponenten für Fernwärme sowie Arbeitsperspektiven für Jungingenieure für die kommenden Jahrzehnte.

Das Buch beschränkt sich deshalb nicht auf Deutschland, sondern umfasst den gesamten Regionsbereich, in dem Fernwärmesysteme aufgebaut wurden und betrieben werden.

Im Geschäftsleben ist es ein Vorteil, wenn man die bestehenden Verhältnisse gut kennt sowie die aktiven und ehemaligen Akteure. Deswegen ist eine Beschreibung der Fernwärmesysteme im Überblick (*at a glance*) ein wichtiges Kapitel im Buch.

Jedes Mal, wenn in der Energiepolitik große, ganz neue Vorhaben angegangen werden, werden oft auch Fehler gemacht, die dann nach und nach korrigiert werden müssen. Ich habe in meinem Berufsleben erlebt, dass die Fehler oft aus Unkenntnis des Vergangenen wiederholt werden. Deshalb ist im Vorfeld ein Blick in die Vergangenheit immer hilf- und lehrreich.

Das Buch ist eine Kombination von Fachbuch, Lehrbuch und historischer Aufarbeitung des Erlebten während meines langjährigen Berufslebens. Ich beziehe mich dabei nur auf Projekte, bei denen ich persönlich involviert war.

Angesprochen werden vor allem Leser, die sich einen Gesamtüberblick in kompakter Form von Fernwärmeprojekten verschaffen wollen.

Die Planung von Fernwärmeprojekten ist nicht Gegenstand dieses Buches. Planer von Fernwärmeprojekten entnehmen Informationen aus den Regelwerken des Fachverbandes AGFW (AGFW - Der Energieeffizienzverband der Wärme, Kälte und KWK e.V.), die international als Standard anerkannt und befolgt werden. Empfehlenswerte Quellen für Planer von Fernwärmeprojekten sind auch das „Planungshandbuch Fernwärme“ des Verbandes EnergieSchweiz BFE (EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE) und Planungshilfen von Herstellern aus dem Internet wie z.B. KMR Service GmbH (KMR Service GmbH) und GermanPipe Brugg (GERMANPIPE Brugg) und andere.

Die Daten und Informationen wurden hauptsächlich aus öffentlich zugänglichen Quellen entnommen. Ferner wurden zu speziellen Themen Informationsbeiträge von ehemaligen und aktiven Mitarbeitern von Fernwärmeversorgungsunternehmen zur Verfügung gestellt, die an den betreffenden Stellen namentlich erwähnt werden.

Alle Beispiele, Fallstudien und Tools wurden vom Autor erarbeitet und stehen für interessierte und registrierte Leser auf der Website des Autors zum Download zur Verfügung, es wird deshalb nicht im Einzelnen darauf hingewiesen.

Co-Autorin ist meine Ehefrau Margarete Konstantin. Ihre Aufgabe besteht in der Unterstützung bei der Recherche und darin, inhaltliche Korrekturen beim Text vorzunehmen, die das Verständnis auch für fachfremde Leser erleichtern sollen. Außerdem ist sie verantwortlich für die redaktionelle Gestaltung des Buches und die Fertigstellung des druckreifen Manuskripts.

Panos Konstantin (PK)
Burgstetten, August 2021

Dank für die Unterstützung und Zuarbeit

Zu allererst gilt mein besonderer Dank der Fichtner GmbH & Co KG, Stuttgart, meinem früheren Arbeitgeber. In meiner Tätigkeit als *Energy Consultant* weltweit hatte ich dort die Gelegenheit, all dieses Wissen zu erwerben, das ich in diesem und meinen weiteren Büchern an die nächste Generation weitervermitteln möchte.

Bedingt durch den Klimawandel und die Zunahme von extremen Wärme- und Kälteperioden nimmt neben der Fernwärme auch die *Fernkälte (district coling)* an Bedeutung zu. Bereits heute existieren in mehreren deutschen und europäischen Städten Fernkältesysteme, weitere werden ausgebaut. Deswegen wird in der Neuauflage dieses Buches auch die Fernkälteversorgung aufgenommen und behandelt.

Eine unerlässliche Hilfe und Ergänzung für meine Bücher sind die Inhalte meiner Website. Diese wurde von Markus Groissböck erstellt und wird seit Jahren von ihm betreut. Ihm gebührt mein Dank für seine uneigennützigere Hilfsbereitschaft.

Danken möchte ich auch meinen früheren Fichtner-Kollegen für ihre Unterstützung für meine früheren Bücher, die teilweise auch in dieses Buch einfließen. Extra erwähnen möchte ich hierbei Frau Bettina Feistritzer, Leiterin der Fichtner-Bibliothek, für ihre Unterstützung bei der Werbung.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei folgenden Mitarbeitern von Fernwärmeunternehmen für ihre Zuarbeit und Unterstützung zum Verwirklichen dieses Buches.

Herr Arkady Grishpoun vom *Energy Center Novosibirsk*, Fernwärmeversorgungssysteme in Sibirien.

Herr Lutz Geschwinde, Abteilungsleiter Fernwärme an der Zwickauer Energieversorgungs GmbH – ZEV, und sein Vorgänger Herr Günter Schreck, Modernisierung der Fernwärmeversorgung in Zwickau.

Herr Peer Schmidt, Leiter der Anlagentechnik Nah- und Fernwärme bei der HVG Heilbronner Versorgungs GmbH, vollendete Umstellung des Dampfnetzes der Innenstadt auf Heißwasser.

Herr Sönke Schuster, Pressesprecher der Stadtwerke Kiel, vollendete Umstellung des Dampfnetzes der Innenstadt auf Heißwasser sowie Vorzeigeprojekt neues Küstenkraftwerk K.I.E.L.

Frau Nicole Hasselmeier und Herr Andreas Lehmann von der Unternehmenskommunikation der STEAG New Energies GMBH, Fernwärmeschienen Saar und Rhein-Ruhr.

Herr Bernd Rieger und Herr Matthias Tebel von der EnBW Energie Baden-Württemberg, EnBW-Fernwärme Heilbronn und Fernwärmeverbund Mittlerer Neckar.

Herr Oleg Toměs, ehemaliger Vorstandsvorsitzender der Prager Fernwärme A.G (Pražská Teplárenská, a. s) während des Übergangs des Unternehmens von der Plan- in die Marktwirtschaft und seine Privatisierung, Prager Fernwärme von damals und heute.

Frau Sina Sitzmann, EVO Oberhausen AG, Fernwärmeschiene Rhein-Ruhr

Frau Britta Rohkämper, Stadtwerke Dinslaken, Fernwärmeversorgung Niederrhein

Die HelpDesk Görlitz GmbH stand mir immer zur Seite bei komplexen Formatierungen und Ausarbeitung von Formatvorlagen für das Buch. Für ihre stets bereitwillige Unterstützung bedanke ich mich insbesondere bei Michael Zimeck, Cornelia Wunsch und Barbara Nittel.

Nachdem meine Zugangsberechtigung zum Helpdesk abgelaufen ist, hat diese Rolle mein Freund Dr. Markus Groissböck übernommen, wofür ich ihm herzlich danke.

Downloads

Leser des Buches haben Zugang zur Website des Autors unter:

www.PK-Energie-Praxiswissen.com

und können verschiedene Arbeitshilfen herunterladen:

Soft copies aller Anwendungsbeispiele, Fallstudien, sowie Software-Tools für spezielle praktische Anwendungen in MS-Excel[®]. Diese werden auszugsweise auch als Hard copies in den zugehörigen Kapiteln im Textteil des Buches gezeigt.

Die Rechenbeispiele, Fallstudien und Software-Tools sind als Unterstützung für das Buch gedacht und haben ausschließlich den Zweck, dem Leser Hilfestellung zu bieten, um die Inhalte besser zu verstehen und den Rechengang nachzuvollziehen. Eine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität kann nicht übernommen werden.

Dazu gehört auch das **Software-Tool FluidEXL** für die Berechnung von thermodynamischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf in Excel. Die Entwickler des Tools: Hochschule Zittau/Görlitz, Fachgebiet Technische Thermodynamik. Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Kretzschmar und sein Mitarbeiter Matthias Kunick stellen das Software-Tool den Lesern dieses Buches kostenlos zur Verfügung. Herzlichen Dank!

Sie finden einen Link zum Downloaden auf der Website des Autors zusammen mit Installations- und Anwendungsanleitung. Da nur eine begrenzte Anzahl von Lizenzen zur Verfügung steht, wird registrierten Lesern, die das Tool nutzen möchten, auf ausdrücklichen Wunsch eine Lizenznummer erteilt. Wir bitten um Verständnis.

Die Nutzung der Software ist exklusiv nur für die Anwendungen in diesem Buch erlaubt. Für kommerzielle Anwendungen ist eine Speziallizenz vom Entwickler des Tools: Hochschule Zittau/Görlitz erforderlich.

Wichtige Anmerkungen zum Buch

Das Buch beschränkt sich nicht auf Deutschland, sondern umfasst den gesamten Regionsbereich, in dem Fernwärmesysteme aufgebaut wurden und betrieben werden. Eine englische Version ist bereits in Bearbeitung.

Das Buch enthält zahlreiche praktische Anwendungsbeispiele, Fallstudien, und Software-Tools für Berechnungen. Diese sind als Unterstützung für das Buch gedacht und haben ausschließlich den Zweck, dem Leser Hilfestellung zu bieten, um die Inhalte besser zu verstehen und den Rechengang nachzuvollziehen. Eine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität kann nicht übernommen werden. Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt, eine Vervielfältigung ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des gültigen Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland zulässig.

Fast alle Beispiele und Fallstudien sind MS-Excel[®]-Kalkulationstabellen entwickelt, wie bei realen Projekten aus der Praxis. Sie werden als Bild in den Textteil eingefügt. Es wurde versucht, sie relativ einfach zu gestalten, dennoch ist es meistens nicht möglich, aus der Hardcopy den Rechengang nachzuvollziehen. Die Leser haben aber die Möglichkeit, Soft copies aus der Website des Autors herunterzuladen.

Sowohl in den Soft copies auf der Website als auch in den Hard copies im Buch sind zur Unterscheidung Eingabewerte mit schwarzen Ziffern und berechnete Werte mit **roten Ziffern** gekennzeichnet.

Es wird ausschließlich das *Standard International Einheitensystem SI* verwendet (basierend auf dem MKS-System: Meter, Kilogramm, Sekunde). In der Europäischen Union ist seine Verwendung für öffentliche Projekte ohnehin Pflicht. In den meisten Ländern gilt es auch als Standard Einheitensystem. Das alte *Technische System*¹⁾ (kp, kcal) sowie das *Imperial* oder *US-Customary Measurement System* werden nicht verwendet.

Bei *Investitionsrechnungen* (in Deutschland oft bezeichnet als Wirtschaftlichkeitsberechnungen) wird dagegen parallel und bevorzugt die amerikanische Terminologie angewandt. Sie hat sich bei internationalen Projekten als der Standard etabliert, und ihre Kenntnis ist für praktische Anwendungen unerlässlich.

¹⁾ in manchen Osteuropäischen Ländern wird es weiterhin genutzt

Kapitelübersicht

Vorwort	V
Dank für die Unterstützung und Zuarbeit.....	IX
Kapitelübersicht.....	XIII
Inhaltsverzeichnis.....	XV
1 Einleitung und Grundbegriffe.....	1
2 Gekoppelte Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung	9
3 Heizkraftwerke – Aufbau, Funktion und Betrieb	19
4 Fernwärmesysteme in West- und Osteuropa	47
5 Dimensionierung von Fernwärmeleitungen	59
6 Systemkomponenten von Fernwärmesystemen.....	73
7 Fernwärmeschienen.....	89
8 Aufbau- und Betrieb von Kältesystemen.....	103
9 Investitionsrechnung, Kosten und Preisbildung	127
10 Kostenzuordnung bei von KWK und KWKK.....	149
Fallstudien	165
Toolbox	169
Literaturverzeichnis und Referenzen.....	181
Annexes	187
Glossar Deutsch-Englisch	191
Abkürzungsverzeichnis und Akronyme	197
Sachverzeichnis – Index	203

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Dank für die Unterstützung und Zuarbeit.....	IX
Kapitelübersicht.....	XIII
Inhaltsverzeichnis.....	XV
1 Einleitung und Grundbegriffe.....	1
1.1 Fernwärme.....	1
1.1.1 Grundbegriffe	1
1.1.2 Kennzahlen.....	1
1.1.3 Statistik auf einen Blick.....	2
1.2 Fernkälte.....	3
1.3 Das Standard Internationale Einheitensystem	4
1.3.1 Physikalische Größen und deren Einheiten	4
1.3.2 Regeln für die Schreibweise von Größen und Einheiten.....	7
1.3.3 Der richtige Umgang mit Einheiten und Formeln	8
2 Gekoppelte Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung	9
2.1 Der Kraft-Wärme-Kopplungs-Kreisprozess.....	9
2.1.1 Das Grundprinzip der Kraft-Wärme-Kopplung.....	9
2.1.2 Dampf-Kreisprozesse im Vergleich	9
2.1.3 Flussdiagramme, getrennte vs. gekoppelte Erzeugung.....	11
2.2 Gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung - KWK	12
2.2.1 Kennzahlen.....	12
2.2.2 Beziehungen zwischen den Kennzahlen.....	15
2.2.3 Richtwerte für Kennzahlen verschiedener Anlagentypen	17
3 Heizkraftwerke – Aufbau, Funktion und Betrieb	19
3.1 Aufbaukonzept der Fernwärmeerzeugung.....	19
3.2 Dampfturbinen-Heizkraftwerke.....	21
3.2.1 Der Dampf-Kreisprozess mit Wärmeauskopplung.....	21
3.2.2 Aufbau & Funktionsweise von Dampfturbinen-HKW.....	22

3.2.3	Stromausbeute und -einbuße bei der Wärmeauskopplung	24
3.2.4	Äquivalente Kondensationsleistung	26
3.3	Gasturbinen-Heizkraftwerke	27
3.3.1	Der Gasturbinenprozess	27
3.3.2	Aufbau von Gasturbinen Heizkraftwerken.....	29
3.3.3	Gasturbinentechnologien – Heavy Duty vs. Aero-derivative .	30
3.3.4	Aero-derivative GT vs. Gasmotoren für Lastausgleich	31
3.3.5	Der Abhitzeessel.....	32
3.3.6	Kennzahlen von Gasturbinen Heizkraftwerken.....	34
3.4	Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerke.....	35
3.4.1	Der Gas- und Dampfturbinen Kreisprozess	35
3.4.2	Aufbau und Funktionsweise	35
3.4.3	Kennzahlen von GuD-Heizkraftwerken	36
3.5	Verbrennungsmotor-Heizkraftwerke.....	37
3.5.1	Aufbau und Funktionsweise	37
3.5.2	Verbrennungsmotortechnologien im Überblick	39
3.5.3	Brennstoffflexibilität	40
3.5.4	Betriebliche Vorteile der Multi-Unit-Bauweise	40
3.5.5	Ausgleich von Lastschwankungen Motor- vs. GT-HKW	41
3.6	Technologie-Maßstab – Das Küstenkraftwerk K.I.E.L.....	41
3.6.1	Die Vorgeschichte	41
3.6.2	Das neue Küstenkraftwerk	43
4	Fernwärmesysteme in West- und Osteuropa.....	47
4.1	Fernwärme in Deutschland.....	47
4.1.1	Historischer Rückblick	47
4.1.2	Struktur und Hauptkomponenten der Fernwärme	48
4.1.3	Die Fernwärmerzeugung	49
4.1.4	Das Fernwärmenetz.....	49
4.1.5	Die Hausanlage.....	50
4.1.6	Wärmeverbrauchsmessung und Abrechnung	50

XVII Inhaltsverzeichnis

4.2	Fernwärme in Osteuropa und ehemaliger Sowjetunion.....	51
4.2.1	Das 2/4-Leiter FW-System, FW-Erzeugung und -Verteilung.....	51
4.2.2	Wärmeverbrauch und Heizkostenabrechnung.....	53
4.2.3	Sanierungskonzept.....	53
4.3	Das offene Zweileiter-Fernwärmesystem in Russland.....	54
4.3.1	Systemaufbau	54
4.3.2	Sanierung von verkalkten FW-Leitungen.....	57
5	Dimensionierung von Fernwärmeleitungen	59
5.1	Dimensionierungsansätze	59
5.1.1	Wassergeschwindigkeit vs. spezifischer Druckverlust.....	59
5.1.2	Rohrdurchmesser-Dimensionierung.....	61
5.1.3	Auswirkungen auf die Pumpleistung.....	62
5.1.4	Folgen bei Unterdimensionierung von FW-Leitungen.....	62
5.2	Transportkapazität von Fernwärmeleitungen	64
5.3	Pumpstromaufwand für Fernwärmetransport.....	66
5.4	Fernwärme-Netzbetrieb und Fahrweise.....	68
5.4.1	Temperaturauslegung und Fahrweise.....	68
5.4.2	Druckauslegung und Fahrweise.....	68
5.5	Software-Tools für FW-Fernleitung-Auslegung	70
6	Systemkomponenten von Fernwärmesystemen.....	73
6.1	Die Pumpstation	73
6.2	Fernwärme-Netzvarianten	75
6.3	Verlegearten von Rohrleitungen.....	77
6.3.1	Anforderungen.....	77
6.3.2	Kanalverlegung.....	77
6.3.3	Kanalfreie Verlegung – Kunststoffmantelrohre	78
6.3.4	Kanalfreie Verlegung mit Vollkunststoffrohrsystemen.....	81
6.3.5	Kanalfreie Verlegung mit Stahlmantelrohren.....	82
6.3.6	Freileitungssysteme	83
6.3.7	Verlegekosten und Entwicklungsschwerpunkte.....	83

XVIII Inhaltsverzeichnis

6.4	Hausanschluss und Hausanlage.....	84
6.4.1	Der Hausanschluss	84
6.4.2	Die Hausübergabestation.....	85
6.4.3	Wärmeverbrauchsmessung und Abrechnung	87
7	Fernwärmeschienen.....	89
7.1	Der Fernwärmeverbund Saar.....	89
7.2	Der Fernwärmeverbund Mittlerer Neckar	91
7.3	Die Fernwärmeversorgung in der Rhein-Ruhr Region.....	93
7.3.1	Die Fernwärmeschiene Rhein-Ruhr	93
7.3.2	Die Fernwärmeschiene Niederrhein	94
7.4	Die Fernwärmeschiene Melnik-Prag.....	96
7.4.1	Geschichtlicher Hintergrund	96
7.4.2	Das Melnik-Prag Projekt.....	97
7.4.3	Die Realisierungsphasen des Melnik-Prag Projektes	98
7.4.4	Das Melnik Kraftwerk.....	98
7.5	Aufbau & Betrieb von Dampf-Fernwärmenetzen	99
7.5.1	Leitungsverlegung und Netzbetrieb	99
7.5.2	Industrielle Dampfnetze	100
7.5.3	Städtische Dampfnetze	102
8	Aufbau- und Betrieb von Kältesystemen	103
8.1	Einleitung	103
8.1.1	Nomenklatur.....	103
8.1.2	Kältelast für die Auslegung der Anlage	103
8.2	Kompressions-Kälteanlagen.....	104
8.2.1	Der Kompressions-Kältekreislauf	104
8.2.2	Anwendungsfälle von Kompressions-Kälteanlagen.....	107
8.2.3	Der reale Kompressions-Kälteprozess	108
8.2.4	Die Kältemittel	110
8.2.5	Benennung von Kältemitteln.....	111
8.2.6	Mechanische Bauteile von Kompressions-Kälteanlagen	111

XIX Inhaltsverzeichnis

8.2.7	Kältespeicherung	115
8.3	Absorptions-Kälteanlagen	115
8.3.1	Der Absorptions-Kreisprozess.....	115
8.3.2	Analyse des Absorptionskälte-Kreisprozesses	117
8.3.3	Anwendungsbeispiele von Absorptionskälteanlagen	118
8.4	Vergleichende Gegenüberstellung der Kälteanlagen.....	121
8.5	Fernkälte-Versorgung.....	122
8.5.1	Kälteversorgung mit Kompressions-Anlagen.....	122
8.5.2	Absorption-Kompression Kälteversorgung	122
8.5.3	Nutzung von Naturkälte	123
8.6	Das Fernkältenetz	124
8.7	Fernkälte in Europa	126
9	Investitionsrechnung, Kosten und Preisbildung	127
9.1	Investitionsrechnung im Überblick	127
9.1.1	Gegenstand und Ansätze der Investitionsrechnung	127
9.1.2	Die Kapitalwertmethode.....	129
9.1.3	Die Annuitätenmethode.....	130
9.1.4	Die Interne Zinssatzmethode	131
9.1.5	Funktionen in Tabellenkalkulationsprogrammen	132
9.1.6	Kostenarten.....	132
9.1.7	Berechnung der Durchschnittskosten - LEC	133
9.2	Fernwärmegestehungskosten.....	136
9.2.1	FW-Auskopplung aus Groß-Kraftwerken	136
9.2.2	FW-Erzeugungskosten aus Verbrennungsmotor-HKW	138
9.2.3	Dampfgestehungskosten von Industrie-Gasturbinen-HKW	140
9.3	Fernwärmenetzkosten.....	142
9.3.1	FW-Leitung Verlegungskosten.....	142
9.3.2	Kosten für Hausübergabestationen.....	143
9.4	Ansätze zur Preisbildung.....	144
9.4.1	Fernwärmekosten frei Endverbraucher	144

XX Inhaltsverzeichnis

9.4.2	Kraft-Wärme-Kopplung vs. erneuerbare Energien	145
9.4.3	Gesetzliche Rahmenbedingungen zur Preisbildung	145
9.4.4	Fernwärmepreis und Preisgleitformel	146
9.5	Modell zur Kostenermittlung bei Fernkälte	147
10	Kostenzuordnung bei von KWK und KWKK.....	149
10.1	Zuordnungsverfahren bei KWK im Überblick.....	149
10.2	Das Restwertverfahren	150
10.2.1	Anwendungsbereich	150
10.2.2	Beschreibung des Verfahrens	150
10.2.3	Sensitivität gegenüber Preisänderungen.....	153
10.2.4	Anwendung des Restwertverfahrens bei Industrieanlagen..	155
10.2.5	Zuordnung von Brennstoff und CO ₂ -Emissionen	155
10.3	Das Stromäquivalenz- oder Arbeitswertverfahren	156
10.3.1	Wärmeauskopplung aus Großkraftwerken	157
10.3.2	Wärmeauskopplung aus Entnahme-Kondensations-HKW .	160
10.4	Das Exergieverfahren	161
10.4.1	Anwendung des Exergie-Verfahrens.....	163
10.5	Das kalorische Verfahren	163
10.6	Kosten bei Kraft-Wärme-Kälte Kopplung KWKK.....	163
	Fallstudien	165
	Toolbox	169
	Literaturverzeichnis und Referenzen.....	181
	Annexes.....	187
	Glossar Deutsch-Englisch	191
	Abkürzungsverzeichnis und Akronyme	197
	Sachverzeichnis – Index.....	203



1 Einleitung und Grundbegriffe

1.1 Fernwärme

1.1.1 Grundbegriffe

Als *Fernwärme* (*district heating*) wird die zentrale Wärmeversorgung von Gebäuden verschiedener Eigentümer aus einem Heizkraftwerk oder Heizwerk über ein Fernwärmenetz bezeichnet. Kleinere Netze werden oft auch Nahwärmenetze genannt. Ein Fernwärmeversorgungssystem setzt sich aus folgenden Hauptkomponenten zusammen:

Der *Wärmeträger* in Fernwärmenetzen ist meistens Heizwasser, das in einem Zweileiternetz, bestehend aus einer Vor- und einer Rücklaufleitung, zu den Verbrauchern transportiert wird. Dampf als Wärmeträger kommt vor allem zur Versorgung von Industriegebieten vor, wo auch Prozesswärme benötigt wird, Dampf-Fernwärmenetze bestehen aus einer Dampf- und einer Kondensat-Leitung.

1.1.2 Kennzahlen

Im Zusammenhang mit der Fernwärmeversorgung werden folgende Kennzahlen verwendet:

Der *Anschlusswert* Q_A in kW_{th} oder MW_{th} eines Fernwärmenetzes ist die Summe der Wärme-Nennleistungen der angeschlossenen Kundenanlagen.

Die *Netzhöchstlast* Q_H in kW_{th} oder MW_{th} ist der höchste stündliche Leistungsbedarf des gesamten Netzes. Die tatsächlich auftretende Netzhöchstlast ist im Wesentlichen von der Witterung im betreffenden Jahr, der strukturellen Durchmischung der Verbraucher im Versorgungsgebiet und vom Verbraucherverhalten abhängig.

Belastungsverhältnis f_B wird der Quotient aus Wärmehöchstlast und Anschlusswert genannt. Seine Höhe ist von der Gleichzeitigkeit der Abnahme der angeschlossenen Kunden und der Größe des Versorgungsgebietes abhängig. Bei Mischgebieten liegt es bei ca. 0,7 bis 0,8 – bei reinen Wohngebieten kann es Werte zwischen 0,8 und 0,95 erreichen. Wenn der vertraglich gemel-

dete Leistungsbedarf der Kundenanlagen überhöht ist, können auch niedrigere Werte vorkommen.

Die *Netzeinspeisung* W_{th} ist die in das Netz eingespeiste Wärmemenge (meistens angegeben in einem Jahr). Die *Wärmeabgabe* $W_{th, K}$ ist die an den Kunden gelieferte Wärmemenge. Sie ist gleich mit der Netzeinspeisung minus Netzverluste. Beide werden in den Einheiten GJ/a oder MWh_{th}/a angegeben.

Als *Ausnutzungsdauer des Anschlusswertes* t_A in h/a wird der Quotient aus Wärmeabgabe und Anschlusswert bezeichnet. Davon zu unterscheiden ist die *Benutzungsdauer der Netzhöchstlast* t_H in h/a. Diese ist der Quotient aus der Netzeinspeisung W_{th} und der im betreffenden Jahr aufgetretenen Netzhöchstlast Q_H . Sie kann üblicherweise Werte zwischen 2.000 und 3.000 h/a erreichen.

Die *Anschlussdichte* ist die Anzahl der Anschlüsse pro km².

Die *Liniendichte* in MW/km ist das Verhältnis des Anschlusswertes zur Trassenlänge.

Die *Wärmedichte* in MW/km² ist das Verhältnis des Anschlusswertes zur Fläche eines Fernwärmeversorgungsgebietes.

Die beiden letztgenannten Kennzahlen sind Indikatoren zur Erstbeurteilung der Wirtschaftlichkeit der Fernwärmeversorgung von potentiellen Versorgungsgebieten oder Verbrauchern.

1.1.3 Statistik auf einen Blick

In allen Städten der früheren Sowjetunion und in Osteuropa ist und wird die Fernwärme das fast ausschließliche Wärmeversorgungssystem im Wohnbereich bleiben. Aber auch in Deutschland ist Fernwärme in allen Großstädten das dominierende Wärmeversorgungssystem (AGFW-Hauptbericht, 2021).

Tabelle 1.1: Fernwärme in Deutschland. Übersichtstabelle aus AGFW Fernwärmestatistik 2020

Merkmal	Einheit	Angabe
Erfassten Netze	-	1.196
Heizwasser	-	1.160
Dampf	-	36
Übergabestationen	-	357.925
Heizwasser	-	351.055
Dampf	-	6.870
Trassenlänge ca.		21.236
Heizwasser	km	20.692
Dampf	km	544

Umfang der Erde am Äquator 40.075 km

1.2 Fernkälte

Das Buch beschreibt die Technologien der Erzeugung und Verteilung von Kälte für Klimatisierungszwecke in Gebäuden. In dem Sonnengürtel der Erde um den Äquator ist Klimatisierung von Gebäuden genauso unverzichtbar wie Fernwärme in den kalten Regionen der Erde.

Im Gegensatz zur Fernwärme konzentriert sich Fernkälte in kleinen Bereichen mit sehr hohem Bedarf an Kälte für Klimatisierungszwecke wie Universitäten, Flughäfen, Regierungsvierteln. Die Fernkältezentralen sind i.d.R. integriert in dem zu klimatisierenden Gebäudekomplex.

Bedingt durch den Klimawandel und die Zunahme von extremem Wärme- und Kälteperioden nimmt sowohl die Fernwärme als auch die Fernkälte an Bedeutung zu. Bereits heute existieren in mehreren europäischen Städten Fernkältesysteme, wie aus der Abb. 1.1 zu ersehen ist.

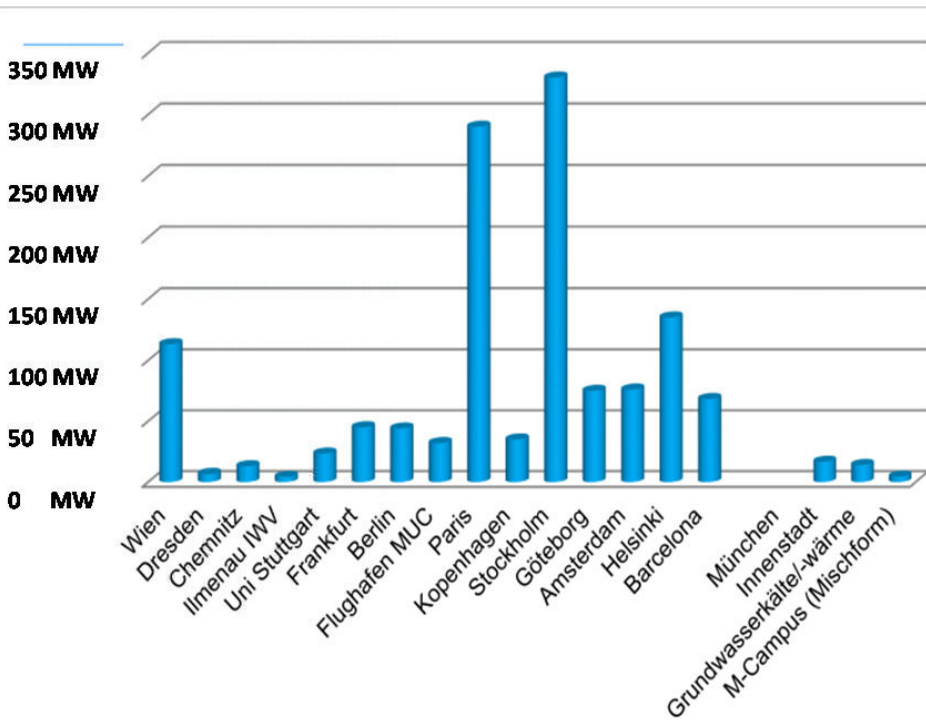


Abb. 1.1: Fernkältesysteme in Europäischen Großstädten. Quelle: The World Factbook-CIA

Wie bei der Fernwärme so auch bei der Fernkälte ist ein Gleichzeitigkeitsgrad von 70 % bis 80 %, bezogen auf die Summe der Anschlusswerte, üblich.